



REGIONE DEL VENETO

Attuazione dell'articolo 11 della legge 24 giugno 2009, n.77

## STUDIO DI MICROZONAZIONE SISMICA

### Relazione illustrativa SISMICA

COMUNE di CROCETTA DEL MONTELLO (TV)



|         |                                                                                      |                |
|---------|--------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| Regione | Soggetto realizzatore                                                                | Data           |
|         |  | 15 Maggio 2015 |

## INDICE

|           |                                                                                         |           |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>  | <b>INTRODUZIONE E GENERALITA'</b>                                                       | <b>3</b>  |
| 1.1       | Riferimenti normativi.....                                                              | 4         |
| 1.2       | Ambiti di studio .....                                                                  | 5         |
| <b>2</b>  | <b>DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITA' DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO</b>            | <b>8</b>  |
| 2.1       | Generalità.....                                                                         | 8         |
| 2.2       | Definizione della pericolosità di base.....                                             | 10        |
| 2.3       | La classificazione sismica del comune.....                                              | 14        |
| 2.4       | La classificazione sismica del territorio comunale .....                                | 16        |
| 2.5       | I sistemi di faglie attive.....                                                         | 18        |
| 2.5.1     | <i>Cenni storici</i> .....                                                              | 18        |
| 2.5.2     | <i>Studio delle faglie</i> .....                                                        | 20        |
| 2.5.3     | <i>Le sorgenti sismogenetiche responsabili di terremoti distruttivi</i> .....           | 21        |
| 2.5.4     | <i>- Progetto OMBRA: deformazione su faglie sismogeniche nella zona del Montello</i> 27 | 27        |
| <b>3</b>  | <b>ASSETTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO DELL'AREA</b>                                     | <b>28</b> |
| 3.1       | Inquadramento geologico - geomorfologico.....                                           | 28        |
| <b>4</b>  | <b>DATI GEOTECNICI E GEOFISICI</b>                                                      | <b>30</b> |
| <b>5</b>  | <b>MODELLO DEL SOTTOSUOLO</b>                                                           | <b>30</b> |
| 5.1       | Individuazione delle microzone.....                                                     | 30        |
| 5.2       | Metodologia di studio .....                                                             | 33        |
| 5.3       | Breve descrizione del metodo.....                                                       | 36        |
| <b>6</b>  | <b>INTERPRETAZIONI ED INCERTEZZE</b>                                                    | <b>39</b> |
| <b>7</b>  | <b>METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI</b>                                          | <b>43</b> |
| <b>8</b>  | <b>ELABORATI CARTOGRAFICI</b>                                                           | <b>45</b> |
| 8.1       | Carta delle indagini (T1).....                                                          | 46        |
| 8.2       | Carta geologico-tecnica (T2) .....                                                      | 47        |
| 8.3       | Carta delle Microzone Sismiche (T0).....                                                | 48        |
| 8.4       | Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (livello 1).....                  | 48        |
| 8.4.1     | <i>Zona 1 - Categoria di suolo B</i> .....                                              | 49        |
| 8.4.2     | <i>Zona B2 - Categoria di suolo B</i> .....                                             | 63        |
| 8.4.3     | <i>Zona 2 - Categoria di suolo C</i> .....                                              | 66        |
| 8.4.4     | <i>Zone suscettibili di instabilità</i> .....                                           | 68        |
| 8.4.5     | <i>Forme di superficie</i> .....                                                        | 68        |
| 8.4.6     | <i>Faglie attive e capaci</i> .....                                                     | 69        |
| <b>9</b>  | <b>CONCLUSIONI</b>                                                                      | <b>70</b> |
| <b>10</b> | <b>BIBLIOGRAFIA</b>                                                                     | <b>72</b> |
| <b>11</b> | <b>ALLEGATI</b>                                                                         | <b>74</b> |

## 1 INTRODUZIONE E GENERALITA'

L'ufficio tecnico del comune di Crocetta del Montello (Treviso) mi ha conferito l'incarico con determina n. 268 del 23.12.2014, nella persona del responsabile di servizio, geom. Enrica Soldera, per compiere lo studio di Microzonazione Sismica del territorio comunale ai fini dell'attuazione del Piano degli Interventi (P.I.), eseguito in coerenza con il Piano di Assetto del Territorio Intercomunale (P.A.T.), poiché il comune di Crocetta del Montello è classificato in zona 2, che corrisponde ad un territorio a pericolosità sismica di base medio-alta. L'accelerazione di riferimento per il comune è  $a_g=0.227197$  come riportato in all. 7 della OPCM 3907/2010.

La determinazione della velocità sismica dei primi 30 m di sottosuolo e della frequenza propria dei terreni, argomento principale di questo studio di Microzonazione Sismica (di seguito indicata come MS), è la prima importante fase per lo studio di Microzonazione Sismica (MS) vero e proprio (cfr. All. A - DGR 3308 del 4-11-2008 e DGR 1572 del 03/09/2013) come specificato negli "Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica" (di seguito indicato con la sigla ICMS).

La presente relazione illustra i dati riguardanti gli approfondimenti effettuati e fa riferimento alla cartografia allegata che contiene l'ubicazione delle indagini, l'individuazione delle microzone omogenee e relative condizioni predisponenti l'amplificazione.

Il documento tecnico di riferimento per la realizzazione degli studi di microzonazione sismica è rappresentato dagli "Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica" (ICMS) approvati il 13 novembre 2008 dalla Conferenza delle Regioni e delle Province autonome in accordo con la Presidenza del Consiglio dei Ministri e del Dipartimento della Protezione Civile. Gli standard per la stesura della carta delle indagini, della carta geologico-tecnica e la carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica e la loro informatizzazione sono quelli indicati dalla Commissione tecnica per la microzonazione sismica (articolo 5, comma 7 dell'OPCM 13 novembre 2010, n. 3907). A questo si aggiungono le "linee guida per gli studi di microzonazione sismica" pubblicati come allegato A alla DGR 1572 del 03/09/2013.

Gli studi di MS si propongono di:

- identificare e perimetrare le aree a differente pericolosità sismica locale (microzone, solitamente grandi alcuni ettari o alcuni isolati);
- stimare le risposte dei terreni delle diverse microzone, in modo da stabilire gerarchie di pericolosità e fornire elementi conoscitivi per una pianificazione del territorio e progettazione delle opere, adeguate alla pericolosità sismica del sito.

Nella sua interezza il documento nazionale intende costituire un elemento utile all'approfondimento della pericolosità sismica locale, necessario all'analisi del rischio sismico, applicabile ai settori della programmazione territoriale, della pianificazione urbanistica, della pianificazione dell'emergenza e della normativa tecnica per la progettazione. Il documento individua e determina criteri, metodi e procedure per l'esecuzione di azioni di microzonazione a diverse scale e con diversi livelli di approfondimento.

Si precisa che l'avvio di uno studio di microzonazione sismica a livello regionale riveste carattere sperimentale e pertanto deve essere inteso come "fase pilota" ed i livelli di approfondimento potranno essere aggiornati e/o integrati nel tempo al fine di migliorarne l'applicabilità in relazione al contesto geologico-tecnico locale. La microzonazione sismica (MS) ha lo scopo di riconoscere ad una scala sufficientemente grande (scala comunale o sub comunale) le condizioni locali che possono modificare sensibilmente le caratteristiche del moto sismico atteso o possono produrre deformazioni permanenti rilevanti per le costruzioni e le infrastrutture. In sostanza, lo studio di MS viene sintetizzato in una carta del territorio nella quale sono indicate le zone in cui il moto sismico viene modificato rispetto a quello atteso in condizioni ideali di roccia rigida e pianeggiante e, pertanto, gli scuotimenti attesi sono superiori a quelli forniti dagli studi di pericolosità di base.

### **1.1 Riferimenti normativi**

Il lavoro è stato svolto in accordo con D.G.R. 3308/2008 e la D.G.R. 1572/2013 per arrivare alle cartografie definite "livello 1" in quest'ultimo documento, avendo come base di partenza gli elaborati della relazione illustrativa dello studio di compatibilità sismica del PAT e relative cartografie a cura di ADASTRA – Servizi per la geologia – di Torre di Mosto (VE).

In particolare:

- L. 02.02.1974, n. 64, "*Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche*";
- D. M. 14.05.1982, "*Aggiornamento dell'elenco delle zone sismiche del Veneto*";
- D.M. 11.03.1988, "*Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione*";
- Circ. LL. PP. 24 settembre 1988, n° 30483 "*Norme tecniche per terreni e fondazioni - Istruzioni applicative*";
- Circ. Reg, Veneto 05.04.2000, n. 9, "*Indirizzi in materia di prescrizioni tecniche da osservare per la realizzazione di opere pubbliche e private. Obblighi derivanti dalla L. 02.02.1974, n. 64 e*

*dal D.M. 11.03.1988”;*

- Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20.03.2003, “*Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per la costruzione in zona sismica*”;
- Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3431 del 03.05.2005 “*Ulteriori modifiche ed integrazioni all’ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 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»*”;
- D.M. 14.09.2005, “*Norme tecniche per le costruzioni*”;
- Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3519 del 28.04.2006 “*Criteri generali per l’individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l’aggiornamento degli elenchi delle medesime zone*”;
- Legge n. 77 del 24 Giugno 2009, “*Interventi urgenti di Protezione Civile in materia di prevenzione del rischio sismico*”.
- Direttiva del Presidente del Consiglio dei Ministri 12 ottobre 2007, “*Valutazione e riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale con riferimento alle norme tecniche per le costruzioni*”.
- D.M. 14.01.2008, “*Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni*”.
- D.G.R. del Veneto n. 71 del 22 gennaio 2008, “*Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri 28 aprile 2006, n. 3519 “Criteri generali per l’individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l’aggiornamento degli elenchi delle medesime zone”. Direttive per l’applicazione.*
- Circolare 02 febbraio 2009 n. 617/C.S.LL.PP..
- Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3907 del 13 novembre 2010.
- Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 4007 del 29/02/2012.
- Deliberazione della Giunta Regionale n. 1496 del 20 settembre 2011, “*Fondo statale per interventi di prevenzione del rischio sismico di cui all’Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3907 in data 13 novembre 2010*”.

## **1.2 Ambiti di studio**

Nell’ambito della pianificazione territoriale del comune di Crocetta del Montello, all’interno del P.I., in funzione delle varie scale e dei vari livelli di intervento, lo studio di MS è stato condotto su

quelle aree per le quali le condizioni normative consentono o prevedono l'uso a scopo edificatorio o per infrastrutture, o la loro potenziale trasformazione a tali fini. Sono stati privilegiati quindi gli ambiti di sviluppo insediativo, sia esso a destinazione residenziale, produttiva, dei servizi o infrastrutturale. Per completezza le indagini sono state estese anche ad aree dove non sono al momento previste trasformazioni urbanistiche ma puntando alla caratterizzazione di aree presumibilmente omogenee dal punto di vista geologico.

Il territorio del comune di Crocetta del Montello è collocato nella parte centrale della Provincia di Treviso e confina con i comuni di Cornuda a Ovest, Pederobba, Vidor e Moriago della Battaglia a Nord e con Montebelluna a Sud e Volpago del Montello a Est; occupa una superficie totale di 26 km<sup>2</sup> di cui 17 km<sup>2</sup> sono quelli oggetto di indagine per lo studio di Microzonazione Sismica.

La base cartografica utilizzata è la Carta Tecnica Regionale a scala 1:5000, i cui riferimenti specifici sono i seguenti:

- Elemento 084144 Capitello dei Lupi;
- Elemento 084143 santa Maria della Vittoria;
- Elemento 084134 Cornuda;
- Elemento 084133 Nogarè;
- Elemento 084132 Crosera;
- Elemento 084131 Ciano;
- Elemento 084103 Moriago della Battaglia;
- Elemento 084092 Mosnigo.

Per quanto riguarda le vie di comunicazione principali il territorio è attraversato da due direttrici principali: Sp2 (Via Erizzo) che attraversa il centro abitato del Comune con direzione Nord-Sud, SP 77 (Via Lodovico Boschieri, Via Francesco Baracca e Via Gabriele D'Annunzio) che taglia il territorio comunale con direzione Est-Ovest correndo al piede settentrionale del Montello da cui si dipartono le caratteristiche "prese" che salgono al colle.

I caratteri litologici presenti possono essere divisi in due aree:

- terreni quaternari ascrivibili a depositi alluvionali del fiume Piave presenti nella porzione occidentale e settentrionale del territorio comunale caratterizzate da un andamento da sub pianeggiante a debolmente ondulato.
- terreni conglomeratici, limoso-argilloso-sabbiosi, con coperture di alterazione di qualche metro di spessore su substrati alterati e incarsiti, derivanti dal disfacimento del substrato costituito da un conglomerato poligenico (Conglomerato del Montello) del Messiniano (Miocene superiore).

Va altresì precisato che nella fascia di raccordo tra la zona collinare e la zona pianeggiante sono presenti depositi fluviali che in questa fascia risultano intergreditati con quelli colluviali derivanti dal disfacimento carsico del substrato conglomeratico del Montello.

Oltre alla cartografia di base costituita dalla Carta Tecnica Regionale a scala 1: 5.000, le cartografie tematiche di riferimento utilizzate (dal PAT Comunale di Crocetta del Montello), nonché le indagini precedenti realizzate nel comune a fini urbanistici sono:

- “Relazione geologica” - P.R.G. Piano Regolatore Generale, dr. geol. E. Tomio, 2003;
- “Relazione geologica” – P.A.T. Piano di Assetto del Territorio, ADASTRA s.r.l, Dott.Geol. Aldino Bondesan e Dott. Geol. Roberto Francese, 2010;
- “Relazione Illustrativa” – Studio di Compatibilità Sismica, ADASTRA s.r.l, Dott. Geol. Aldino Bondesan e Dott. Geol. Roberto Francese, 2010;

La carta geolitologica (PRG) e dei sistemi morfo-deposizionali, facilmente ricostruibile dalla cartografia tematica, costituisce la base conoscitiva di partenza per la predisposizione della rete di caratterizzazione sismica, individuata da una serie di stazioni di misura del parametro Vs30, distribuiti sul territorio in relazione alla distribuzione dei suddetti principali corpi deposizionali.

Per quanto riguarda i terremoti storici che hanno colpito l'area si è fatto riferimento al Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI), disponibile al sito <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI04/>, frutto di un progetto portato avanti da un Gruppo di Lavoro formato da ricercatori dell'Istituto Nazionale di Geofisica (ING), del Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti (GNDT) del CNR, della società SGA Storia Geofisica Ambiente (SGA) e del Servizio Sismico Nazionale (SSN). Il catalogo viene aggiornato periodicamente sulla scorta delle nuove conoscenze. Dalla prima formulazione del 1999 (CPTI99), ne è seguita una seconda nel 2004 (CPTI04) ed una terza nel 2008 (CPTI08) che aggiornava quella precedente per gli anni dal 1901 al 2006, anche questa disponibile online. L'ultimo aggiornamento del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani (CPTI11), è sempre disponibile all'indirizzo: <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI11/>.

Per quanto riguarda le faglie capaci che interessano il territorio comunale si è invece fatto riferimento al catalogo ITHACA “ITaly HAZard from CAPable faults”, disponibile on-line all'indirizzo [http://www.apat.gov.it/site/it-IT/Progetti/ITHACA-Catalogo\\_delle\\_faglie\\_capaci](http://www.apat.gov.it/site/it-IT/Progetti/ITHACA-Catalogo_delle_faglie_capaci).

Alcuni aspetti sono stati definiti anche sulla scorta dell'osservazione allo stereoscopio delle fotoaeree IGMI volo del 1993 e delle immagini CGR del 1998-99, 2003 e 2007 nonché Telespazio 2007 e DigitalGlobe 2011.

## **2 DEFINIZIONE DELLA PERICOLOSITA' DI BASE E DEGLI EVENTI DI RIFERIMENTO**

### **2.1 Generalità**

La pericolosità sismica di base, definita ai sensi del D.M. 14/01/2008, è la componente della pericolosità sismica dovuta alle caratteristiche sismologiche dell'area (tipo, dimensioni e profondità delle sorgenti sismiche, energia e frequenza dei terremoti). Essa calcola (generalmente in maniera probabilistica), per una certa regione e in un determinato periodo di tempo, i valori di parametri corrispondenti a prefissate probabilità di eccedenza, con riferimento a condizioni ideali di bedrock sismico affiorante e privo di irregolarità morfologiche (superficie topografica orizzontale) e fornisce le caratteristiche del terremoto di riferimento (velocità, accelerazione, intensità, ordinate spettrali). La scala di studio è solitamente regionale e costituisce una base per la definizione del terremoto di riferimento per studi di microzonazione sismica.

Teoria ed esperienze nazionali ed internazionali, mostrano con estrema chiarezza che in concomitanza di eventi sismici, l'intrinseca eterogeneità delle caratteristiche geometriche, fisiche, idrauliche e meccaniche dei terreni può indurre danni all'ambiente fisico ed all'ambiente costruito variabili anche in siti posti a breve o brevissima distanza. Tale fenomeno dipende innanzitutto dalle caratteristiche del moto sismico al tetto della formazione di base, nonché dalle caratteristiche geometriche profonde e superficiali dei terreni, dalle loro proprietà fisiche e meccaniche, dalle caratteristiche di permeabilità e dalle condizioni idrauliche al contorno. Questo presuppone un affinamento della pericolosità sismica di base attraverso studi appropriati sulla risposta sismica locale. La risposta sismica locale è la modificazione in ampiezza, frequenza e durata dello scuotimento sismico dovuta alle specifiche condizioni lito-stratigrafiche e morfologiche di un sito. Si può quantificare mediante il rapporto tra il moto sismico alla superficie del sito e quello che si osserverebbe per lo stesso evento sismico su un ipotetico affioramento di roccia rigida con morfologia orizzontale. Se questo rapporto è maggiore di 1, si parla di amplificazione locale.

L'obiettivo del presente studio di Microzonazione Sismica è quello di costruire un modello di velocità di propagazione delle onde elastiche, in modalità trasversale, nei primi 30 metri di profondità e di operare la previsione, su scala locale, del rischio sismico atteso e dei suoi effetti

sull'ambiente fisico e costruito. La finalità è quindi quella di operare una suddivisione dettagliata del territorio comunale in sottozone a diversa pericolosità sismica locale, tenendo conto sia della sismicità di base (distanza dalle sorgenti sismogenetiche, energia, frequenza e tipo dei terremoti attesi), sia delle caratteristiche geologiche, morfologiche e geofisiche locali. La MS, individuando microzone a comportamento sismico omogeneo, consente, in particolare, di indirizzare le scelte di pianificazione verso gli ambiti a minore rischio.

In funzione dei diversi contesti e dei diversi obiettivi gli studi di MS possono essere effettuati a vari livelli di approfondimento, con complessità ed impegno crescenti, passando dal livello 1 fino al livello 3:

- il livello 1 è un livello propedeutico ai veri e propri studi di MS, in quanto consiste in una raccolta di dati preesistenti, di natura geologica, geomorfologica e litostratigrafica, elaborati per suddividere il territorio in microzone qualitativamente omogenee rispetto alle fenomenologie sopra descritte; essi sono la base per la redazione della carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica MOPS; lo studio in corso attiene a questo livello;
- il livello 2 introduce l'elemento quantitativo associato alle zone suscettibili di amplificazione sismica individuate nella precedente fase e per le quali si prevedono trasformazioni urbanistiche, od incremento del carico urbanistico o semplicemente per il territorio compreso nel perimetro del "centro abitato". Ove necessario vengono previste per lo scopo ulteriori e mirate indagini, in modo da consentire una miglior definizione del modello geologico del sottosuolo e fornire per ciascuna microzona identificata una quantificazione numerica degli effetti, ottenuta con metodi semplificati. Il prodotto finale è la formulazione della Carta di Microzonazione Sismica;
- il livello 3 restituisce una Carta di microzonazione sismica con approfondimenti su tematiche o aree particolari o su ambiti di rilevanza strategica; è il livello di maggiore approfondimento per la definizione e caratterizzazione delle zone suscettibili di amplificazioni o di instabilità, perché consente di risolvere le situazioni geologiche e geotecniche complesse, ad esempio inversioni di velocità, non risolvibili con abachi o metodi semplificati, modificando sostanzialmente le carte di microzonazione di livello 1 e 2. Il livello 3, naturalmente richiede un impegno di risorse economiche e professionali importante, giustificato, ad esempio, nel caso di una fase di ricostruzione post-terremoto ma anche, in fase preventiva, nelle aree a più elevato rischio sismico, localmente caratterizzate da potenziali effetti di instabilità, cedimenti e/o liquefazione, ed in generale quando gli approfondimenti del 2° livello risultano inadeguati.

Come detto in precedenza il presente studio costituisce un'importante fase del livello 1, in quanto si occupa dell'acquisizione dei dati di base utili per individuare:

- zone nelle quali non sono previste significative modifiche dello scuotimento che l'evento sismico causerebbe su terreni rigidi e pianeggianti;
- zone nelle quali lo scuotimento è amplificato;
- zone suscettibili di frane in terreni e in roccia;
- zone suscettibili di liquefazioni;
- zone interessate da faglie attive e capaci;
- zone interessate da cedimenti differenziali.

## 2.2 Definizione della pericolosità di base

La pericolosità sismica di base viene definita come la “Componente della pericolosità sismica dovuta alle caratteristiche sismologiche dell'area (tipo, dimensioni e profondità delle sorgenti sismiche, energia e frequenza dei terremoti)”.

La più recente normativa sismica italiana, entrata in vigore il 08/05/2003 con la pubblicazione sulla G.U. dell'Ordinanza P.C.M. n. 3274, recepita dalla Regione Veneto con DGR n. 67 del 3/12/2003, suddivide il territorio italiano in quattro zone sismiche, abbandonando la precedente terminologia di categorie sismiche. Uno dei cambiamenti fondamentali apportati dalla normativa è stata l'introduzione della zona 4, in questo modo tutto il territorio italiano viene definito come sismico. L'appartenenza a ciascuna zona sismica comporta l'adozione di specifiche caratteristiche prestazionali per nuovi edifici e strutture, regolate da opportune norme sismiche contenute nel medesimo provvedimento legislativo, e successive modifiche ed integrazioni. In linea teorica, l'ingresso in zona sismica è agganciato al valore dell'accelerazione orizzontale di picco (Peak Ground Acceleration, PGA, indicata anche come accelerazione massima orizzontale) riferita ad un terreno a comportamento assimilabile alla roccia, ottenuta per un predeterminato livello di probabilità da studi di pericolosità sismica a carattere nazionale. I valori di PGA convenzionalmente associati alle zone sismiche sono riportati nella tabella successiva.

| <i>Zona</i> | <i>Accelerazione con probabilità di superamento pari al 10% in 50 anni (ag/g)</i> | <i>Accelerazione di ancoraggio dello spettro di risposta elastico (ag/g)</i> |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| 1           | > 0.25                                                                            | 0.35                                                                         |
| 2           | 0.15 ÷ 0.25                                                                       | 0.25                                                                         |
| 3           | 0.05 ÷ 0.15                                                                       | 0.15                                                                         |
| 4           | < 0.05                                                                            | 0.05                                                                         |

Tabella 1 – valori di riferimento della attuale normativa sismica

Un ulteriore affinamento delle zone sismiche è stato fatto con l'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri 28 aprile 2006, n. 3519 recante "*Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone*", pubblicata nella G.U. dell'11 maggio 2006, n. 108, in cui sono state stabilite nuove disposizioni per l'individuazione a livello regionale delle zone sismiche che supera il concetto di categoria legato alle suddivisioni amministrative della precedente Ordinanza. Con il medesimo provvedimento è stata approvata la mappa di pericolosità sismica di riferimento nazionale che contiene le accelerazioni orizzontali massime convenzionali al suolo di tipo A, necessarie per redigere il calcolo sismico delle costruzioni.

Quindi la OPCM 3519/2006 di fatto supera il concetto stesso di zonazione, imponendo valori discretizzati nello spazio: la stima della pericolosità sismica, intesa come accelerazione massima orizzontale su suolo rigido ( $V_{s30} > 800$  m/s), viene definita mediante un approccio "sito dipendente" e non più tramite un criterio "zona dipendente". Ciò comporta delle non trascurabili differenze nel calcolo dell'accelerazione sismica di base rispetto alle precedenti normative.

Con le precedenti normative in campo antisismico, applicando il criterio "zona dipendente" avremmo potuto stimare l'accelerazione di base (senza considerare l'incremento dovuto ad effetti locali dei terreni) in maniera automatica, poiché essa sarebbe stata direttamente correlata alla Zona sismica di appartenenza del comune (nel caso di Crocetta del Montello, Zona sismica 2). Con l'entrata in vigore del D.M. 14 gennaio 2008 la classificazione sismica del territorio comunale è scollegata dalla determinazione dell'azione sismica di progetto, mentre rimane il riferimento per la trattazione di problematiche tecnico-amministrative connesse con la stima della pericolosità sismica.

I nuovi criteri per l'individuazione della zona sismica si basano su un elaborato grafico che rappresenta il territorio italiano in 12 fasce di valori di PGA di riferimento; innovando le disposizioni dell'O.P.C.M. 3274/03, oltre ai valori standard delle accelerazioni riferite a suoli rigidi viene fornita anche una stima dell'incertezza, tramite predefiniti percentili della distribuzione associata. Per l'attribuzione del sito alla fascia di pericolosità sismica di competenza è stato creato un reticolo di riferimento i cui nodi, individuati in termine di latitudine e longitudine, debbono distare di un passo  $\leq 0,05^\circ$ : l'INGV ha fornito i parametri di griglia con passo  $0,05^\circ$  e  $0,02^\circ$  (in termini di distanza circa 10 km e circa 5 km). Per ogni punto vengono forniti i seguenti parametri:

id identificativo del punto della griglia di calcolo

long longitudine espressa in gradi sessagesimali-decimali

latitudine espressa in gradi sessagesimali-decimali

ag accelerazione massima del suolo (50mo percentile, valore standard)

16perc accelerazione massima del suolo (16mo percentile)

50perc accelerazione massima del suolo (50mo percentile)

84perc accelerazione massima del suolo (84mo percentile)

In sostanza si è passati da una mappa di pericolosità sismica (2004) utilizzabile dalle Regioni come riferimento per aggiornare l'assegnazione di un Comune a una delle 4 zone sismiche a una dettagliata descrizione dello scuotimento atteso, espresso in termini di parametri ingegneristici. Successive elaborazioni (Progetto INGV-DPC S1, realizzato nell'ambito della Convenzione triennale 2004-2006 fra il Dipartimento Nazionale di Protezione Civile, e INGV, avente come oggetto l'assistenza scientifica e manutenzione dell'elaborato di pericolosità rilasciato nel 2004) hanno portato ad ampliare la disponibilità di valori di pericolosità, riferiti a diverse probabilità di eccedenza, e/o valori di accelerazione spettrale. In particolare alcuni dati estrapolati dalla griglia:

- $A_g$  = accelerazione orizzontale massima al sito;
- $F_0$  = valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- $T_{c}^*$  = periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale,

servono per ricavare gli spettri di progetto da utilizzare nella progettazione secondo le nuove Norme



Tecniche per le Costruzioni (NTC) approvate col D.M. 14/01/08. I punti della griglia sono consultabili on-line presso un sito WebGis appositamente predisposto: <http://esse1.mi.ingv.it>.

Le zone sismiche tradizionali dell'Ordinanza 3274/2003 sopravvivono solo per scopi amministrativi e per la zona 4.

I valori dei parametri  $a_g$ ,  $F_0$  e  $T_{c}^*$  determinati sono relativi a situazioni geologiche corrispondenti ad un sito con assenza di effetti locali dei terreni (Categoria A), ovvero con presenza di substrato sismico ( $V_{s30} > 800\text{m/s}$ )

affiorante o subaffiorante ed in condizioni morfologiche pianeggianti.

Sulla base di quanto detto sopra e utilizzando un software specifico disponibile in rete (Geostru PS Parametri Sismici v. 1.5), il valore mediato del moto sismico rispetto ai quattro punti di maglia che

lo comprendono e riferito al Municipio in Via Sant' Andrea 1 a Crocetta del Montello (figura a lato), può essere descritto convenientemente dallo spettro di risposta elastico in accelerazione delle componenti orizzontali del moto che tengono in debito conto delle amplificazioni locali (stratigrafiche e topografiche).

La categoria topografica è la T1 in quanto pendio con inclinazione media inferiore ai 15°. Nella tabella sotto sono riportati i dati di ingresso e quelli di uscita, deducibili come detto dallo spettro di accelerazione, da utilizzare nelle verifiche allo stato limite di salvaguardia della vita SLV come richiesto dalla normativa mediando dai valori di griglia del Ministero.

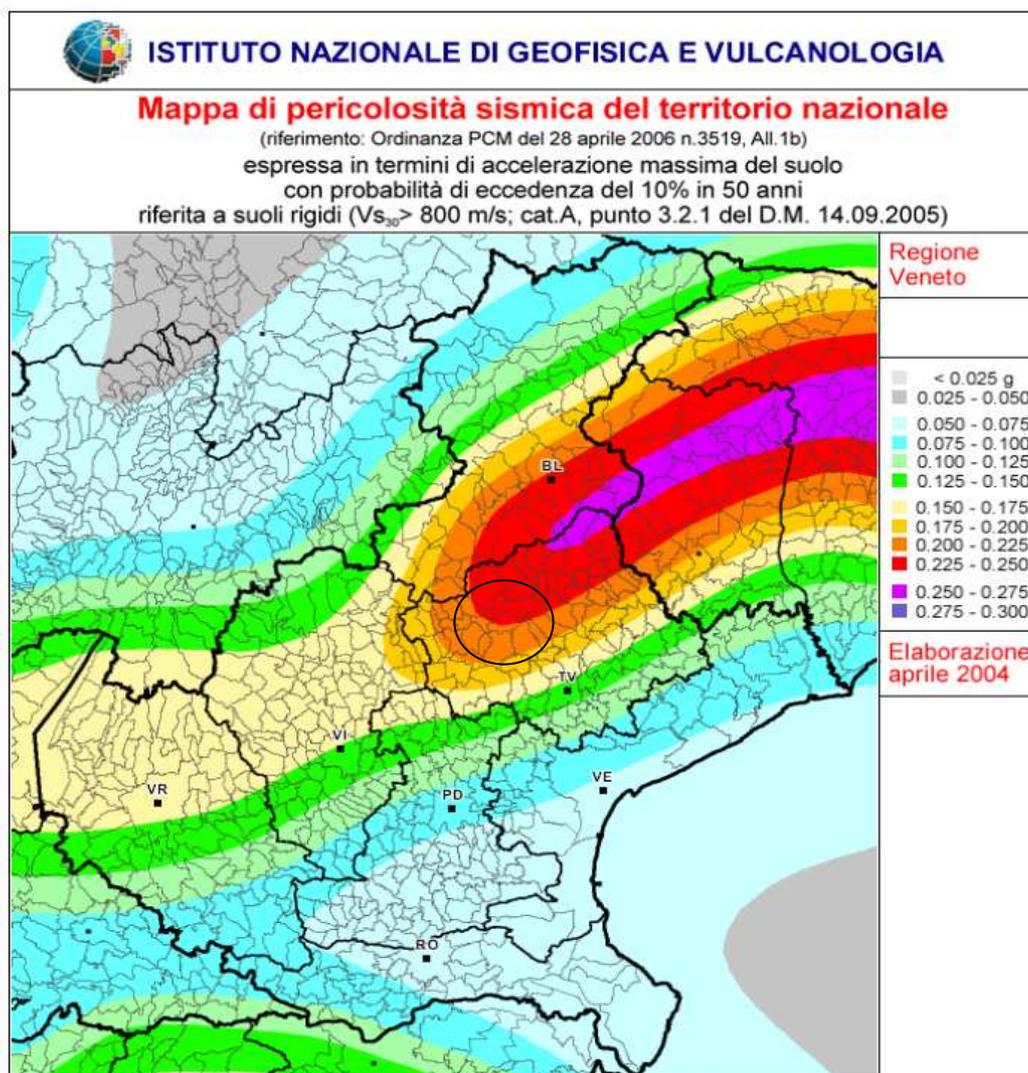
Da notare l'attribuzione di classe d'uso II che è propria di edifici residenziali e non di fabbricati strategici. I dati di longitudine e latitudine del sito sono stati desunti da Google Maps.

|                                             | Coordinate ED50            | Coordinate WGS 84                  |
|---------------------------------------------|----------------------------|------------------------------------|
| Latitudine e Longitudine sito               | N 45.827028<br>E 12.035726 | N 45.82527100<br>E 12.03490800     |
|                                             | Dati di ingresso           | Dati in uscita                     |
| Periodo di ritorno                          | 475 anni                   |                                    |
| Vita nominale dell'opera                    | 50 anni                    |                                    |
| Classe d'uso                                | II                         |                                    |
| Fo                                          | 2,400                      |                                    |
| Tc*                                         | 0,320                      |                                    |
| Accelerazione orizzontale max al sito ag(g) | <b>0,222</b>               |                                    |
| Tipo terreno                                | <b>B</b>                   |                                    |
| Coefficiente Cc                             | $1,10*(Tc^*)^{-0,20}$      | 1,382                              |
| Amplificazione Stratigrafica Ss             | $1,40-0,40*Fo*ag/g$        | 1,187                              |
| Amplificazione Topografica St               | T1                         | 1,0                                |
| Accelerazione massima attesa in superficie  | $amax = Ss*St*ag/g$        | $1,187*1,0*0,222 = \mathbf{0,264}$ |

Tabella 2 – parametri di risposta sismica per la zona del municipio di Crocetta del Montello

Nella figura alla pagina seguente è riportato uno stralcio della “Mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale” relativa alla Regione Veneto redatta dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia nel 2004 e recepita dalla recente Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3519 del 28.04.2006 sopra citata, che assume il ruolo di riferimento ufficiale per eventuali aggiornamenti della zonazione sismica del territorio da parte dei soggetti che ne hanno la competenza territoriale ovvero le Regioni.

Per una più rigorosa analisi della risposta sismica locale vanno quindi considerate sia le caratteristiche della superficie topografica che quelle stratigrafiche le quali possono modificare il moto sismico in superficie favorendo fenomeni di instabilità.



### 2.3 La classificazione sismica del comune

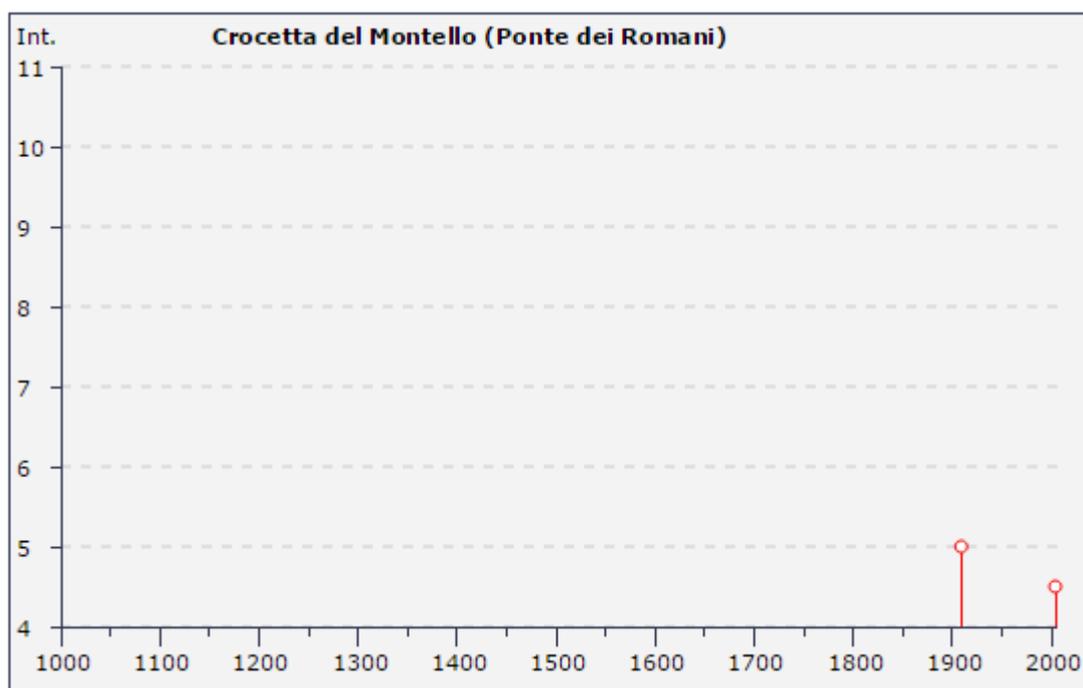
Per quanto riguarda i dati sismici storici di Crocetta del Montello è stato utilizzato sia il catalogo NT4.1 (Camassi e Stucchi, 1996) e sia il Data Base Macrosismico Italiano del 2004 (DBMI04) e l'aggiornamento 2011: entrambi non danno notizia di eventi significativi nell'area in epoca storica. Per i valori di intensità risentita sono stati invece utilizzati i dati contenuti nel solo Data Base Macrosismico Italiano del 2004 (DBMI04, il database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI04), redatto dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (INGV), disponibile al sito <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11/>. Secondo il database nel territorio in esame, come detto sopra, non sono stati registrati eventi specifici con magnitudo superiore a 4.5 della scala Richter, ma è stata interessata da scuotimenti sismici di una certa entità (intensità registrata al sito  $I_s \geq 5$ ) in occasione dei terremoti con epicentro in località vicine:

| Località vicine (within 10km) |       |     |          |
|-------------------------------|-------|-----|----------|
| Località                      | Stato | NMD | Distanza |
| Asolo                         | IT    | 29  | 10km     |
| Caerano di San Marco          | IT    | 5   | 6km      |
| Cornuda                       | IT    | 9   | 2km      |
| Maser                         | IT    | 6   | 5km      |
| Monfumo                       | IT    | 7   | 9km      |
| Montebelluna                  | IT    | 18  | 6km      |
| Moriago della Battaglia       | IT    | 8   | 7km      |
| Nogarè                        | IT    | 3   | 2km      |
| Pederobba                     | IT    | 6   | 8km      |
| Sernaglia della Battaglia     | IT    | 4   | 9km      |
| Valdobbiadene                 | IT    | 25  | 8km      |
| Vidor                         | IT    | 7   | 3km      |
| Volpago del Montello          | IT    | 5   | 9km      |

I dati riassuntivi delle osservazioni in merito all'intera storia sismica sono riportati nella tabella sottostante

### Storia sismica di Crocetta del Montello

| Numero di eventi: 7 |                                 |                 |     |                |
|---------------------|---------------------------------|-----------------|-----|----------------|
| Effetti             | In occasione del terremoto del: |                 |     |                |
| I[MCS]              | Data                            | Ax              | Np  | Io Mw          |
| 5                   | 1909 01 13 00:45                | BASSA PADANA    | 799 | 6-7 5.53 ±0.09 |
| 2-3                 | 1987 05 02 20:43                | Reggiano        | 802 | 6 4.74 ±0.09   |
| 3-4                 | 1989 09 13 21:54                | PASUBIO         | 779 | 6-7 4.88 ±0.09 |
| NF                  | 1998 04 12 10:55                | Slovenia        | 227 | 5.66 ±0.09     |
| NF                  | 2001 07 17 15:06                | Merano          | 663 | 6 4.84 ±0.09   |
| NF                  | 2004 07 12 13:04                | Alpi Giulie     | 366 | 5.19 ±0.09     |
| 4-5                 | 2004 12 04 22:20                | Valle del Piave | 115 | 5 4.18 ±0.14   |



#### 2.4 La classificazione sismica del territorio comunale

In base alla zonazione attualmente adottata dall'INGV (ZS9), il territorio di Crocetta del Montello si trova nella zona sismotettonica ZS905 (Friuli – Veneto Orientale, vedi fig. 1) con  $M_{wmax}$  attesa di 6.60.

Il meccanismo di fagliazione responsabile dei terremoti che si sono verificati in questa zona è di tipo faglia inversa, con “profondità efficace” (profondità alla quale avviene il maggior numero di terremoti) ipocentrale media stimata di 8-12 km.

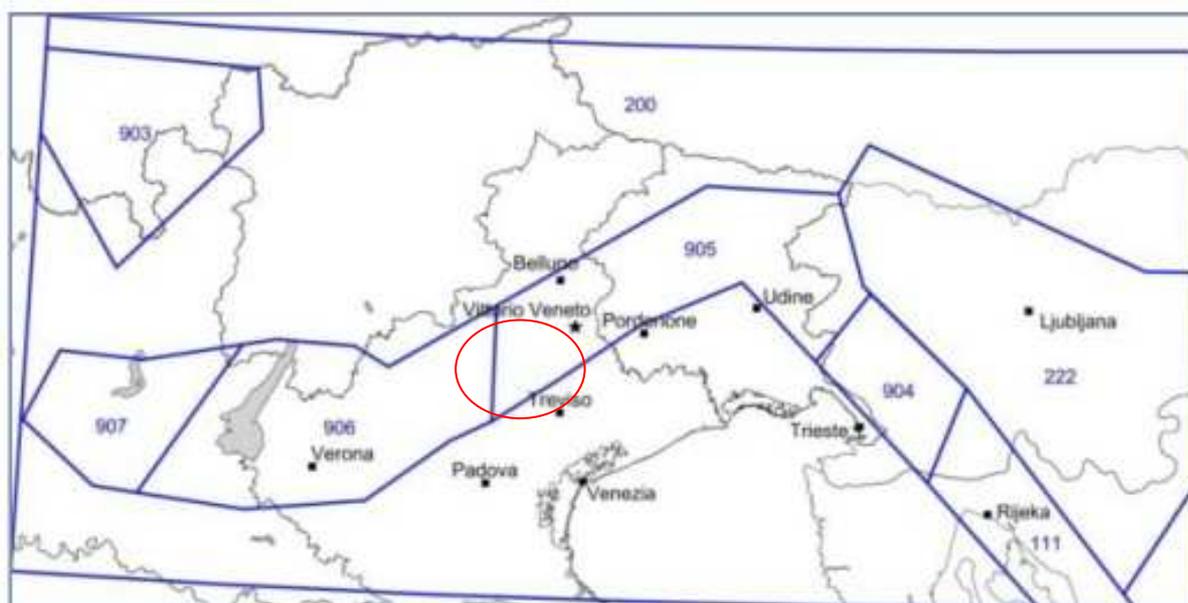


Fig. 1: Zonazione sismogenetica ZS9

Per quanto riguarda la pericolosità sismica del territorio dal punto di vista macrosismico, come detto in introduzione, l'Ordinanza P.C.M. n. 3274/2003 ha inserito il comune di Crocetta del Montello in zona 2, confermandone la sismicità già riconosciuta da provvedimenti precedenti in particolare il D.M. 14 maggio 1982. Questa zona prevede una accelerazione massima di picco su suolo di riferimento rigido tra  $0,175 \div 0,250$  g con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni, che corrisponde al valore con tempo di ritorno di 475 anni (vedi figura 2).

Secondo la mappa di pericolosità sismica elaborata dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia si vede come il comune di Crocetta del Montello è compreso nella fascia di accelerazione massima al suolo (riferita a suolo rigido di tipo A) tra  $0,175 \div 0,250$ g. Pertanto i valori di riferimento da utilizzarsi nella progettazione degli edifici devono essere compresi entro questa fascia. Secondo la mappa di pericolosità sismica elaborata dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia si vede come il comune di Crocetta del Montello è compreso entro una zona di accelerazione massima al suolo (riferita a suolo rigido di tipo A) di:

$0,225 \div 0,250$ g = settore Ovest del comune

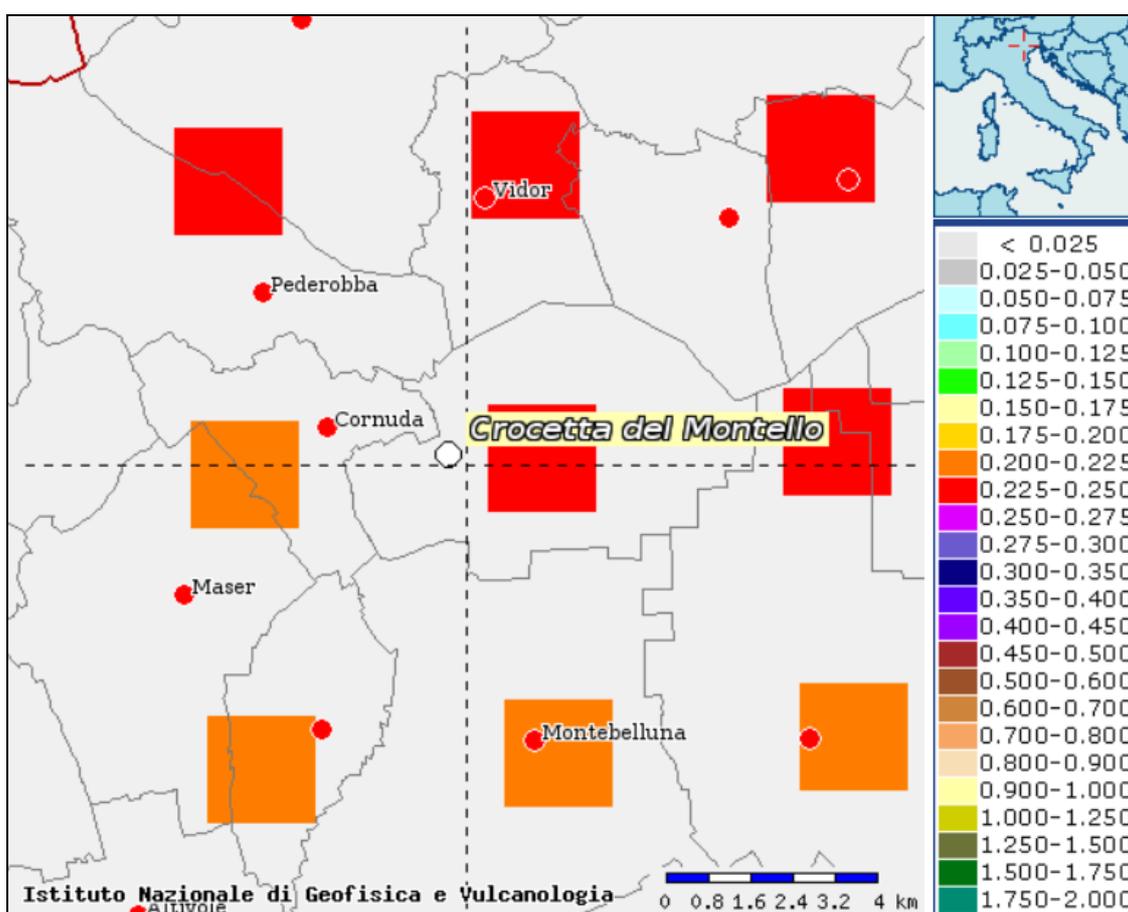


Fig. 2: Mappa di pericolosità sismica del territorio comunale di Crocetta del Montello

## 2.5 I sistemi di faglie attive

### 2.5.1 Cenni storici

Negli anni '60 e '70 furono raccolti un gran numero di dati sull'attività Plio-Quaternaria delle faglie dell'Italia del NE, poi sintetizzati nella "Mappa Neotettonica dell'Italia" (CNR-PFG 1987). In questa vennero mappati i maggiori sistemi di *thrust* sud-vergenti che bordavano le pianure Veneta e Friulana ed influenzavano il dominio pre-Alpino, come strutture continue attive durante il Pliocene ed il Quaternario (faglie capaci).

La recente attività dei sovrascorrimenti che delimitano le pianure Veneta e Friulana viene rimarcata anche nella "Map of active faults between the Po and Piave Rivers and Lake Como" (Castaldini & Panizza, 1991), che riporta 112 faglie attive nell'area compresa tra il lago di Garda e la regione Friulana. Gli autori hanno mappato 4 principali strutture compressive dirette ENE-WSW: le linee Bassano-Valdobbiadene, Aviano, Sacile e Valsugana Sud, insieme con un gran numero di faglie minori.

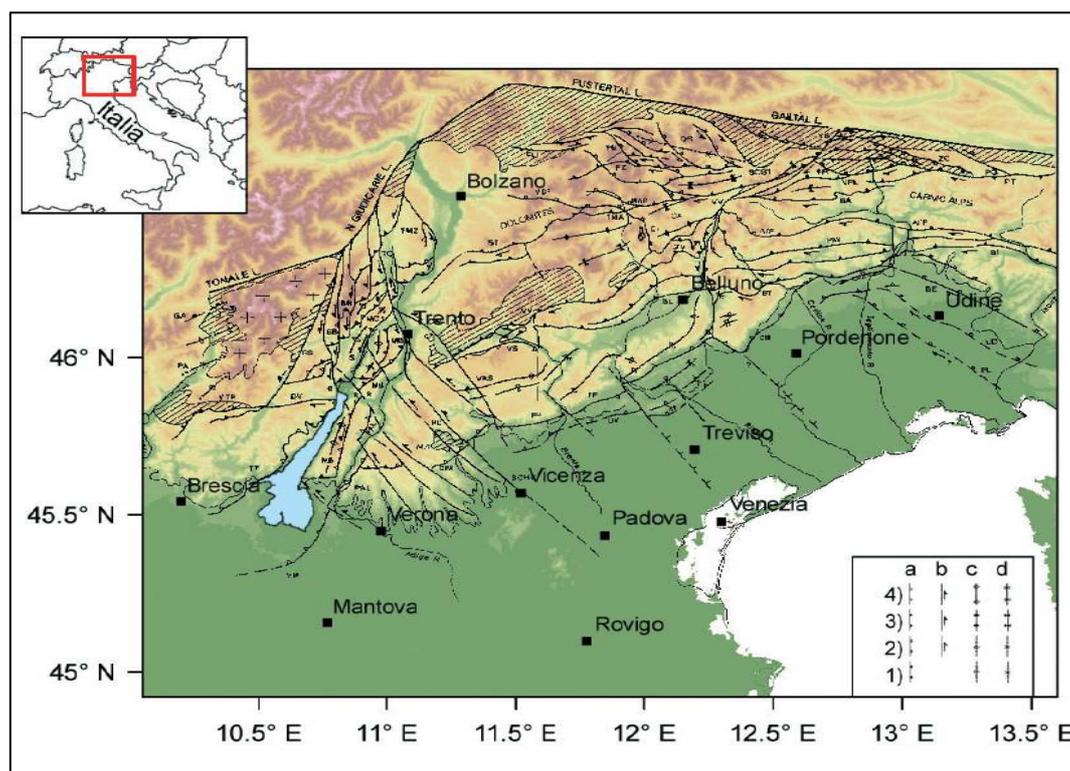


Fig. 3 Interpretazione strutturale delle Alpi Meridionali orientali (AMO) tratta da Castellarin *et al.* (1998b).

Un sommario a scala regionale delle faglie attive che interessano la catena orientale delle Alpi Meridionali è stato proposto da Galadini *et al.* (2001b). Il lavoro, che rileggeva criticamente la letteratura disponibile, riportava nuovi dati di campagna del settore W dell'area indagata. La mappa elaborata includeva le faglie principali (come tracce superficiali) la cui lunghezza era consistente con terremoti di magnitudo  $M \geq 6,2$ . Le faglie mappate sono caratterizzate dall'evidenza di attività

o dall'indicazione di probabile attività durante il tardo Pleistocene-Olocene (dopo l'ultima Massima Espansione Glaciale, LGM). Il risultato di questa operazione fu un inventario di 8 faglie (si tratta di strutture continue maggiori) che interessavano l'area tra Thiene ed il bordo orientale Friulano. Una successiva rivisitazione critica del lavoro ridusse ulteriormente il numero di faglie attive.

La presenza di faglie capaci nel territorio oggetto di studio può essere verificata consultando il catalogo delle faglie capaci ITHACA "ITaly HAZard from CAPable faults" disponibile on-line all'indirizzo [http://www.apat.gov.it/site/it-IT/Progetti/ITHACA-Catalogo delle faglie capaci](http://www.apat.gov.it/site/it-IT/Progetti/ITHACA-Catalogo%20delle%20faglie%20capaci) (fig. 4).

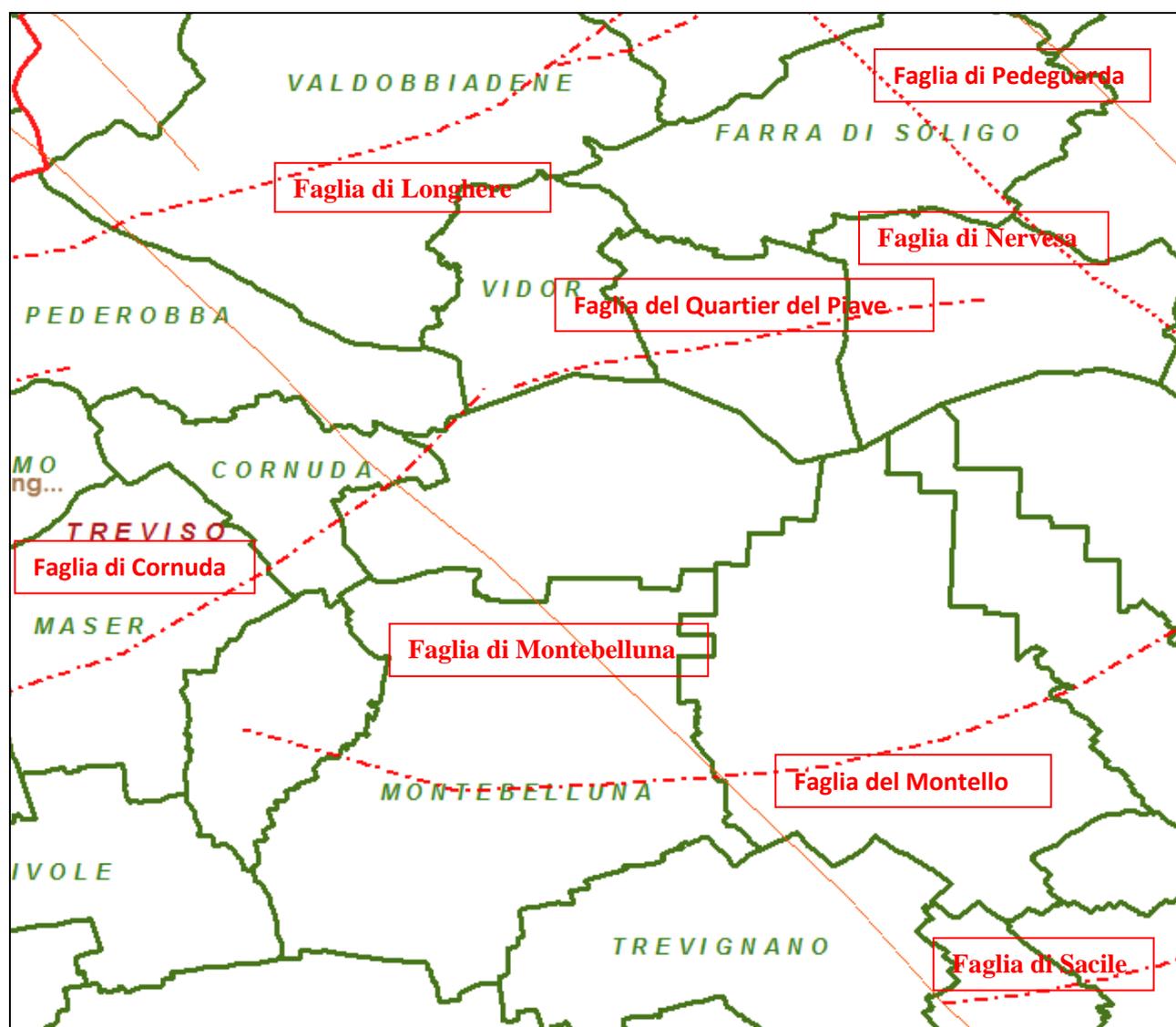


Fig. 4 Cartografia con indicate le faglie capaci che interessano il Comune di Crocetta del Montello desunte dall'archivio ITHACA.

Dai dati geologici disponibili si può vedere come la recente attività tettonica sia il risultato di sovrascorrimenti "ciechi" responsabili di movimenti verticali differenziali e continua deformazione

dei depositi e della morfologia del tardo Quaternario, ubicati sopra la linea di estremità delle faglie sepolte (Benedetti *et al.* 2000; Merlini *et al.* 2002; Peruzza *et al.* 2002).

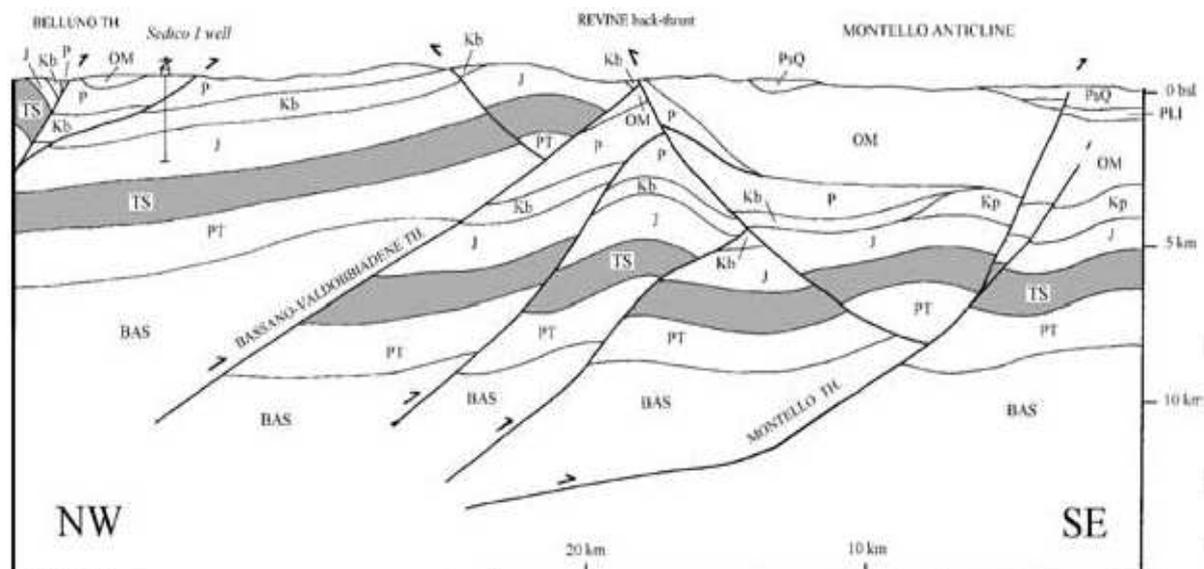


Fig. 5: Sezione geologica attraverso il margine meridionale delle Alpi Meridionali orientali nell'area del Montello (da Fantoni *et al.*, 2001). Legenda: PsQ: Pliocene sup.-Quaternario; PLI: Oligo-Miocene; P: Paleocene; Kb: Cretaceo (bacino); Kp: Cretaceo (piattaforma); J: Giurassico; TS: Trias superiore; PT: Permo-Trias; BAS: Basamento magnetico.

Questo stile deformativo (vedi figura 5) impedisce di comprendere il comportamento delle faglie attraverso il solo uso esteso delle ricerche paleosismologiche. Il quadro si complica ulteriormente qualora le faglie attive della tettonica Neo-Alpina riattivino faglie di sovrascorrimenti più antichi, in particolare quelli Dinarici (diretti NW-SE).

### 2.5.2 Studio delle faglie

La definizione della geometria tridimensionale delle faglie in profondità, soprattutto quando, come in questo caso, si tratta di sistemi di faglie "cieche" cioè sepolte sotto i depositi Quaternari, viene ricavata:

- dall'interpolazione e dal confronto di dati che vengono dallo studio geomorfologico superficiale (che danno informazioni sull'interazione tra la crescita del sovrascorrimento e le forme del territorio);
- dai profili sismici a riflessione trasversali ad esse. I dati geofisici (insieme ai dati dei sondaggi) aiutano a definire il profilo profondo della faglia, permettendo così di legare l'espressione superficiale di questa ad una superficie di faglia profonda;
- se la sorgente sismogenetica è stata responsabile di un terremoto in tempi recenti (es. Friuli 1976), dalla localizzazione epicentrale delle scosse principali e di assestamento e dallo studio dei parametri focali;

- dalla distribuzione dei danni dei terremoti storici.

Secondo questa filosofia, per la definizione della geometria dei maggiori sovrascorrimenti ciechi che interessano la nostra zona, sono stati utilizzati dati strutturali del sottosuolo, derivati da più di 1700 km di profili sismici a riflessione, che hanno permesso di definire la geometria profonda dei segmenti di faglia, fino a profondità comprese tra 5 e 14 km. I vettori di spostamento delle faglie sono stati ricavati da dati strutturali di superficie e dalla precedente conoscenza dei campi di stress che interessano la nostra regione. I tassi di spostamento a lungo termine sono stati invece ricavati dalle dislocazioni dei depositi quaternari.

### 2.5.3 Le sorgenti sismogenetiche responsabili di terremoti distruttivi

Per quanto riguarda la fascia Prealpina, l'elaborazione di un gran numero di dati ha permesso di segmentare il fronte della deformazione attuale in diverse strutture sismogenetiche individuali che possono essere potenzialmente responsabili di terremoti con magnitudo  $M \geq 6$  (ricordiamo che l'energia rilasciata dipende dalla dimensione della sorgente). Sono state così riconosciute 9 strutture tettoniche potenzialmente sismogenetiche (vedi fig. 6).

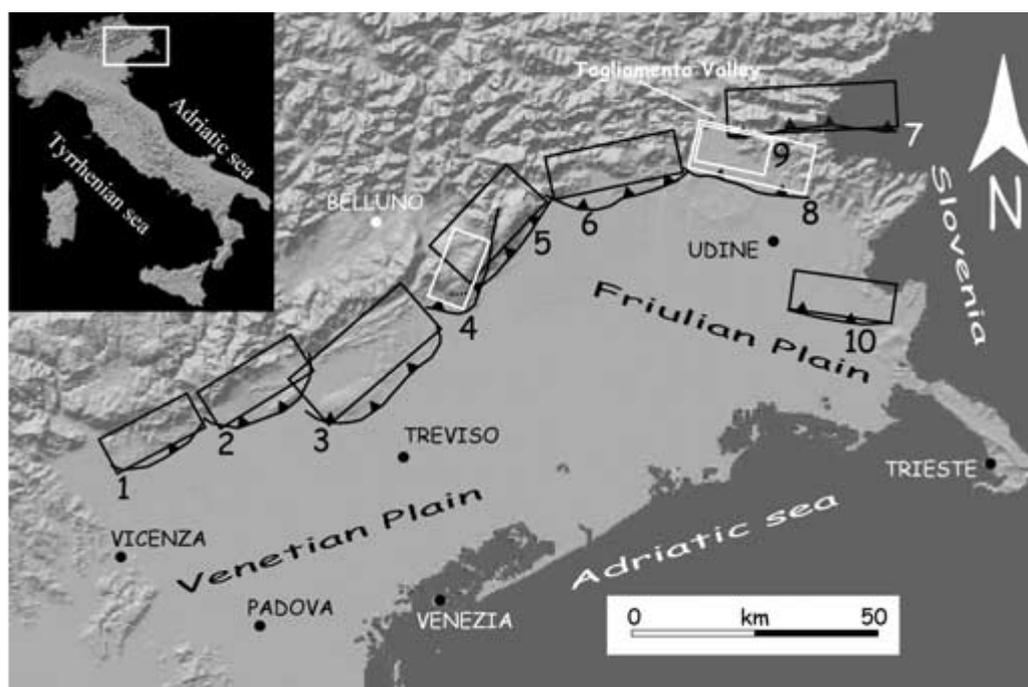


Fig. 6: Mappa delle sorgenti sismogenetiche nel settore Thiene-Udine della catena delle Alpi Meridionali orientali: (1) Thien-Bassano; (2) Bassano-Cornuda; (3) Montello-Conegliano; (4) Cansiglio; (5) Polcenigo-Maniago; (6) Arba-Ragogna; (7) Gemona-Kobarid; (8) Susan-Tricesimo; (9) Trasaghis; (10) Medea. Le sorgenti contornate da rettangoli neri sono state definite principalmente attraverso dati geologici (superficiali e profondi); quelle dai rettangoli bianchi da dati misti geologici-sismici (da Galadini *et al.*, 2005)

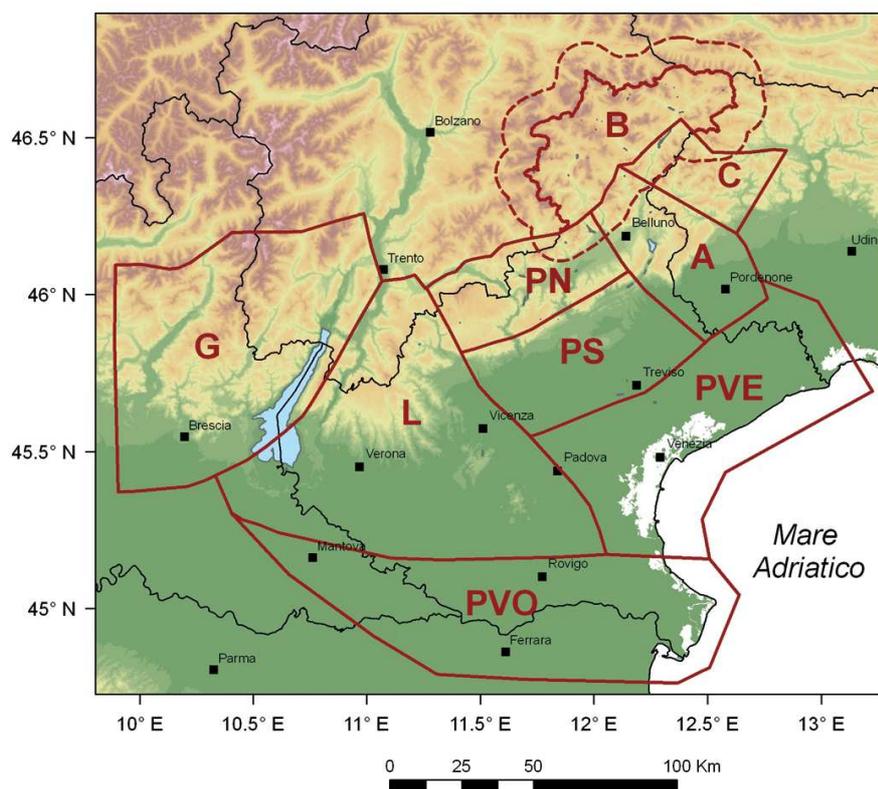


Fig. 7 - Distretti sismici del Veneto (in rosso): sigle descritte nel testo (da Sugan e Peruzza, 2011).

Va però citata anche una proposta più recente, del 2011, contenuta nella pubblicazione *Distretti sismici del Veneto* (M. SUGAN e L. PERUZZA) dell'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale (OGS); in questo lavoro viene riconosciuto un Distretto Pedemontana-Sud (vedi figura 7) con caratteristiche sismogenetiche particolari.

In tale lavoro, seguendo la suddetta suddivisione e considerando il Distretto Pedemontana Sud, le strutture tettoniche che più influenzano la zona in esame sono quelle denominate faglia del Montello e la faglia di Montebelluna. La zona indagata è infatti collegata all'innalzamento che proviene dall'attività dei sottostanti sovrascorrimenti ciechi.

Il Distretto Pedemontano Sud è improntato da diverse strutture tettoniche, sia disgiuntive che plicative, anche se il territorio di Crocetta del Montello è attraversato solo da alcuni di tali da lineamenti tettonici; all'interno dell'area di interesse coesistono altresì strutture minori e lineamenti principali alcuni dei quali rivestono grande importanza per capire l'assetto strutturale a livello regionale (vedi figura 8):

- qualche chilometro a N del Comune la grande flessura Bassano-Valdobbiadene- M. Visentin, elemento neotettonico principale di tutta l'area allargata;
- la faglia di Longhere o della Valcalda: grossomodo si snoda al piede e parallelamente alla flessura Bassano-Valdobbiadene, sul fondo della Vallata; si tratta di un fascio di faglie inverse con direzione WSW-ENE, rigetti complessivi dell'ordine di 4 km e lunghezza di circa 25 km;

- poco oltre il limite settentrionale dell'anticlinale del Montello, all'incirca tra Sernaglia della Battaglia e Fontigo, abbiamo la faglia del Quartier del Piave; è costituita in realtà da uno stretto fascio di faglie inverse, attive, con direzione WSW-ENE, obliterate dai sedimenti di copertura che frammenta il fianco meridionale della sinclinale del Soligo;

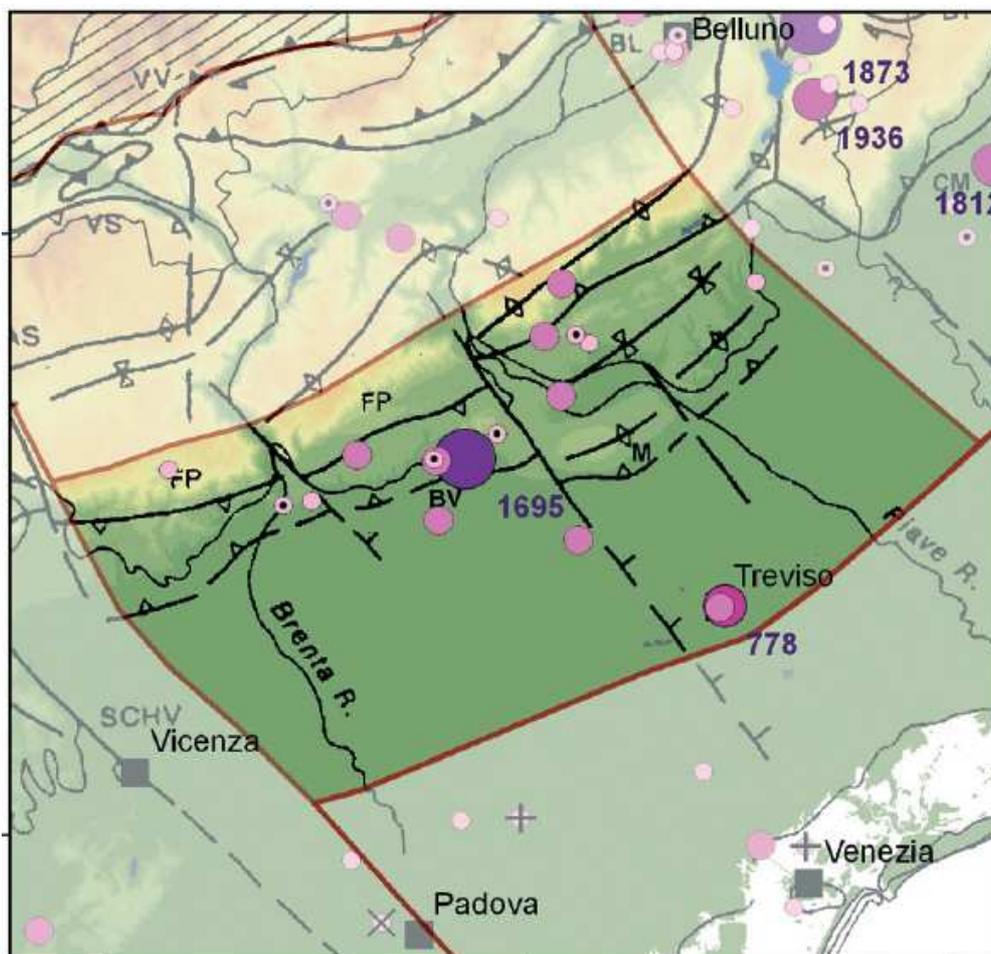
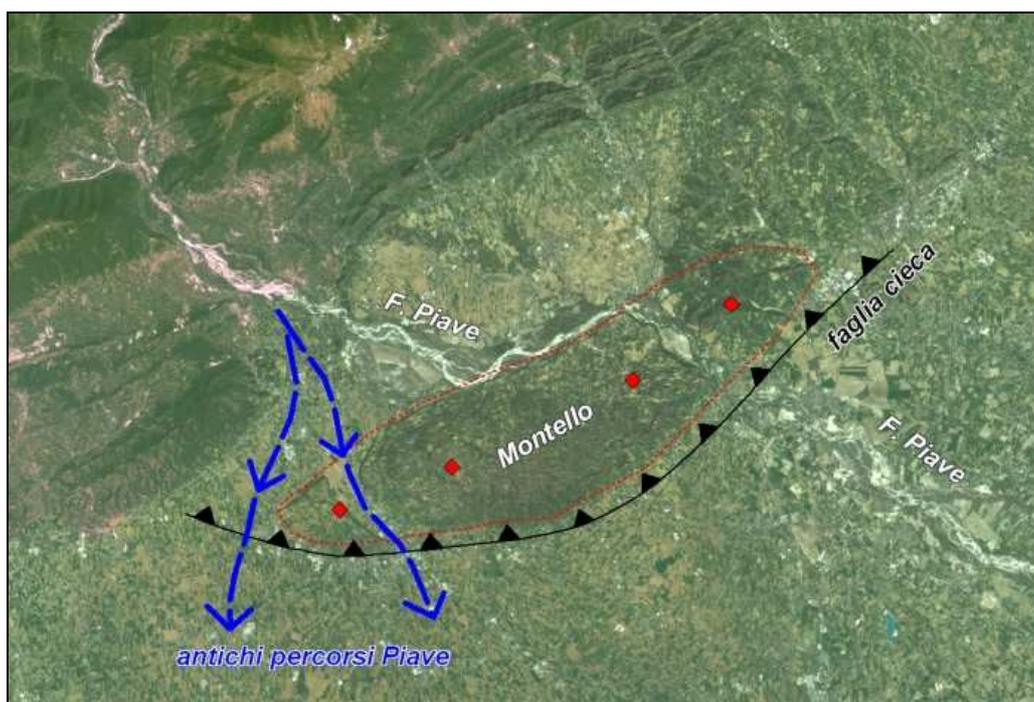


Fig. 8: distretti sismici del Veneto: Distretto Pedemontana Sud. A N dei sovrascorrimenti di Bassano-Cornuda (BV) e Montello-Conegliano (M) si possono notare le aree ripiegate (da Sugan e Peruzza, 2011)

- Anticlinale del Montello: costituisce il rilievo che chiude a S la pianura del Quartier del Piave, ed è formato da strati conglomeratici piegati ad anticlinale con fianchi molto aperti che tende a chiudersi lateralmente (brachianticlinale);
- Faglia del Montello: la piega del Montello è il riflesso superficiale di questa deformazione tuttora attiva prodotta dal suo movimento inverso ad alto angolo immergente a NNW che rappresenta, con la gemella faglia di Sacile, la faglia più esterna della catena Subalpina orientale;
- Faglia di Sacile: praticamente parallela alla precedente mostra le medesime dinamiche. Da considerare però che alcuni autori ne mettono in dubbio l'esistenza.



- Al piede dei colli Asolani abbiamo la faglia Bassano-Cornuda; è il riflesso superficiale della deformazione tuttora attiva prodotta dal suo movimento inverso ad alto angolo immergente a NNW in analogia con la precedente faglia del Montello;
- la linea di Montebelluna: è un lineamento che si trova ad W del rilievo del Montello; si tratta di un insieme di faglie con direzione NW-SE sia trascorrenti che con importante movimento verticale;
- Faglia di Nervesa: è un lineamento che si trova ad Est del rilievo del Montello; si tratta di un insieme di faglie con direzione NW-SE sia trascorrenti che con importante movimento verticale;
- Faglia di Pedeguarda: si insinua nel medio corso del fiume Soligo con direzione circa NW-SE riconoscibile fino in prossimità del borgo di Collalto.

In grande, il movimento in atto è caratterizzato (vedi fig. 5) dall'accavallamento del fronte sudalpino sull'avampaese padano-adriatico, in pratica da un forte movimento di compressione tra quanto a S dei primi rilievi e l'area che li comprende.

In particolare, il plateau del Montello è un evidente caso di sollevamento tettonico, sospeso circa 150 m sopra la pianura Veneta. Il substrato è costituito dai conglomerati del Miocene superiore (conglomerati del Montello) oltre a conglomerati e sabbie ascrivibili al Tardo Pliocene- Inizio Pleistocene, che sono stati interessati da un'intesa erosione carsica, come si evince dall'abbondanza di doline.

Lungo il margine di SW (dove si trova la località di Biadene), si nota la presenza di una valle abbandonata, appartenente al corso del paleo-Piave, che attualmente scorre a nord del rilievo

collinare. Secondo Benedetti et al. (2000), l'abbandono della valle di Biadene si realizzò tra 14.000 e 8.000 anni fa, alla fine dell'ultimo massimo glaciale (LGM), quando il riscaldamento climatico provocò la rapida fusione dei ghiacci e un imponente trasporto solido da parte del Piave (aggradazione), in grado di formare uno sbarramento al deflusso delle acque. Per analogia, anche i terrazzi più antichi secondo questi autori sarebbero dovuti ad aggradazione per riscaldamento climatico corrispondente a periodi tardoglaciali o interstadiali, correlabili a oscillazioni eustatiche. Per quanto riguarda il sollevamento del Montello-Conegliano thrust, Benedetti et al. (2000), suggeriscono un tasso di innalzamento lungo la faglia pari ad 1 mm/anno, sulla base dell'indagine geomorfologia dei terrazzi fluviali deformati, con effetto la crescita verticale e laterale dell'anticlinale per almeno 300.000 anni, che avrebbe progressivamente spostato verso ovest il corso del Piave, prima della sua brusca deviazione verso ENE. Il dato va preso con cautela in quanto questo valore dipende oltre che dal movimento vero e proprio lungo la struttura (slip rate), anche dall'iniziale quota di deposizione dei sedimenti del Quaternario antico rispetto al piede della faglia. Eventuali episodi di ingressione marina possono aver portato in conto materiali esterni durante le fasi di stasi della spinta verticale del thrust, falsandone lo spessore attribuibile al suo solo movimento. Secondo uno studio pubblicato dal Geophysical Journal International (2005), basato sui profili sismici e sullo spessore dei depositi quaternari, la dislocazione minima imputabile alla sola struttura (slip rate), è ipotizzabile essere attorno ai 0,32 - 0,4 mm/anno. Tale valore è in linea con i riscontri geodetici delle misure effettuate all'interno della galleria-canale ENEL Castelletto-Nervesa.

Il sollevamento in corso del Montello è supportato anche dal riconoscimento di scarpate parallele alle strutture tettoniche (ENE-OSO) nei megaconoidi di Montebelluna (tardo-pleistocenico, formato dal paleo-Piave) e di Crocetta del Montello (tardopleistocenico-olocenico, formato dal Piave attuale) che circondano verso Sud il colle con apici situati rispettivamente a Ovest e ad Est (MOZZI, 2005).

Le caratteristiche cinematiche sommarie della struttura sono riportate in tab. 1 sotto:

| Lunghezza (km) | Area della frattura (km <sup>2</sup> ) | Profondità massima (km) | Movimento verticale minimo (mm/anno) | Magnitudo |
|----------------|----------------------------------------|-------------------------|--------------------------------------|-----------|
| 30-35          | 480                                    | 6,2                     | 0,32-0,4                             | 6,72      |

Tab. 3: principali caratteristiche cinematiche della sorgente sismogenetica Montello-Conegliano (da Galadini et al., 2005)

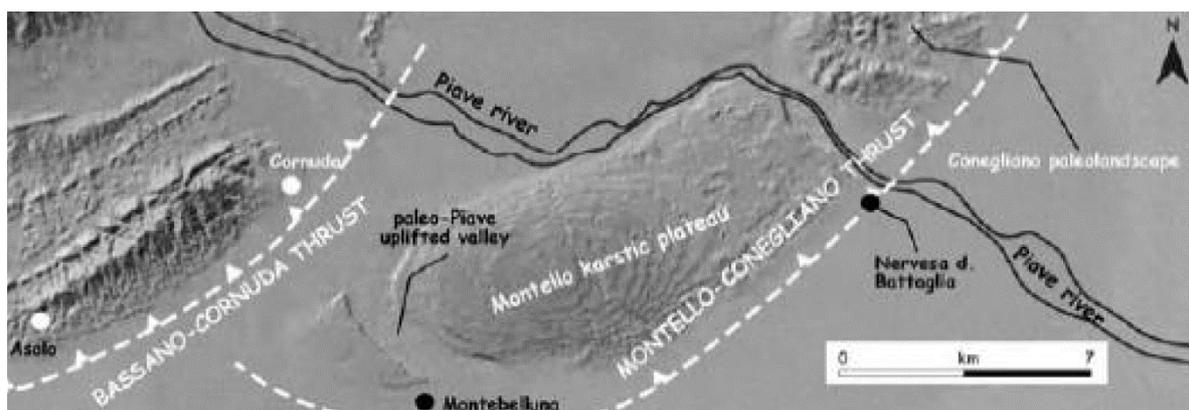


Fig. 9: schema geomorfologico dell'area Asolo-Conegliano. A NW dei sovrascorrimenti di Bassano-Cornuda e Montello-Conegliano si possono notare le aree ripiegate. L'innalzamento del Montello ha condizionato il drenaggio del f. Piave (da Galadini et al., 2005)

La sorgente sismogenetica del Montello –Conegliano thrust non viene messa in relazione con alcun terremoto storico. Questo porta a definire un gap sismico minimo dall'ultima attivazione della sorgente dell'ordine degli 800 anni. Da un punto di vista pratico l'identificazione del thrust come "silente" permette di inserirlo tra le aree caratterizzate da un alto livello di rischio sismico.

L'insieme delle azioni orogenetiche, responsabili del sollevamento prima della zona montana e poi di quella collinare, ha prodotto un complesso di fratture e di faglie, che si possono ricondurre ai seguenti due sistemi:

- Sistema "valsuganese" a direzione ENE – WSW: rappresentato nella nostra zona dalla "faglia del Montello".
- Sistema "scledense" a direzione NW – SE con strutture riferibili solo a tettonica di tipo disgiuntivo. In zona appartengono a questo sistema le faglie che si insinuano nei fondovalle principali (val la pena di ricordare le faglie di Montebelluna e di Nervesa). Varie faglie aventi medesima direzione interessano i conglomerati che formano la parte Sud-Est del Comune; esse sono evidenziate da allineamenti di doline e da scarpate. Per quanto riguarda fratture e fessurazioni l'andamento è in genere subverticale ed interessa sia i banchi di conglomerato, sia le intercalazioni arenaceo-marnose. I vari sistemi di frattura in parte possono essere evidenziati in corrispondenza degli affioramenti e delle cavità sia superficiali che sotterranee, in parte risultano dall'andamento delle doline e delle altre forme carsiche superficiali.

Risultato dei movimenti sopra descritti in atto è la sismicità del Veneto Orientale e dell'area in esame in particolare.

#### 2.5.4 - Progetto OMBRA: deformazione su faglie sismogeniche nella zona del Montello

A partire dal 1977 (anno in cui OGS ha installato il primo nucleo di stazioni destinate a costituire una rete regionale), vaste porzioni del territorio regionale veneto hanno usufruito di un monitoraggio sismico talvolta però disomogeneo in copertura e discontinuo nel tempo. Dal 2003 la Rete del Veneto beneficia dell'installazione di nuove stazioni, in aree precedentemente poco coperte dal monitoraggio; dal 2008 infine OGS elabora nuovamente in modo congiunto e omogeneo anche i dati di alcune stazioni sismometriche appartenenti ad altre reti (in primis le stazioni della Provincia Autonoma di Trento, alcune stazioni dell'INGV, e stazioni internazionali).

In particolare l'area del Montello, dal 2008, usufruisce di una nuova rete di monitoraggio delle faglie attive, nell'ambito di un progetto denominato OMBRA, che ha il compito di investigare la controversa questione geofisica che scaturisce circa la tettonica attiva ed il potenziale sismogenetico dell'area del Montello. Fino ad ora sono state installate 12 stazioni sismometriche, un paio delle quali attrezzate con stazione GPS. Dal punto di vista sismologico i dati saranno utili per valutare il rischio sismico di un'area dove recentemente è stata osservata soltanto una diffusa micro-sismicità mentre in passato le faglie attive hanno generato rilevanti eventi. La configurazione delle stazioni GPS semipermanenti del progetto OMBRA si pone in definitiva l'obiettivo di riuscire a campionare il segnale tettonico legato all'accumulo di deformazione su faglie sismogeniche nella zona del Montello.

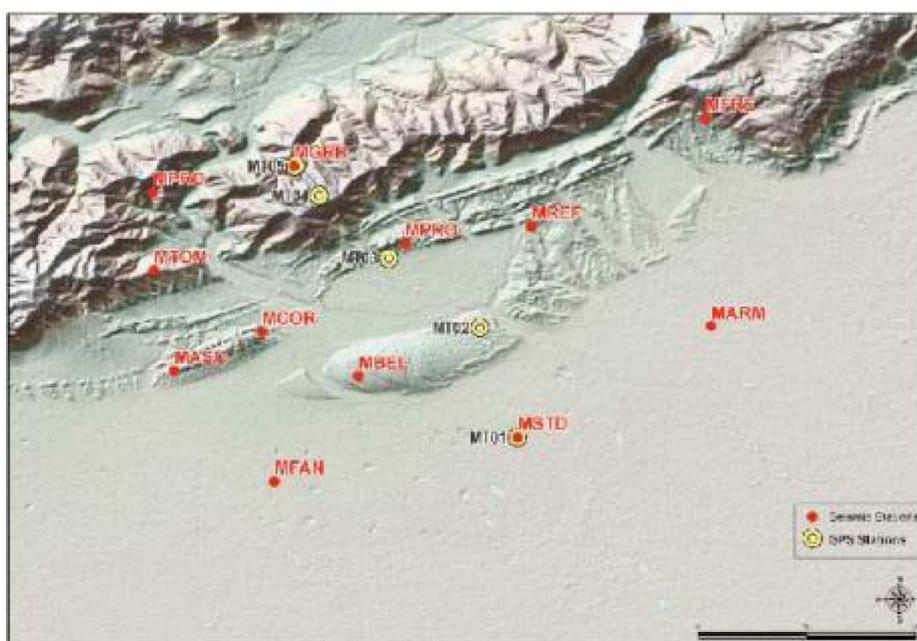


Fig. 10: mappa della rete geodetica e sismologica del progetto OMBRA operante nell'area del Montello.

In giallo le stazioni geodetiche semi-permanenti; in rosso quelle temporanee.

### 3 ASSETTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO DELL'AREA

#### 3.1 Inquadramento geologico - geomorfologico

Come si può dedurre dalla cartografia C.T.R. e dalle carte tematiche del PAT, il territorio in esame può essere distinto in quattro differenti unità morfologiche lungo un ideale asse orientato circa NW-SE:

- A N la fascia del greto del f. Piave (zona non oggetto di studio di questa Microzonazione Sismica): tale fascia borda con larghezza variabile il colle del Montello nella zona Est e la parte pianeggiante del rimanente territorio comunale a Nord; le quote, variabili, si attestano a circa 120-130 m s.l.m..
- A SE del Comune la porzione orientale del Colle del Montello. Questa unità rappresenta quasi metà del territorio comunale, è la parte più nord-occidentale del colle del Montello che in questo tratto assume la morfologia di un ampio versante degradante verso NW e orlata ai bordi da scarpate inclinate verso N e verso W. Le quote limite sommitali superano di poco i 320 m s.l.m.. In tutta la superficie sono ampiamente diffusi i fenomeni carsici in particolare doline, valli secche ed altre forme carsiche. Tali caratteri sono legati all'azione di dissoluzione ed erosione meccanica operata dalle acque meteoriche sul conglomerato a cemento calcareo: il carsismo ha profondamente condizionato la situazione idrogeologica del colle in cui è assente l'idrografia superficiale attiva ed è invece prevalente una circolazione sotterranea in fratture di varia gerarchia.
- La fascia di raccordo con la pianura. È una stretta fascia di depositi terrazzati posta al piede del Montello che fa da raccordo con l'antistante pianura. È formata superficialmente da "terre rosse" di origine colluviale accumulate ad opera delle acque correnti e dei processi di degradazione dei conglomerati. Le pendenze sono generalmente moderate ma si riconoscono alcune profonde incisioni legate ai principali assi di deflusso temporaneo che scendono dal colle. In questa fascia il carsismo è limitato o mascherato dalla potente copertura sciolta.
- A W l'alta pianura trevigiana. Il Comune si pone nella parte N, zona centrale, della grande conoide formata in età glaciale e postglaciale dal deposito delle alluvioni grossolane apportate dal fiume Piave: il megafan del Piave. L'enorme dispersione di tali materiali ha determinato una superficie che evidenzia limitata inclinazione verso S, SSW e SSE e con pendenze della superficie topografica modeste, arrivando al massimo al 2%. La pianura veneta si è formata in tempi geologicamente recenti dall'accumulo di materiali di origine glaciale e fluvioglaciale da parte delle acque correnti. I vari fiumi veneti, in uscita dalle valli montane, hanno depositato i detriti trasportati creando grandi conoidi, dette megafan, interdigitate le une alle altre. I materiali depositi sono generalmente grossolani e costituiti prevalentemente da ghiaie e ciottoli più o meno

sabbiosi; solo localmente ed in superficie compaiono limitati spessori di termini più fini. In particolare la storia di formazione recente di questa parte di territorio è legata a quanto verificatosi nel corso dell'ultima glaciazione e nei tempi successivi, il tutto può essere così schematizzato:

- 1) Nel corso dell'espansione e della fase di massima intensità dell'ultima glaciazione (anaglaciale würmiano, circa 75.000-15.000 anni fa) una spessa coltre di detriti grossolani venne distribuita a ventaglio sulla pianura, formando una grande conoide con vertice presso la soglia di Maser-Caerano;
- 2) Questa costruzione alluvionale venne abbandonata in tempi tardoglaciali. Su di essa successivamente hanno divagato locali correnti di piena del Piave prima, di altri corsi minori provenienti dalla collina poi, incidendo e ridepositando sulle vecchie alluvioni ed apportando una sottile pellicola di materiali a granulometria più fine. Tale pellicola di materiali coesivi diventa progressivamente più potente procedendo verso il piede del Montello.

Verso SE si eleva poi la collina del Montello, formata da rocce conglomeratiche, ben cementate, con ciottoli in prevalenza calcarei ma in realtà rappresentativi di tutte le litologie presenti nell'arco alpino orientale. Accompagnano il conglomerato altre litologie, principalmente arenarie e siltiti. L'insieme è attribuibile al Pontico o Messiniano (Miocene superiore). L'origine di tali rocce è fluviale e deltizia.

In gran parte del Montello i conglomerati del substrato sono coperti da una abbondante coltre di un terreno rossastro, argilloso, costituito, in prima approssimazione da "limo e sabbia con argilla, debolmente ghiaioso o ghiaioso". E' quella che genericamente viene chiamata "terra rossa" e che, in realtà, ha composizione variabile e diversa origine. Essa deriva in parte dall'alterazione meteorica, chimica e biochimica in posto del conglomerato, mentre in parte sembra avere origine morenica e fluvioglaciale.

Dal punto di vista temporale la formazione del Montello inizia nel Pliocene con una intensa attività tettonica che si sposta progressivamente da E verso W.

Strutturalmente il Montello è compreso in una serie di strutture coeve e collegate che interessano tutta l'area pedemontana del Veneto Orientale. In particolare si tratta di una brachianticlinale, con asse circa corrispondente a quello del rilievo e quindi WSW-ENE. Secondo alcuni autori la presenza di ondulazioni assiali fa ritenere più adatto il termine di "anticlinorio". Il colle è poi interessato da grandi elementi di tettonica disgiuntiva e plicativa già descritti in precedenza.

## **4 DATI GEOTECNICI E GEOFISICI**

Per la redazione della seguente relazione ci si è avvalsi dei dati provenienti da indagini e rilievi geologico-geotecnici effettuati nel corso di numerosi anni, sia personalmente che gentilmente messi a disposizione da colleghi e dall'Amministrazione Comunale.

Infine sono state effettuate, appositamente per lo studio in corso, una serie di stazioni di misura con metodologia MASW, ReMi e HVSR; esse presentano una sigla identificativa costituita dalla metodologia di indagine utilizzata (in questo caso CDM SMC o CDM HVSR), dal nome del comune "Crocetta del Montello" seguito dal numero progressivo: es. CDM SMC1, CDM SMC2 CDM HVSR2, ecc.. I dati relativi a queste nuove indagini sono reperibili in allegato (cartella "Indagini MS Crocetta del Montello").

## **5 MODELLO DEL SOTTOSUOLO**

### **5.1 Individuazione delle microzone**

La scelta delle varie microzone dove costruire un modello di velocità di propagazione delle onde elastiche, in modalità trasversale, nei primi 30 metri di profondità, è stata fatta in modo da investigare i diversi ambiti morfologici e litologici. Questo ha permesso di ottimizzare l'ubicazione della rete di punti di misura in funzione della genesi deposizionale dei materiali integrando, correlando e confrontando i dati stratigrafico-sedimentologici con quelli elastico-acustici provenienti dalle misurazioni di campagna.

In pratica le stazioni di misura sono state ubicate su siti significativi dal punto di vista urbanistico oggetto di azioni nell'attuale PI, propagando poi i risultati attraverso un processo di validazione pesata e di generalizzazione ad intere unità deposizionali considerate sufficientemente omogenee sulla base di precedenti conoscenze geologiche-litologiche in possesso di questo Studio.

Questo tipo di approccio, utilizzato anche dagli autori della "Cartografia sismica della pianura della Provincia di Treviso", presenta il grande vantaggio di poter investigare il territorio in modo mirato, evitando quindi di produrre carte "cieche", dove l'interpolazione dei dati è governata da una generica griglia di campionamento che rischia di sottovalutare gli ambiti di maggior interesse.

In particolare le cartografie del PAT, base di partenza di questo studio, già suddividono il territorio in zone omogenee in prospettiva sismica ma il criterio utilizzato è stato prevalentemente geomorfologico e litologico, in quanto non vi erano dati geofisici specifici riferibili ai primi 30 m del sottosuolo. Sulla base delle indagini geofisiche eseguite, considerando le particolarità

geomorfologiche ed i limiti geologici come una sorta di guida per l'interpretazione geofisica, ed accorpando le unità che risultavano parametrizzate in maniera simile, si sono così ricavate delle unità omogenee in prospettiva sismica coerenti con quanto riportato nella carta degli Elementi Geologici in Prospettiva Sismica del PAT.

Tale individuazione conferma le delimitazioni su base geologica e geomorfologica, rappresentate nello studio relativo al PAT (carta Geolitologica e carta delle Fragilità) che sono state così inserite nella **Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica** (livello 1) oggetto di questo studio.

Le 3 zone omogenee in prospettiva sismica individuate, sono le seguenti:

- **Zona 1 (B):** Viale Antonini, Via Sant'Apollonia, Via Armando Diaz, Via Sant'Andrea, Via Don Antonio Carlo Massara e Via Giovanni Fantin, Viale Rimembranza, Via Antighe, Via del Cristo, Via Canapificio, Località Borgo Furo, Via Lodovico Boschieri, Località Rivette (*materiali alluvionali e/o fluvioglaciali correlabili a depositi di terreni a grana grossa da mediamente a molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti ricoperti da una sottile coltre sciolta prevalentemente ghiaioso-argillosa residuale, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità*); CDM SMC1, CDM SMC2, CDM SMC3, CDM SMC4, CDM SMC5, CDM SMC8, CDM HVSR9, CDM HVSR10, CDM HVSR11, CDM HVSR12, CDM HVSR13, CDM HVSR14, CDM HVSR16.
- **Zona 2 (B):** Via Francesco Baracca, Via Gabriele D'Annunzio (Loc. Santa Mama) (*interdigitazioni di depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati con terreni a grana fina mediamente consistenti,*); CDM SMC6, CDM HVSR15.
- **Zona 3 (C):** Via Ivo L.Lollini (*sedimenti sciolti a tessitura limoso-argilloso-sabbiosa posti su rocce tenere prevalenti o rocce rigide molto alterate*); CDM SMC 7.

Nel complesso le nuove indagini sismiche hanno interessato 8 siti, indagati con tecniche MASW – ReMi, sismica a rifrazione e HVSR (denominati CDM-SMC), ed ulteriori 8 siti indagati solo con tecnica passiva HVSR (denominati CDM HVSR), così localizzabili sulla carta delle Indagini (su base CTR):

CDM\_SMC 1: Viale Antonini;

CDM\_SMC 2: Via Sant'Apollonia;

CDM\_SMC 3: Via Armando Diaz;

CDM\_SMC 4: Via Sant'Andrea;

CDM\_SMC 5: Via Don Antonio Carlo Massara;

CDM\_SMC 6: Via Francesco Baracca;

CDM\_SMC 7: Via Ivo L.Lollini;

CDM\_SMC 8: Via Giovanni Fantin;

CDM\_HVSR 9: Viale Rimembranza;

CDM\_HVSR 10: Via Antighe;

CDM\_HVSR 11: Via del Cristo;

CDM\_HVSR 12: Via Canapificio;

CDM\_HVSR 13: Località Borgo Furo;

CDM\_HVSR 14: Via Lodovico Boschieri;

CDM\_HVSR 15: Via Gabriele D'Annunzio (Loc. Santa Mama);

CDM\_HVSR 16: Località Rivette.

Per ciascun sito di indagine, in allegato, viene riprodotto uno stralcio di fotoaerea della zona di indagine allargata dove vengono riportati la posizione dello stendimento sismico, la sua numerazione progressiva e le coordinate geografiche riferite agli ellissoidi ED50 e WGS84, sistemi di riferimento per la carta di pericolosità sismica dell'INGV; inoltre per ciascuna area omogenea viene allegata una scheda riassuntiva con indicato:

- l'ubicazione nel reticolo di riferimento sismico individuato dalla O.P.C.M. 28 aprile 2006, n. 3519;
- eventuali elementi di amplificazione topografica;
- i profili della Vs30 ricavati dalle acquisizioni di campagna;
- riquadro riassuntivo delle categorie in accordo col D.M. 14.01.2008.

La successione stratigrafica rappresentativa inserita nel modello di ciascuna scheda è stata chiaramente molto schematizzata, inserendo le seguenti semplificazioni:

- coltre superficiale: si riferisce allo strato di terreno di superficie, in media più "soffice", indipendentemente dalla granulometria locale;
- ghiaia: col termine ghiaia si intendono tutti i materiali granulari, con prevalenza di scheletro grossolano, con percentuale di matrice variabile;
- argille: il termine è esteso a tutti i materiali a comportamento prevalentemente coesivo.
- substrato: si intende la parte alterata, fratturata ed incarsita del conglomerato del Montello e le intercalazioni di argille sovra consolidate comprese nella medesima compagine geologica.

## 5.2 Metodologia di studio

Come specificato nelle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC08 - DM 14-01-2008), la classificazione sismica del suolo risulta fondamentale per definire l'azione sismica di progetto delle opere geotecniche. Essa si effettua in base ai valori della velocità equivalente  $V_{s30}$  delle propagazione delle onde di taglio entro i primi 30 m di profondità. Quindi tale parametro non prevede una generica stima delle  $V_s$  dei primi 30 metri di sottosuolo, ma impone la determinazione della media dei tempi di percorrenza degli  $i$ -esimi strati fisici presenti nei primi 30 metri di sottosuolo, tramite la formula:

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_i^n \left( \frac{h_i}{V_{si}} \right)}$$

dove  $h_i$  e  $V_{si}$  sono spessore in metri e velocità delle onde di taglio dell' $i$ -esimo degli  $N$  strati compresi nei primi 30 metri di sottosuolo.

Le NTC08 (§ 3.2.2), “raccomandano fortemente” di eseguire direttamente le misure di  $V_s$ , ricorrendo ad altre tipologie di classificazione sismica del suolo (misura delle  $N_{SPT,30}$  o della resistenza non drenata  $C_{u,30}$ ), solo se impossibilitati dalla misura geofisica diretta.

In funzione del parametro  $V_{s30}$ , la normativa individua 5 classi di suolo (tabella 4):

| Categoria | Descrizione                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>A</b>  | <i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m.                                                                                                                                                                                     |
| <b>B</b>  | <i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $N_{SPT,30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).      |
| <b>C</b>  | <i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < N_{SPT,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{u,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina). |
| <b>D</b>  | <i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 180 m/s (ovvero $N_{SPT,30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina).                |
| <b>E</b>  | <i>Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m</i> , posti sul substrato di riferimento (con $V_s > 800$ m/s).                                                                                                                                                                                                                                                                      |

Tab. 4 – Categorie di sottosuolo

La classificazione sismica del tipo di suolo non può sempre essere eseguita conoscendo il solo valore della velocità  $V_{s,30}$ , per cui la normativa individua inoltre due categorie di suoli speciali (vedi Tab. 5): per queste è necessario predisporre specifiche analisi per la definizione delle azioni sismiche.

| Categoria | Descrizione                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>S1</b> | Depositi di terreni caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 100 m/s (ovvero $10 < c_{u,30} < 20$ kPa), che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche. |
| <b>S2</b> | Depositi di terreni suscettibili di liquefazione, di argille sensitive o qualsiasi altra categoria di sottosuolo non classificabile nei tipi precedenti.                                                                                                                          |

Tab. 5 – Categorie aggiuntive di sottosuolo

Sulla base di quanto detto, e come specificato anche nell'All. A della DGR 3308 del 04/11/2008 *“All'interno dei P.I., per il territorio urbanizzato, urbanizzabile (suscettibile di trasformazioni urbanistiche per l'espansione degli abitati) e relativo ad ambiti riguardanti i sistemi, le reti infrastrutturali e i corridoi per il trasporto energetico di rilevanza strategica a livello statale o provinciale, va effettuata, con riferimento alla carta delle “Zone omogenee in prospettiva sismica” allegata al PAT:*

- *per le aree “stabili”:* la caratterizzazione del terreno tramite la misura delle  $V_{s,30}$  (velocità di propagazione delle onde di taglio entro i primi 30 metri di profondità come definita dalle vigenti norme tecniche sulle costruzioni – D.M. 14.9.05 e D.M. 14.1.08);
- *per le aree “stabili suscettibili di amplificazione sismica”:* uno studio finalizzato alla determinazione della profondità del bedrock sismico in funzione della definizione del periodo proprio di vibrazione del sottosuolo e alla definizione di profili di  $V_s$  30, unitamente alla valutazione degli effetti morfologici;
- *per le aree “suscettibili di instabilità”:* uno studio degli eventuali effetti di cui alla linea precedente e uno specifico studio finalizzato all'individuazione degli ambiti potenzialmente soggetti a instabilità, utilizzando come parametri di riferimento quelli stabiliti dalla vigente normativa tecnica sulle costruzioni.

*Il numero e la tipologia delle misure da effettuarsi, opportunamente integrate, se del caso, da indagini dirette e prove di laboratorio, di cui ai citati studi e caratterizzazioni, vanno commisurati alle caratteristiche geologiche, all'importanza dell'opera, e alle dimensioni dell'area in esame”.*

Il parametro fisico del terreno  $V_s$  è di difficile definizione e richiede specifici metodi geofisici e/o geotecnici. Le prove sismiche in sito si possono distinguere in prove di superficie e prove in foro. Tra le prove di superficie si segnalano le prove sismiche a rifrazione e tomografiche, gli stendimenti geoelettrici (SEV e SEO), le prove SASW e MASW; tra le prove in foro si segnalano le prove Up-hole e Down-Hole, Cross-Hole, Suspension Logging, le prove penetrometriche con cono sismico e le prove con il dilatometro sismico SDMT.

Per il nostro studio, ci siamo indirizzati su metodi di misura delle onde S del sottosuolo con tecniche indirette da superficie che studiano la dispersione delle onde superficiali. Vi sono diverse metodologie di determinazione delle  $V_s$ , tra cui stendimenti sismici passivi e stendimenti sismici attivi. I primi studiano la dispersione delle onde superficiali sfruttando il solo rumore ambientale, senza indurre energizzazioni elastiche artificiali. I secondi invece producono artificialmente delle sollecitazioni elastiche nel terreno e ne misurano gli effetti. Nel presente studio sono state impiegate entrambe le tecniche.

Le tecniche passive sono afflitte dal problema ricadente nel mancato controllo delle fonti di rumore sismico. In presenza di fonti preferenziali di rumore, delle quali non è possibile verificare l'esistenza, le misure di velocità condotte lungo lo stendimento vengono falsate (spesso pesantemente sovrastimate) dalla potenziale errata geometria presunta del percorso dell'onda. In pratica si misura una velocità apparente e non si hanno parametri per ricondurla a velocità reale.

Per questo motivo è preferibile utilizzare entrambi i metodi (attivi e passivi) eseguendo stendimenti attivi, producendo artificialmente la propagazione di onde elastiche da studiare, e registrare il rumore sismico di fondo con tecniche passive ReMi e HVSR per il totale controllo del fenomeno di propagazione studiato.

I metodi di studio della dispersione delle onde superficiali si dividono in metodi basati sullo studio della velocità di fase  $C$  e della velocità di gruppo  $U$ . Tra questi i più noti sono la tecnica SASW (Spectral Analysis of Surface Waves), la MASW Multichannel Analysis of Surface Waves (basato su velocità di fase) e la FTAN Frequency-Time-Analysis (basato velocità di gruppo). Tutti i metodi in pratica si basano sull'elaborazione delle proprietà spettrali delle onde di superficie per la costruzione di un modello verticale di velocità di propagazione delle onde di taglio.

Per le nuove indagini abbiamo utilizzato la tecnica MASW, ReMi e HVSR; il metodo MASW, che in pratica si può definire una SASW multicanale, è classificabile come tecnica di indagine sismica simile alla sismica a rifrazione e alla sismica a riflessione, perché il principio alla base della prova sperimentale in sito è analogo e consiste nel misurare le onde superficiali sul suolo. Rispetto alla

sismica a rifrazione i metodi MASW e ReMi presentano i vantaggi di superare i problemi legati alla presenza di strati soffici compresi tra strati più rigidi o di strati più rigidi compresi tra strati più soffici; o nel caso di sismica a rifrazione con onde P alla presenza della falda superficiale, che nasconde gli strati di terreno con velocità delle onde P inferiore alla velocità delle onde nell'acqua. I metodi MASW e ReMi consentono di individuare il profilo di velocità  $V_s$  anche in presenza di contrasti di rigidità tra gli strati del suolo. La presenza della falda è modellata assegnando un valore del coefficiente di Poisson prossimo a 0,3 in funzione del grado di saturazione.

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  $20^\circ$ . Nella pratica è stato osservato che, se si esegue la prova con lo stendimento dei sensori lungo la direzione di massima pendenza, la presenza di forti acclività comporta una traslazione della curva di dispersione sperimentale. Il problema è mitigato disponendo lo stendimento dei sensori lungo una curva di livello in direzione perpendicolare alla direzione di massima pendenza. Rispetto ad altre tecniche di determinazione del profilo di velocità  $V_s$  come cross-hole, down-hole, up-hole, SCPT, il metodo MASW richiede minori tempi di esecuzione ed ha costi inferiori. Rispetto ai metodi puntuali come il cross-hole offre il vantaggio di fornire informazioni medie sulla porzione di suolo interessata dallo stendimento e quindi di coprire distanze variabili fino a 50 m di lunghezza senza dover ripetere la prova in posizioni diverse. Altro vantaggio offerto dalla prova MASW è l'elevata accessibilità dei luoghi, visto che la prova sperimentale in sito non richiede l'impiego di attrezzature o macchinari di grandi dimensioni.

### 5.3 Breve descrizione del metodo

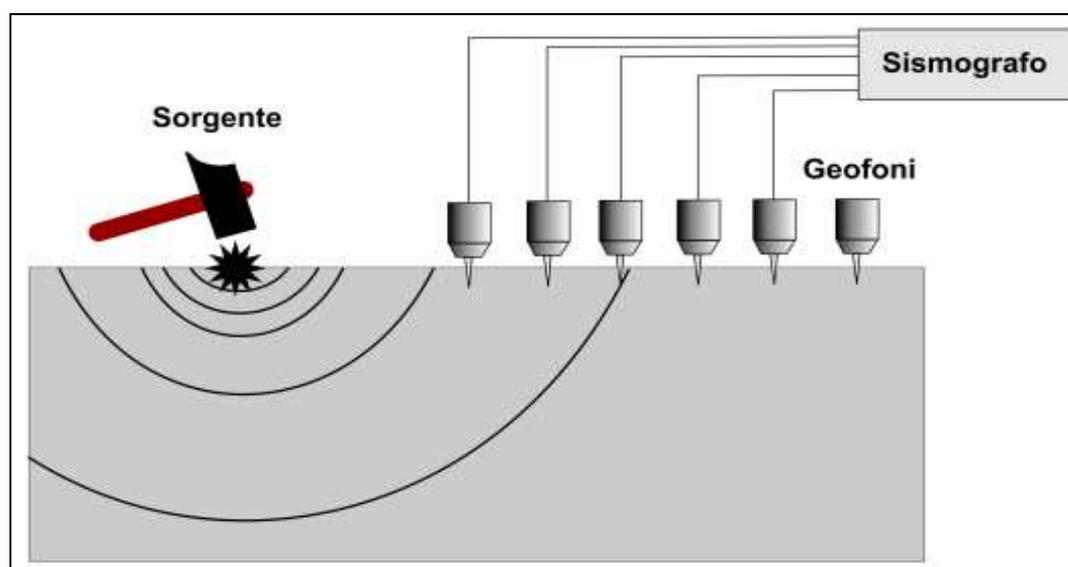
**Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves)** è una tecnica di indagine non invasiva (non è necessario eseguire perforazioni o scavi e ciò limita i costi), che individua il profilo di velocità delle onde di taglio verticali  $V_s$ , basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori (accelerometri o geofoni) 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 stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, 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 superficiali 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.

Il metodo di indagine MASW si distingue in metodo attivo e metodo passivo (Zywicki, D.J. 1999) o in una combinazione di entrambi. Nel metodo attivo le onde superficiali generate in un punto sulla superficie del suolo sono misurate da uno stendimento lineare di sensori. Nel metodo passivo lo stendimento dei sensori può essere sia lineare, sia circolare e si misura il rumore ambientale di fondo esistente. Il metodo attivo generalmente consente di ottenere una velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale apparente nel range di frequenze compreso tra 5Hz e 70Hz, quindi dà informazioni sulla parte più superficiale del suolo, sui primi 30-50 m, in funzione della rigidità del suolo. Il metodo passivo in genere consente di tracciare una velocità di fase apparente sperimentale compresa tra 0 Hz e 10Hz, quindi dà informazioni sugli strati più profondi del suolo, generalmente al di sotto dei 50 m, in funzione della rigidità del suolo.

Nel seguito faremo riferimento al metodo MASW attivo che consente la classificazione sismica dei suoli, perché fornisce il profilo di velocità entro i primi 30 m di profondità. Il metodo passivo è più usato quando si ha interesse ad avere informazioni, comunque meno precise, sugli strati più profondi.

Lo strumento per l'acquisizione dei nostri dati è costituito da un sismografo (in questo caso si tratta di un sismografo Dolang DBS280 a 24 canali), collegato a dei geofoni verticali a frequenza propria di 4.5Hz tramite dei cavi multipolari ed un sistema di energizzazione sismica del terreno tramite piastra e mazza da 5 kg (vedi fig. sotto).



La **tecnica ReMi (Refraction Microtremor)** è un metodo d'indagine geofisica che sfrutta invece le modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare delle onde di Rayleigh, generate però da sorgenti ambientali.

A differenza di quanto avviene nell'indagine eseguita con la tecnica MASW, dove la posizione delle sorgenti è nota ed è allineata allo stendimento, nel caso del ReMi i punti di origine dei microtremori sono spesso non identificabili. Quindi la registrazione viene protratta per tempi più lunghi. Essendo la potenza associata al segnale utile comparabile con quella del rumore di fondo è necessario rilevare un numero di tremori molto elevato, questo sarà ottenibile semplicemente andando a allungare i tempi di registrazione del segnale. A differenza dei pochi secondi necessari per acquisizioni MASW sono qui necessari da alcuni a molti minuti di acquisizione (in genere 10 - 20 minuti sono sufficienti).

I principi teorici e gli aspetti di acquisizione ed elaborazione dei dati sono sostanzialmente gli stessi della tecnica MASW con la differenza che con ReMi si ha una maggior definizione degli strati profondi.

Infine la **Tecnica di misure ed interpretazione HVSR (tramite TROMINO®)** è una prospezione sismica che si basa sull'acquisizione e sull'analisi del Rumore Sismico Ambientale (Seismic Noise) ovvero la continua vibrazione del suolo dovuta sia a cause antropiche che naturali. Questa tipologia di tecniche (definite metodi sismici passivi), dunque, non ha bisogno di alcuna energizzazione esterna poiché utilizza come sorgente il traffico veicolare, la produzione industriale, il vento, la pioggia e tutto ciò che è in grado di produrre una minima vibrazione sulla superficie del suolo.

In particolar modo con la tecnica a “ Stazione Singola” viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero “Horizontal to Vertical Spectral Ratios) (Nakamura, Y. [1989]). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno e individuare la frequenza fondamentale (  $f$  ) di questa vibrazione. Sapendo che in generale esiste una relazione semplice fra  $f$ , lo spessore della parte più soffice del terreno (ovvero la parte di materiali sovrastante il bed-rock) e la velocità media ( $V_s$ ) delle onde simiche nel sottosuolo, attraverso le misure HVSR è possibile risalire allo spessore di questo strato. Si possono inoltre effettuare delle considerazioni di tipo “qualitativo” molto utili in merito a possibili interferenze tra le frequenze risonanti del suolo e degli edifici sovrastanti.

Per la valutazione del periodo proprio di risonanza del sottosuolo è stata utilizzata la tecnica a stazione singola Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Kanai,1957; Igarashi 1970; Nakamura 1989) che permette di estrarre informazioni relative alla frequenza di vibrazione del suolo a partire dagli

spettri di rumore sismico registrati in sito. La tecnica prevede di calcolare il rapporto, in funzione della frequenza, tra gli spettri di risposta della componente orizzontale e verticale del moto dovuto ai microtremori ambientali. La misura di rumore sismico della durata di 26 minuti per ogni punto di misura è stata eseguita con una frequenza di campionamento a 128 Hz.

## 6 INTERPRETAZIONI ED INCERTEZZE

Gli ambiti preferenziali di indagine, ricavati dalla “Carta della Trasformabilità” allegata al P.A.T. (Tav. 4 alla scala 1:10000) e dalle proposte di variante introdotte dal PI in corso di adozione, sono quelli a sviluppo insediativo, sia esso a destinazione residenziale, produttiva, dei servizi o infrastrutturale, come espressamente indicato nell’All. A della DGR 3308 del 04/11/2008: questi ambiti si posizionano prevalentemente nella fascia sub-pianeggiante centrale del territorio comunale e negli ambiti urbanizzati del Montello. Per questo motivo nell’indagine non compaiono zone comprese nell’ambito non urbanizzato, che occupa le porzioni più accidentate del Montello e quelle prospicienti il letto del f. Piave.

Di seguito (Tab.6), vengono riassunte le caratteristiche principali dei parametri di acquisizione utilizzate per tutti i siti di indagine:

|             |                             |                             |                    |
|-------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------|
|             | Lunghezza stesa sismica (m) | Distanza intergeofonica (m) | Recording Time (s) |
| <b>MASW</b> | <b>46</b>                   | <b>2</b>                    | <b>0.524</b>       |
|             |                             | Frequenza (Hz)              | Recording Time (m) |
| <b>HVSR</b> |                             | <b>128</b>                  | <b>26</b>          |

Tab. 6: parametri adottati nelle acquisizioni sismiche

Ulteriori dettagli riguardanti i parametri dell’acquisizione vengono riportati in allegato assieme al relativo rapporto di elaborazione.

I dati di campagna sono stati elaborati con il programma **GeoMASW**, **GeoReMi** e **SismaCon (ProgramGeo Castiglione delle Stiviere - MN)**, un software per l’interpretazione e l’archiviazione di prove MASW, ReMi e sismica a rifrazione (Multichannel Analysis of Surface Waves). Per i dati HVSR è stato usato l’apposito software **Grilla** (Micromed).

I metodi di elaborazione dei dati di campagna MASW e ReMi consistono in tre fasi: (1) la prima fase prevede la generazione dello spettro f-k (spettro frequenza-numero d’onda) e l’individuazione delle frequenze minima e massima utili al calcolo della velocità di fase (o curva di dispersione)

apparente sperimentale, (2) la seconda fase consiste nell'interpretazione attraverso un algoritmo di inversione che consente di generare una curva di dispersione teorica, (3) la terza ed ultima fase consiste nell'individuazione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali  $V_s$ .

È evidente che in questo tipo di approccio non c'è univocità del risultato in quanto alla formazione del parametro fondamentale contribuiscono due variabili: lo spessore dello strato e la velocità, e lo stesso valore parametrico può essere ricavato con combinazioni diverse delle due variabili. In genere l'ambiguità viene risolta con l'ausilio di vincoli che consentano di "bloccare" una delle due variabili (disponibilità di dati stratigrafici o di altre misure geofisiche, etc.). Nel presente studio il problema dell'equivalenza viene superato in quanto la determinazione della  $V_s$  (come richiesto dalla normativa sismica nazionale) è stata fatta su uno spessore medio di 30 m di profondità, di cui si ha una sufficiente conoscenza stratigrafica, senza la necessità di dover risolvere velocità alla scala del singolo strato, se non durante la fase di elaborazione. Il risultato è dato quindi dalla sommatoria dei contributi dei singoli strati secondo la formula:

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_i^n \left( \frac{h_i}{V_{si}} \right)}$$

dove  $h_i$  e  $V_{si}$  sono spessore in metri e velocità delle onde di taglio dell' $i$ -esimo degli  $N$  strati compresi nei primi 30 metri di sottosuolo.

Dopo aver determinato il profilo di velocità delle onde di taglio verticali  $V_s$  è possibile procedere al calcolo della velocità equivalente nei primi 30 m di profondità  $V_{s30}$  e quindi individuare la categoria sismica del suolo. Si ricordi quanto già è stato sottolineato in precedenza riguardo alla necessità di avere a disposizione altre informazioni complementari sulla natura e sul comportamento geotecnico del suolo.

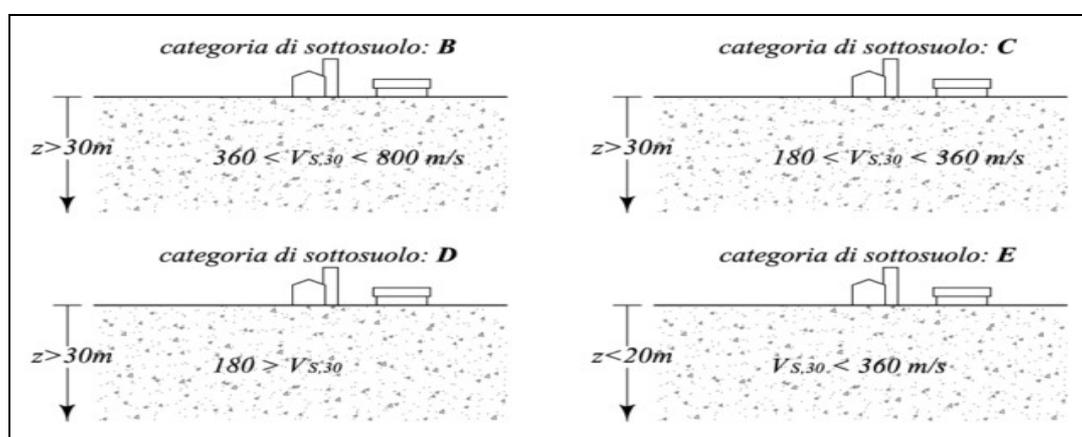
Gli aspetti più critici del metodo MASW utilizzato riguardano la scelta della curva di dispersione sperimentale e la determinazione del profilo di rigidezza (o di velocità delle onde di taglio  $V_s$ ) finale che generi una curva di dispersione apparente numerica in accordo ottimale con la curva di dispersione sperimentale.

La determinazione del profilo di rigidezza finale è il risultato di un compromesso tra informazioni a priori sul sito, metodo manuale e procedura automatica. Nei casi normalmente dispersivi, caratterizzati da profili di rigidezza regolari con la profondità dove la procedura automatica si avvicina ad una soluzione valida, è sempre preferibile provare a modificare manualmente il profilo di rigidezza per acquisire conoscenza, esperienza e sensibilità, da utilizzare nei casi inversamente dispersivi dove non sempre la procedura automatica fornisce una soluzione valida.

I principali limiti di tali procedure sono:

- disponibilità di spazi sufficienti per gli stendimenti sismici (particolarmente sensibile nel caso della tecnica ReMi);
- forniscono un profilo monodimensionale di  $V_s$ , non quantificando eventuali variazioni laterali;
- la profondità di penetrazione dipende dalla frequenza più bassa rilevabile nella curva di dispersione. Nella prova MASW, la sorgente generata da una mazza battente ha una scarsa componente in bassa frequenza, e ciò comporta una riduzione della profondità dell'indagine;
- interferenza del segnale con altri tipi di onde sismiche (P ed S) ed acustiche spurie (onda d'aria) prodotte anch'esse dall'energizzazione;
- nella prova ReMi, vi è la necessità di assumere una sorgente del microtremore stocastica stazionaria proveniente da tutte le direzioni (comportando talvolta una sovrastima delle velocità e/o sovrastima dei parametri elastici);
- vicinanza a fonti antropiche di rumore che possono disturbare ed inquinare il dato di ingresso;
- il problema della non-univocità della soluzione del problema inverso (comune a tutti i metodi indiretti) e la conseguente affidabilità dei risultati in assenza di altre conoscenze (geologico-geofisiche) è molto delicato in quanto le onde di Rayleigh sono soggette a scattering e a generazione di modi superiori (che a volte interagiscono in modo complesso), producendo delle curve di dispersione in cui il massimo dell'energia sismica non è sempre e necessariamente nelle onde superficiali e nel modo fondamentale (modi superiori e onde guidate possono dare segnali molto complessi)

Alla luce delle osservazioni fatte, le tecniche MASW e ReMi richiedono comunque l'acquisizione di una certa esperienza da parte di chi esegue ed interpreta la prova, per giungere alla determinazione corretta della categoria sismica del suolo.



Il punto di forza della strategia di indagine applicata è quello di adottare, per ogni sito di sondaggio, quattro diversi metodi geofisici:

- MASW usato per definire i primi 10-15 m;
- ReMi usato per definire la velocità fino ai 30 m di profondità;
- Rifrazione per definire i sismo strati attraverso la velocità delle onde longitudinali  $V_p$ ;
- HVSR sia per la definizione del periodo proprio/frequenza del terreno che per confermare il modello sismo stratigrafico ricavato dalle tre precedenti tecniche.

Pertanto il risultato della  $V_{s30}$  e della sismostratigrafia riportato nelle specifiche schede allegate, deriva dalla sinergia dei quattro metodi che devono risultare tra loro coerenti.

In qualche caso si è riscontrata una lieve divergenza tra i riscontri delle elaborazioni numeriche dei quattro metodi; in questi casi si è data priorità a due o tre di esse rispetto alle altre scegliendo quelle che avevano maggior attendibilità del dato grezzo acquisito oppure più attinenti alle conoscenze geologiche/geotecniche pregresse.

Siamo altresì coscienti del fatto che la metodologia e il software proposti si riferiscono allo stato attuale delle conoscenze e che la ricerca scientifica è in continua evoluzione e non si esclude un superamento della metodologia proposta con l'introduzione di nuove tecniche e/o miglioramenti. Il software proposto consente di separare la parte sperimentale dalla parte interpretativa delle prove MASW e ReMi, lasciando all'utente la possibilità di introdurre la curva di dispersione sperimentale calcolata o fornita dall'utente in maniera diversa da come è svolto dal software. Risulta quindi possibile inserire per le basse frequenze una curva di dispersione sperimentale ottenuta con la tecnica ReMi, basata sul rumore o sui microtremori ambientali.

Per le prove HVSR, al fine di consentire una rapida valutazione della bontà del dato, è stato utilizzato il metodo di controllo della qualità denominato SESAME. Per la completa affidabilità della curva HVSR devono essere positivi i primi tre parametri; in caso contrario la prova risulterà meno affidabile ed è cura dell'operatore scartarla o mantenerla. Nel nostro caso alcune prove sono state completamente scartate e poi riacquisite in campagna mentre altre sono state ugualmente ritenute valide in quanto congruenti con i risultati delle indagini condotte con altre tecniche. Gli altri sei criteri invece si riferiscono ad un chiaro e pulito segnale del picco massimo; in questo caso devono essere soddisfatti almeno cinque dei sei criteri successivi; se così non è, significa che il segnale è sporco e possono esserci altri picchi o nessun picco.

In allegato, per ciascun sito di indagine, viene restituito un report con i dati di ingresso e degli output di elaborazione delle acquisizioni sismiche.

## 7 METODOLOGIE DI ELABORAZIONE E RISULTATI

La programmazione delle indagini e la loro precisa ubicazione è stata guidata dall'osservazione delle indagini pregresse e dai dati geologici a disposizione di questo studio.

La conoscenza di tutta una serie informazioni ha fornito un ottimo supporto sia per la definizione e per la determinazione del modello geologico di sottosuolo che per l'estensione areale dei risultati al fine di definire delle microzone omogenee in prospettiva sismica.

La prima fase di analisi ha mirato a confrontare le cartografie tematiche del P.A.T., redatte con finalità diverse da quelle del presente lavoro, con i nuovi dati ricavati dalle indagini sismiche (MASW, ReMi, Rifrazione e HVSR). La correttezza dei modelli geologici-sismici così definiti ha permesso di suddividere con più dettaglio le specifiche zone sulla base delle diverse velocità delle onde P e S, sui diversi rapporti stratigrafici ed infine sulle differenti caratteristiche geomorfologiche.

La caratterizzazione geofisica dei terreni si è basata quindi sia sulle nuove indagini realizzate ad hoc che sull'osservazione dei dati ricavati dalle indagini pregresse, permettendo una adeguata parametrizzazione dinamica dei terreni attraverso la stima del profilo delle Vs e la definizione di una velocità media delle onde di taglio per ogni formazione presente.

La definizione delle tre zone omogenee in prospettiva sismica, realizzata a seguito di tutte le indagini geologiche, geofisiche e geotecniche, è stata un'attività onerosa sia sotto il profilo tecnico che in termini di tempo, consentendo di pervenire ad un modello di sottosuolo coerente. Tale fase rappresenta il momento più delicato di tutto lo studio di microzonazione, sia perché coinvolge più aspetti, sia perché durante la fase di omogeneizzazione e di creazione del modello devono essere fatte opportune valutazioni tenendo conto del ridotto numero e del differente livello di incertezza attribuito ai diversi parametri desunti dalle differenti indagini.

Le misure di velocità effettuate nel territorio del Comune di Crocetta del Montello, hanno consentito di ottenere una serie di informazioni sul campo di velocità delle onde S nei primi 30 m di profondità e di periodi propri dei terreni indagati (vedi carta di microzonazione sismica), così riassumibili:

| <b>Sito d'indagine</b> | <b>Vs30 e Hz (f<sub>0</sub>)</b> | <b>Categoria di sottosuolo</b> | <b>Categoria topografica</b> |
|------------------------|----------------------------------|--------------------------------|------------------------------|
| CDM_SMC 1              | <b>654 m/s e 9,96 Hz.</b>        | <b>B</b>                       | <b>T1</b>                    |
| CDM_SMC 2              | <b>563 m/s e 1,2 Hz.</b>         | <b>B</b>                       | <b>T1</b>                    |
| CDM_SMC 3              | <b>595 m/s e 3,28 Hz.</b>        | <b>B</b>                       | <b>T1</b>                    |
| CDM_SMC 4              | <b>568m/s e 3,66 Hz.</b>         | <b>B</b>                       | <b>T1</b>                    |

|             |                           |          |           |
|-------------|---------------------------|----------|-----------|
| CDM_SMC 5   | <b>629 m/s e 13,97 Hz</b> | <b>B</b> | <b>T1</b> |
| CDM_SMC 6   | <b>516 m/s e 3 Hz</b>     | <b>B</b> | <b>T1</b> |
| CDM_SMC 7   | <b>326 m/s e 5 Hz.</b>    | <b>C</b> | <b>T1</b> |
| CDM_SMC 8   | <b>477 m/s e 3,5 Hz</b>   | <b>B</b> | <b>T1</b> |
| CDM_HVSR 9  | <b>2,3 Hz</b>             | <b>B</b> | <b>T1</b> |
| CDM_HVSR 10 | <b>3,7 Hz</b>             | <b>B</b> | <b>T1</b> |
| CDM_HVSR 11 | <b>3,5 Hz</b>             | <b>B</b> | <b>T1</b> |
| CDM_HVSR 12 | <b>2,4 Hz</b>             | <b>B</b> | <b>T1</b> |
| CDM_HVSR 13 | <b>2,8 Hz.</b>            | <b>B</b> | <b>T1</b> |
| CDM_HVSR 14 | <b>2,5 Hz</b>             | <b>B</b> | <b>T1</b> |
| CDM_HVSR 15 | <b>3 Hz</b>               | <b>B</b> | <b>T1</b> |
| CDM_HVSR 15 | <b>7 Hz</b>               | <b>B</b> | <b>T1</b> |

Tab. 7: categorie di suolo determinate tramite indagine MASW- ReMi - HVSR

Naturalmente il vero dato di velocità va considerato in un ragionevole intorno del dato proveniente dalle elaborazioni sperimentali ( $\pm 10\%$  per la Vs30), per cui i terreni con velocità *borderline* vengono cautelativamente attribuiti alla categoria inferiore.

Dall'analisi dei dati si osserva una generale omogeneità dei valori della Vs, ad indicare che la geologia, per lo meno dei corpi deposizionali più importanti, esercita un forte controllo sulla distribuzione del campo di velocità. Per quanto riguarda la porzione più ghiaiosa delle zone più pianeggianti si osserva una correlazione quasi diretta tra la presenza del materasso ghiaioso e valori elevati della Vs. La Vs supera i 500 m/s nella maggior parte dell'abitato di Crocetta del Montello. Altra osservazione è il graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità, senza evidenti inversioni di velocità.

Da un punto di vista normativo (ai sensi della classificazione dell'O.P.C.M. 3274/2003 e s.m.i.) e quindi relativamente alle problematiche urbanistiche, ingegneristiche e geotecniche il territorio del comune di Crocetta del Montello indagato risulta appartenere a cinque zone: due zone B distinte in base alla granulometria delle coperture, una zona C e due zone caratterizzate da instabilità potenziale (zona con cedimenti diffusi e zona di scarpata). Nella zona B rientrano tutti quei siti nei quali i valori di Vs risultano compresi nell'intervallo 360-800 m/s mentre la zona C classifica i siti con valori di Vs ricadenti nell'intervallo 180-360 m/s.

Si precisa inoltre che vi è una netta differenza tra “bedrock sismico” e “substrato geologico” (o semplicemente “bedrock”). Le definizioni riportate nel glossario “Indirizzi e criteri generali per la microzonazione sismica” sono le seguenti:

**Bedrock:** Roccia compatta, rigida, non alterata, in affioramento o alla base di rocce / terreni rigidi o di sedimenti sciolti. Usato comunemente dai geologi per riferirsi a qualsiasi roccia / terreno diagenizzato / consolidato che non ha subito i processi meteorici di alterazione e degrado o deformazioni tettoniche pervasive.

**Bedrock sismico:** Sequenza litostratigrafica caratterizzata da una velocità delle onde di taglio maggiore o uguale a 800 m/s.

Il primo non sempre coincide con il secondo, così come nel caso della zona del Montello; in questa area le indagini sismiche non hanno rilevato velocità superiori agli 800 m/s entro i primi 30 m di spessore pur essendo comprovata la presenza di un substrato geologico composto da conglomerati (Conglomerato del Montello) a profondità anche inferiori ai 20 m dal piano campagna (in alcune punti anche subaffiorante); la spiegazione di questo quasi certamente sta nel grado di incarsimento di tali conglomerati. Per questo motivo non si è prevista la presenza di categoria di sottosuolo di tipo E per il Montello pur non potendo escludere, in via assoluta, che tale eventualità possa esistere.

## 8 ELABORATI CARTOGRAFICI

La DGR n.3308 del 4/11/2008 prevede che gli strumenti urbanistici comunali (PAT), siano corredati, dal punto di vista sismico, da una relazione illustrativa, un elaborato cartografico di rivisitazione dei contenuti geolitologici, geomorfologici ed idrogeologici in chiave sismologica e da un elaborato cartografico delle zone omogenee in prospettiva sismica.

Gli elaborati cartografici già esistenti (PAT), oltre alla relazione sismica, sono quindi due:

**Carta degli elementi geologici in prospettiva sismica:** carta prevista dalla DGR 3308/2008 a corredo del PAT;

**Carta delle zone omogenee in prospettiva sismica:** carta prevista dalla DGR 3308/2008 a corredo del PAT.

Le attuali Linee Guida Regionali per la microzonazione sismica riportate nella Deliberazione della Giunta Regionale N. 1572 del 03 settembre 2013 prevedono i contenuti degli studi di MS in termini di grafie e di elaborati da presentare, che sono:

**T1 - Carta delle Indagini:** carta prevista dalle linee guida 2012 della Protezione Civile nazionale “standard di rappresentazione e archiviazione informatica”.

**T2 – Carta geologico tecnica per la microzonazione sismica:** carta prevista dalle linee guida 2012 della Protezione Civile nazionale “standard di rappresentazione e archiviazione informatica”.

**T3 - Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (livello 1):** carta prevista dalle linee guida 2012 della Protezione Civile nazionale “standard di rappresentazione e archiviazione informatica”.

Si sottolinea che le aree golenali del f. Piave, caratterizzate da ghiaie mobili, non sono state oggetto di alcuna valutazione.

### 8.1 Carta delle indagini (T1)

Nella "Carta delle Indagini" sono state rappresentate le indagini preesistenti e quelle realizzate *ex-novo*. Queste ultime, realizzate con tecnica MASW, ReMi e HVSR, sono state mirate a determinare la velocità sismica dei primi 30 m di sottosuolo, scopo principale di questo studio.

L'insieme dei dati raccolti, ha permesso di disporre di un insieme di misure, così suddivise per tipologia:

| Tipologia di prova                                     | Quantità |
|--------------------------------------------------------|----------|
| Trincee esplorative                                    | 4        |
| Sondaggi per pozzi                                     | 3        |
| Prova penetrometrica statica con punta meccanica (CPT) | 2        |
| Trincee esplorative                                    | 4        |
| <b>Prove di nuova acquisizione</b>                     |          |
| Profilo sismico a rifrazione                           | 8        |
| MASW + ReMi                                            | 8        |
| HVSR (TROMINO)                                         | 16       |

I punti di indagine (puntuali o lineari), sono stati rappresentati in carta secondo la legenda prevista negli standard regionali per l'informatizzazione degli studi di MS con riferimento agli Indirizzi e Criteri di Microzonazione sismica (ICMS) a cura della Presidenza del Consiglio dei Ministri,

Dipartimento della Protezione Civile (versione 3.0 – ottobre 2013) e catalogati e archiviati mediante software Arc-Gis.

## 8.2 Carta geologico-tecnica (T2)

Nella Carta geologico tecnica per la microzonazione sismica (e nella carta **T - Carta della rivisitazione dei contenuti geologici in chiave sismologica**) sono riportate le informazioni di base (geologia, geomorfologia, caratteristiche litotecniche, geotecniche ed idrogeologiche) derivate da carte ed elaborati esistenti, in particolare quelli allegati al P.A.T.:

- “Relazione geologica” - P.R.G. Piano regolatore generale, dr. geol. E. Tomio, 2003;
- Studio di compatibilità sismica – Relazione illustrativa – Adastra srl, 2010.

Questi dati sono necessari alla definizione del modello di sottosuolo e funzionali alla realizzazione della Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (livello 1).

Non sono stati eseguiti approfondimenti strumentali per l’area collinare più accidentata in quanto tali aree non sono interessate da insediamenti se non per qualche edificio sparso di antico impianto. In ogni caso gli strumenti urbanistici vigenti impongono la massima tutela dell’ambito collinare precludendo di fatto nuove edificabilità.

Le vecchie e nuove indagini coprono in maniera abbastanza omogenea tutto il territorio comunale consentendo quindi una conoscenza sufficiente delle caratteristiche del sottosuolo.

I dati delle indagini sono stati condensati in appositi schede riassuntive che riportano il modello dei rapporti litostratigrafici di ciascuna sottozona omogenea (vedi “Schede MS” in allegato).

In carta, il territorio di Crocetta del Montello indagato, è stato classificato sia sulla base della litologia dei terreni di copertura che sul loro ambiente deposizionale; tale classificazione, in accordo con gli standard della Protezione Civile, vede un codice formato da lettere maiuscole (indicanti la tipologia dei terreni di copertura) e da lettere minuscole (riferite all’ambiente deposizionale).

Non è stato invece possibile costruire la carta di livello 2, sulla base dei valori di amplificazione ottenuti per ciascuna zona attraverso l’uso degli abachi (FA e FV<sup>1</sup>), in quanto non è stato possibile determinare con certezza la profondità del basamento sismico (*bedrock sismico*), caratterizzato da  $V_s \geq 800$  m/s.

---

<sup>1</sup> I parametri FA ed FV rappresentano il rapporto tra gli spettri di input e di output, rispettivamente in accelerazione e in pseudo velocità, calcolati in un intervallo intorno ai periodi TA e TV dove l’ampiezza è massima. L’intervallo di periodi considerato per FA varia tra 0,1 e 0,3 s (alte frequenze), mentre per gli FV l’intervallo varia tra 0,6 e 1,4 s (basse frequenze).

### 8.3 Carta delle Microzone Sismiche (T0)

Nell'ambito del territorio comunale di Crocetta del Montello investigato dall'indagine non sussistono terreni "stabili" dal punto di vista sismico poiché di fatto, sono sempre presenti terreni di copertura (talora assieme alle coltri di alterazione del substrato), aventi spessori superiori a 3 m e caratterizzati da velocità di propagazione delle onde di taglio  $V_s < 800$  m/s.

Per le valutazioni delle amplificazioni in superficie risulta fondamentale determinare il profilo della velocità delle onde S( $V_s$ ). Un ulteriore affinamento del metodo richiederebbe la misura del periodo fondamentale di vibrazione e la caratterizzazione dei terreni in condizioni dinamiche.

Attraverso il profilo delle velocità, entro il territorio di indagine sono state distinte le seguenti categorie di suolo (D.M. 14-01-2008 - § 3.2):

- **Categoria di suolo B;**
- **Categoria di suolo C.**

In carta, i segni grafici che separano le sottozone, in particolare al passaggio tra C e B, sono da intendersi non come un confine ma piuttosto come una fascia di transizione, in quanto nella realtà la differenziazione stratigrafica avviene gradualmente (nel nostro caso CDM\_SMC6 e CDM\_HVSR15)

I modelli litostratigrafici sono riportati nelle schede in allegato (cartella "Indagini MS").

### 8.4 Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica (livello 1)

In questa carta riporta i medesimi contenuti della carta precedente con le grafie previste dagli "standard di rappresentazione e archiviazione informatica" della Protezione Civile nazionale. Sono rappresentate due zone riconducibili alla Categoria di suolo B e alla Categoria di suolo C, differenziate in base alle caratteristiche litologiche e dei terreni di copertura.

Oltre a queste tre zone, in carta ci sono le altre due zone con caratteri di instabilità (area con cedimenti diffusi e area di scarpata).

Di seguito vengono riportate le schede riassuntive degli elaborati delle indagini sismiche raggruppati per ciascuna sismozona.

#### **8.4.1 Zona 1 - Categoria di suolo B**

Appartiene a questa categoria gran parte del territorio pianeggiante comunale posto a Ovest e a Sud dell'area golenale del f. Piave. I sismostrati rilevati evidenziano un primo livello (circa 12 m) con velocità che arrivano a poco oltre i 500 m/s a cui seguono depositi ghiaiosi più addensati i cui valori di Vs risultano compresi tra 550 m/s e 700 m/s circa. Pertanto la tipologia di suolo è ascrivibile alla categoria di suolo B (Vs30 compresa tra 360 m/s e 800ms ovvero NSPT30 > 50 nei terreni a grana grossa e cu30 > 250 kPa nei terreni a grana fina).

Geologicamente si tratta di una coltre di alluvioni (grande conoide formata in età glaciale e postglaciale dal deposito delle alluvioni grossolane apportate dal fiume Piave: il megafan del Piave) per spessori di parecchie decine di metri. In realtà si riconoscono due diverse fasi di deposizione marcate da diversa struttura pedogenetica superficiale ma in profondità la compagine ritorna unitaria. In alcune zone si individuano in superficie tracce di paleoalvei estinti.

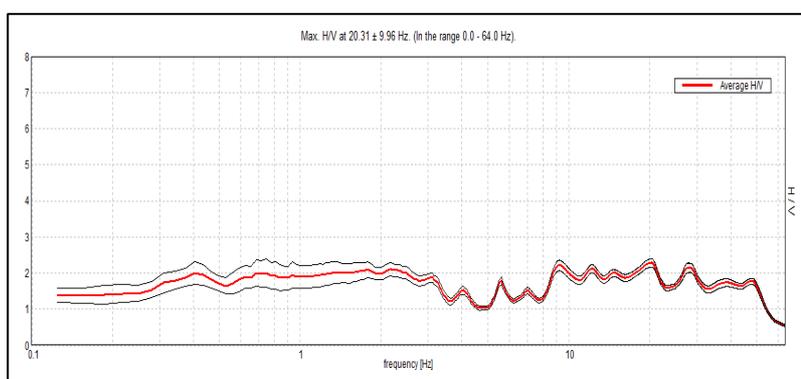
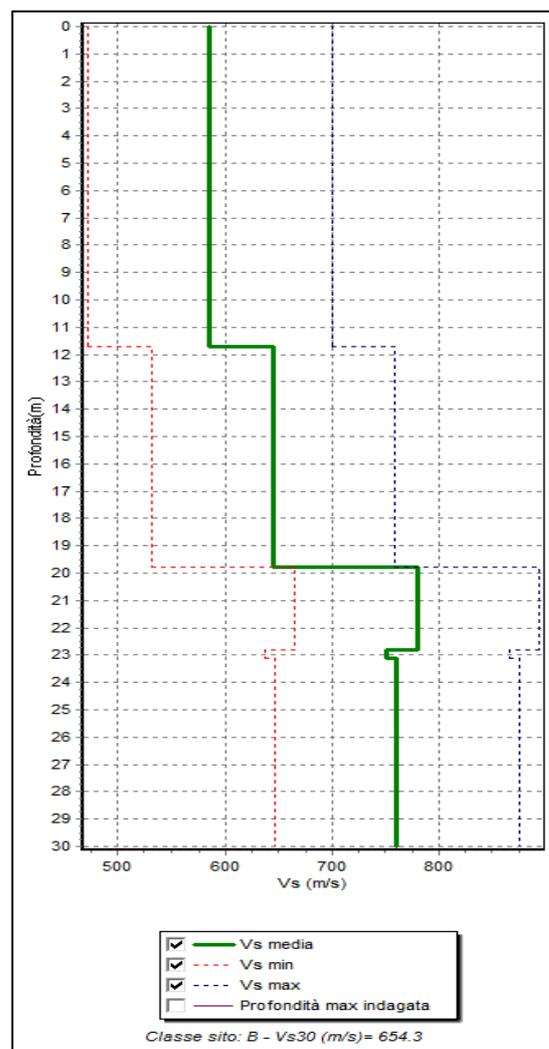
Tale materasso alluvionale è costituito da ghiaie sabbiose (o con sabbia), debolmente limose. Rare e con limitata estensione le lenti a granulometria più fine: sabbia con ghiaia, sabbia fine, limo e sabbia. Localmente, a rilevante profondità, sono presenti letti cementati, spesso descritti con il termine di conglomerato. Dal punto di vista geotecnico questi materiali presentano ottime caratteristiche meccaniche e secondo la classificazione AGI possono rientrare nella categoria GW.

La copertura soffice (suolo) varia limitatamente di natura e spessore. Nella porzione centrale il suolo ha spessore ridotto, non superiore a 0,30-0,50 m; prevale di gran lunga lo scheletro, che localmente raggiunge percentuali molto elevate, superiori al 70%, in genere comunque non inferiori al 40-50%. E' formato da ghiaie e ciottoli (diam. max 15÷20 cm) non alterati, di prevalente composizione calcareo dolomitica, più ridotti i componenti arenacei, metamorfici ed ignei. La terra fine è in prevalenza sabbiosa, con locale abbondante frazione organica di colore scuro. Al di sotto, per limitato spessore, la frazione fine presenta colore bruno scuro, che si va schiarendo, questo non per il procedere dell'alterazione, ma per trasporto meccanico da parte delle acque correnti delle componenti fini.

# CDM SMC 1

## CROCETTA DEL MONTELLO (TV)

### Viale Antonini

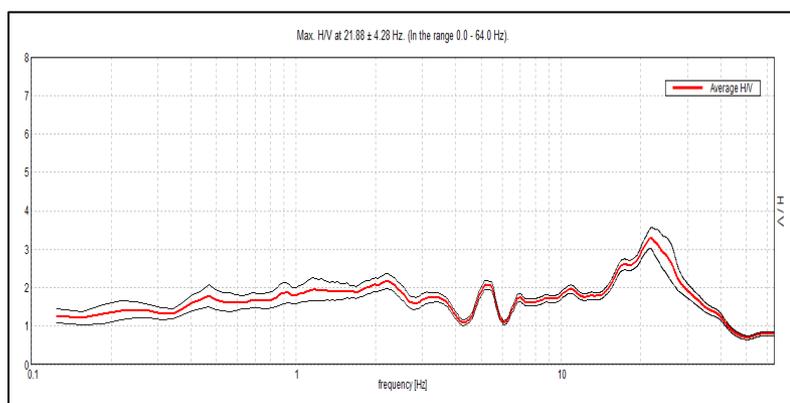
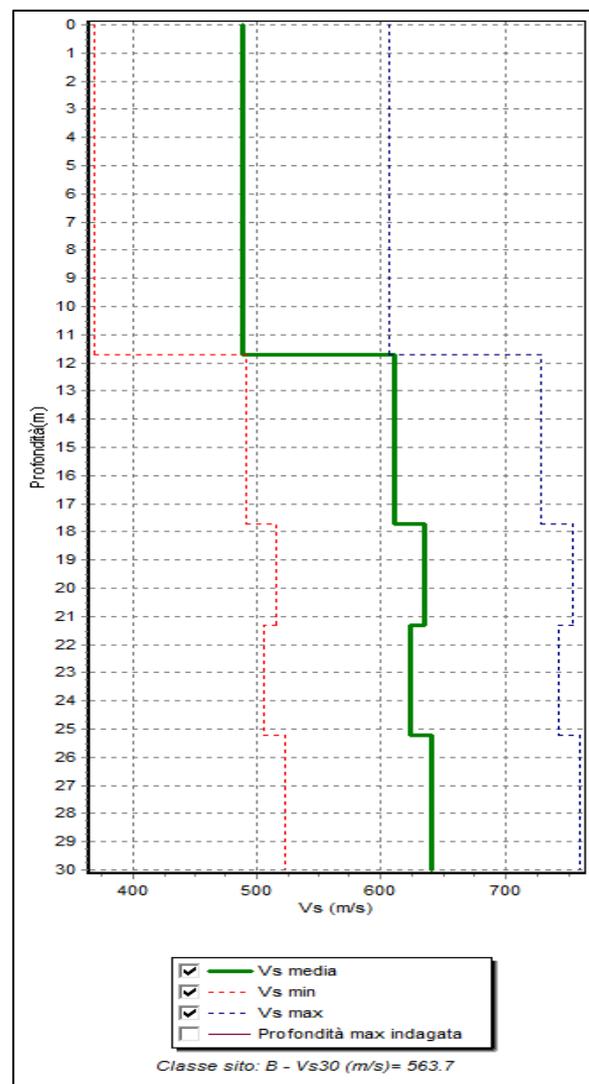


|                                                            | BEDROCK                                                          |    |
|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|----|
|                                                            | NO                                                               | SI |
| <b>COPERTURA</b>                                           | Sciolta                                                          |    |
| <b>SPESSORE</b>                                            | 20 m (spessore certo registrato)                                 |    |
| <b>PARAMETRO Vs da MASW</b><br><b>PARAMETRO Vs da ReMi</b> | $Vs_{30} = 654 \text{ m/s}$                                      |    |
| <b>CATEGORIA DEL SOTTOSUOLO</b>                            | <b>B</b>                                                         |    |
| <b>PICCHI DI FREQUEZE da H/V</b>                           | <b>4 Hz; 5,5 Hz; 7 Hz; 9 Hz</b><br><b>Picco massimo 20,13 Hz</b> |    |

# CDM SMC 2

## CROCETTA DEL MONTELLO (TV)

### Via Sant' Apollonia

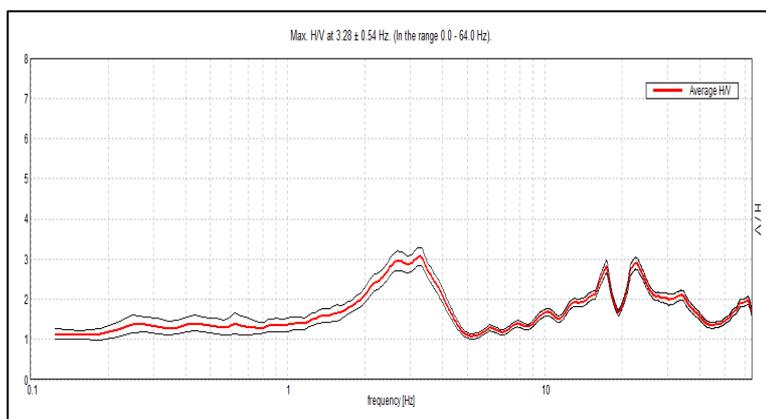
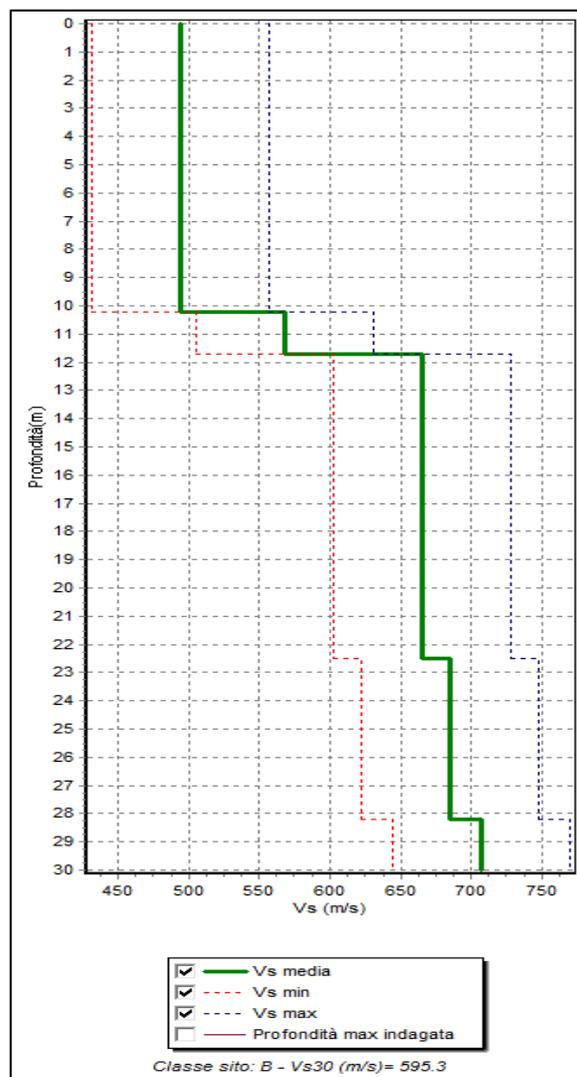


|                                                                                               | BEDROCK                                  |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------|----|
|                                                                                               | NO                                       | SI |
| <b>COPERTURA</b>                                                                              | Sciolta                                  |    |
| <b>SPESSORE</b>                                                                               | 21 m (spessore certo registrato)         |    |
| <b>PARAMETRO <math>V_s</math> da MASW</b><br><b>PARAMETRO <math>V_s</math> da <u>ReMi</u></b> | $V_{s30} = 563$ m/s                      |    |
| <b>CATEGORIA DEL SOTTOSUOLO</b>                                                               | <b>B</b>                                 |    |
| <b>PICCHI DI FREQUENZE da H/V</b>                                                             | 1,2 Hz; 5,3 Hz<br>Picco massimo 21,88 Hz |    |

# CDM SMC 3

## CROCETTA DEL MONTELLO (TV)

### Via Armando Diaz

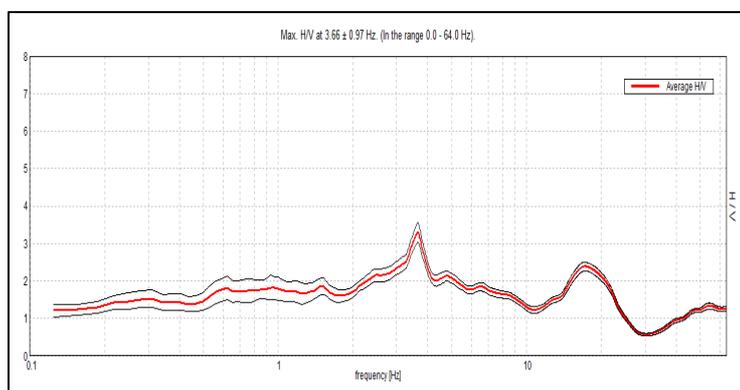
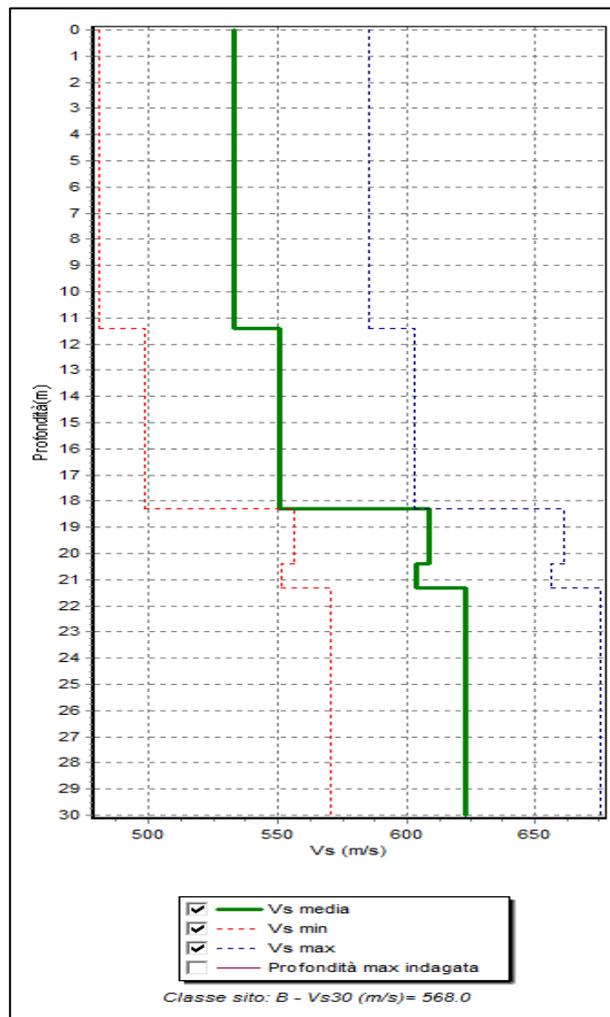


|                                                      | BEDROCK                          |    |
|------------------------------------------------------|----------------------------------|----|
|                                                      | NO                               | SI |
| <b>COPERTURA</b>                                     | Sciolta                          |    |
| <b>SPESSORE</b>                                      | 23 m (spessore certo registrato) |    |
| <b>PARAMETRO Vs da MASW<br/>PARAMETRO Vs da ReMi</b> | $V_s 30 = 595 \text{ m/s}$       |    |
| <b>CATEGORIA DEL SOTTOSUOLO</b>                      | <b>B</b>                         |    |
| <b>PICCHI DI FREQUENZE da H/V</b>                    | Picco massimo 3,28 Hz            |    |

# CDM SMC 4

## CROCETTA DEL MONTELLO (TV)

### Via Sant'Andrea

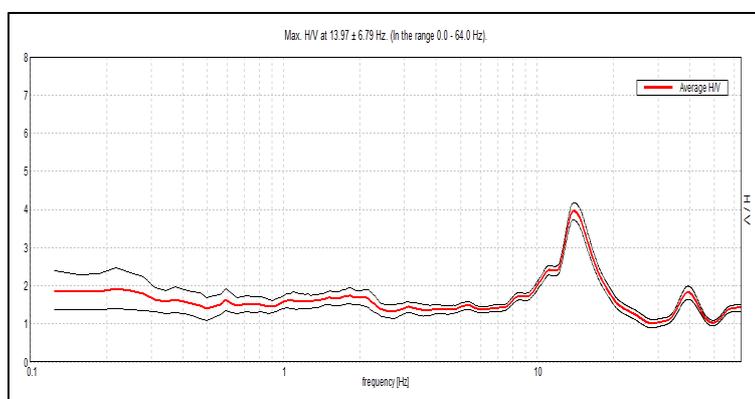
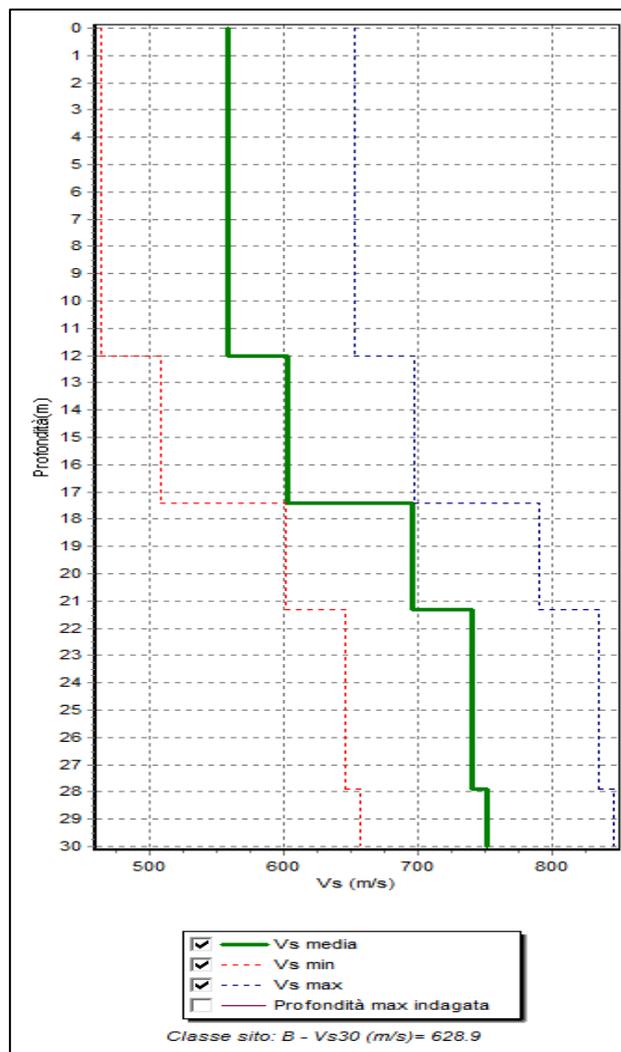


|                                                            | BEDROCK                          |    |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------|----|
|                                                            | NO                               | SI |
| <b>COPERTURA</b>                                           | Sciolta                          |    |
| <b>SPESSORE</b>                                            | 21 m (spessore certo registrato) |    |
| <b>PARAMETRO Vs da MASW</b><br><b>PARAMETRO Vs da ReMi</b> | Vs 30 = 568 m/s                  |    |
| <b>CATEGORIA DEL SOTTOSUOLO</b>                            | <b>B</b>                         |    |
| <b>PICCHI DI FREQUENZE da H/V</b>                          | Picco massimo 3,66 Hz            |    |

# CDM SMC 5

## CROCETTA DEL MONTELLO (TV)

### Via Don Antonio Carlo Massara

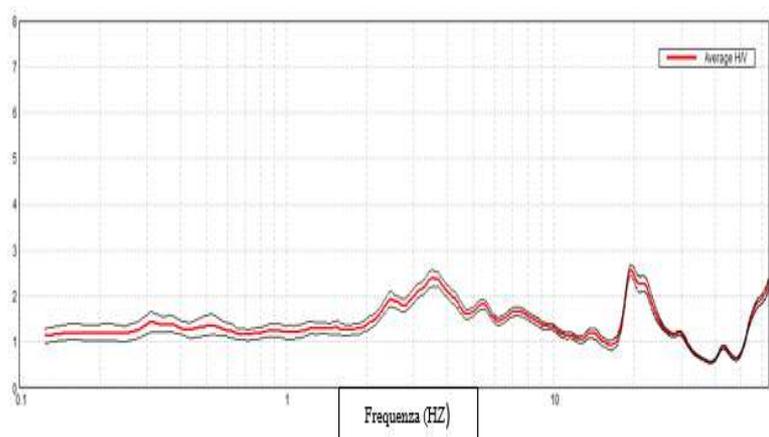
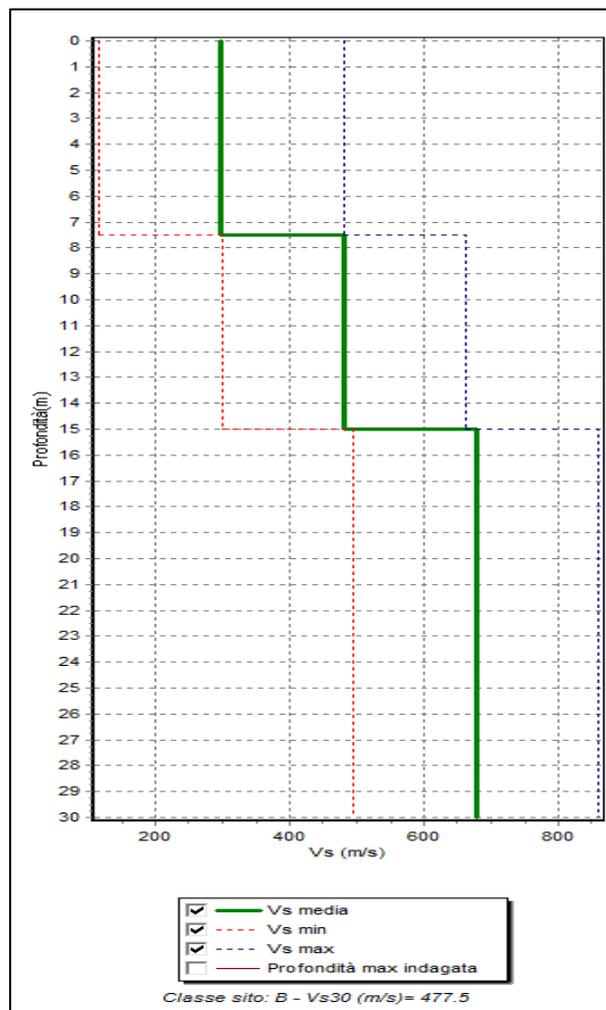


|                                                            | BEDROCK                          |    |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------|----|
|                                                            | NO                               | SI |
| <b>COPERTURA</b>                                           | Sciolta                          |    |
| <b>SPESSORE</b>                                            | 15 m (spessore certo registrato) |    |
| <b>PARAMETRO Vs da MASW</b><br><b>PARAMETRO Vs da ReMi</b> | $V_s 30 = 629 \text{ m/s}$       |    |
| <b>CATEGORIA DEL SOTTOSUOLO</b>                            | <b>B</b>                         |    |
| <b>PICCHI DI FREQUENZA da H/V</b>                          | 13,97 Hz                         |    |

# CDM SMC 8

## CROCETTA DEL MONTELLO (TV)

### Via Giovanni Fantin

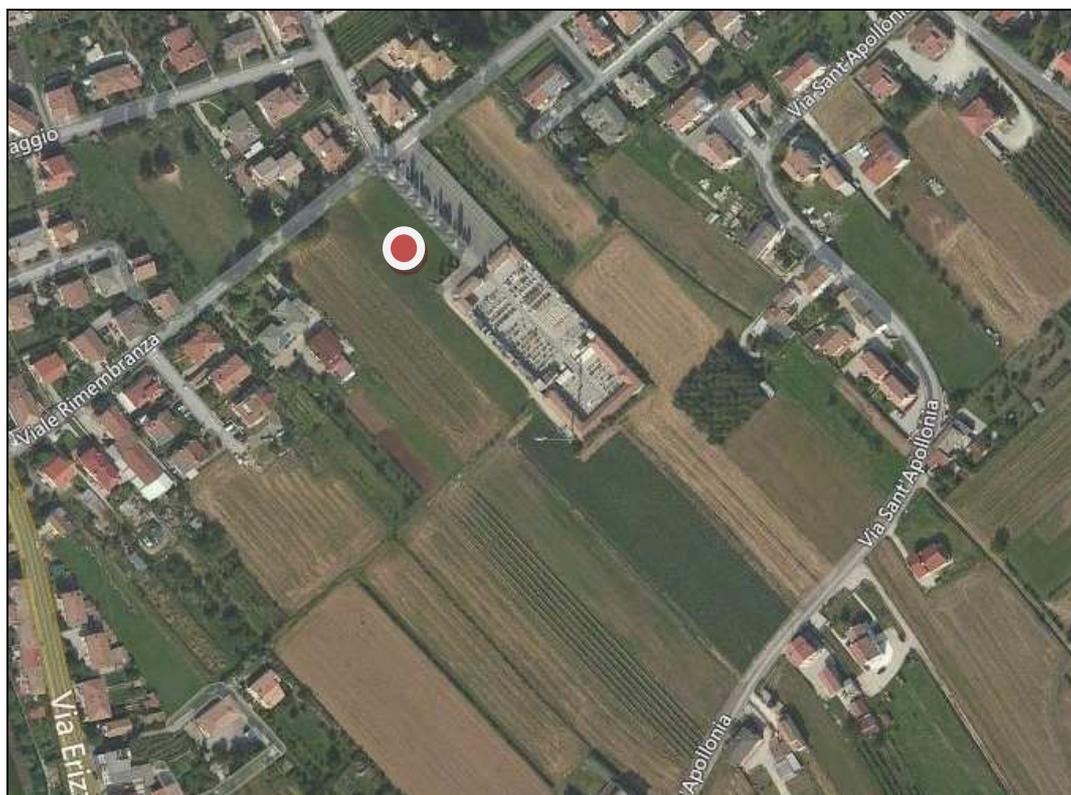


|                                                            | BEDROCK                          |    |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------|----|
|                                                            | NO                               | SI |
| <b>COPERTURA</b>                                           | Sciolta                          |    |
| <b>SPESSORE</b>                                            | 22 m (spessore certo registrato) |    |
| <b>PARAMETRO Vs da MASW</b><br><b>PARAMETRO Vs da ReMi</b> | $V_s 30 = 477 \text{ m/s}$       |    |
| <b>CATEGORIA DEL SOTTOSUOLO</b>                            | <b>B</b>                         |    |
| <b>PICCO DI FREQUENZA da H/V</b>                           | 3,5 Hz                           |    |

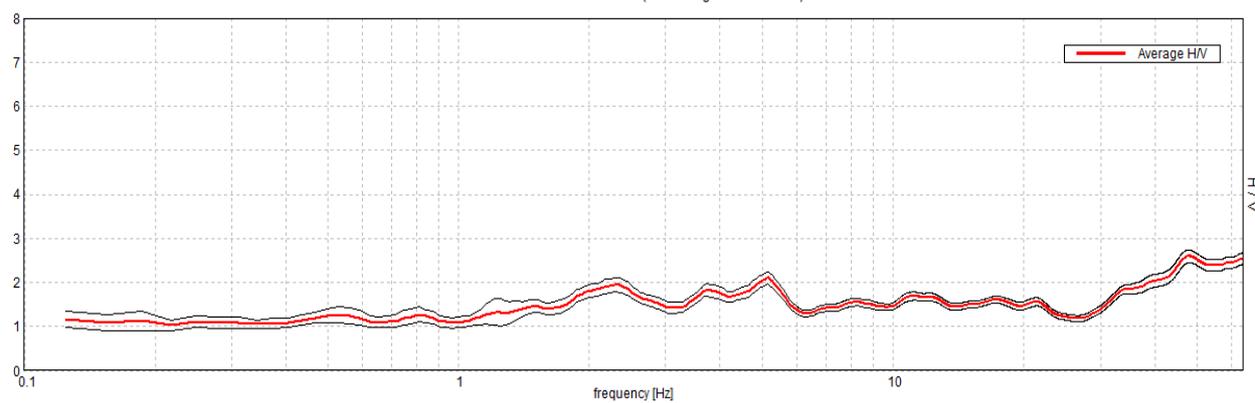
# CDM HVSR 9

## CROCETTA DEL MONTELLO

### Viale Rimembranza



Max. H/V at 47.81 ± 9.24 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).

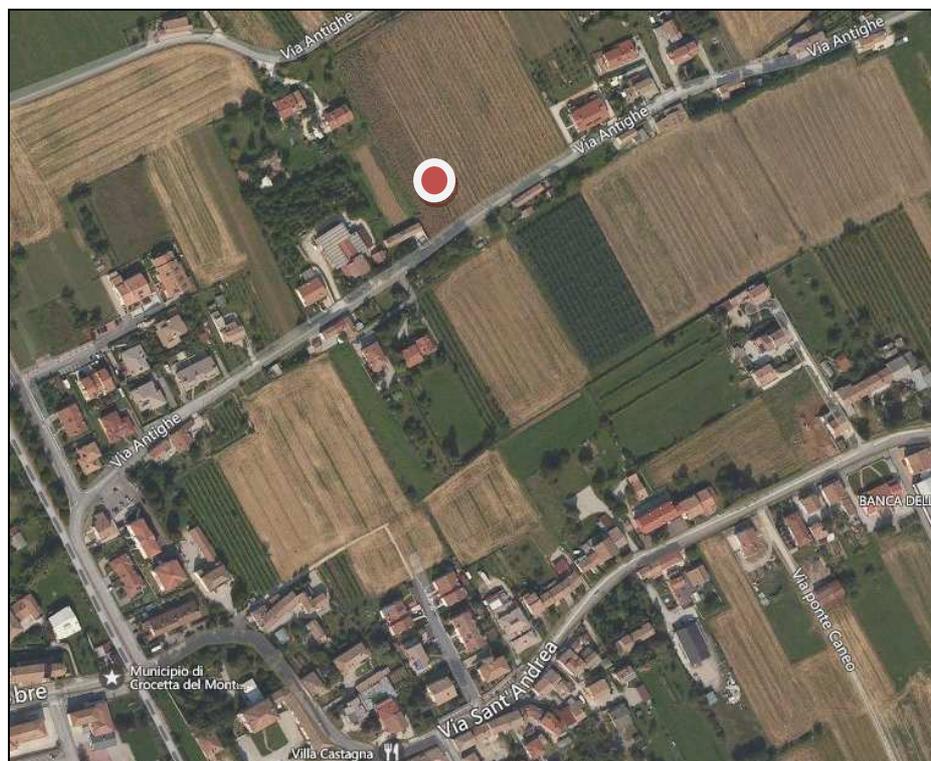


| Sito di indagine | Frequenza <u>max</u> H/V          |
|------------------|-----------------------------------|
| HV               | 2,3 Hz; 3,8 Hz; 5,0 Hz e 47,81 Hz |

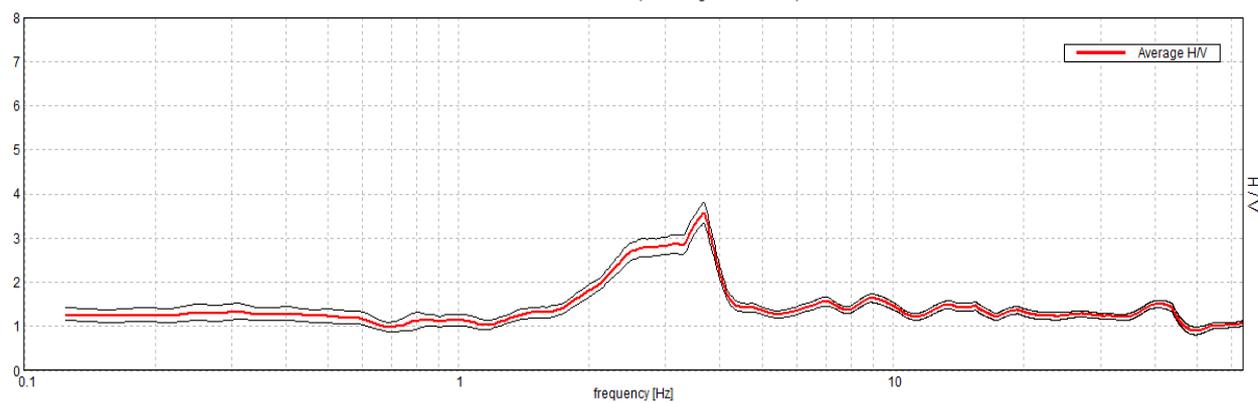
# CDM HVSR 10

## CROCETTA DEL MONTELLO

### Via Antighe



Max. H/V at 3.66 ± 0.63 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).

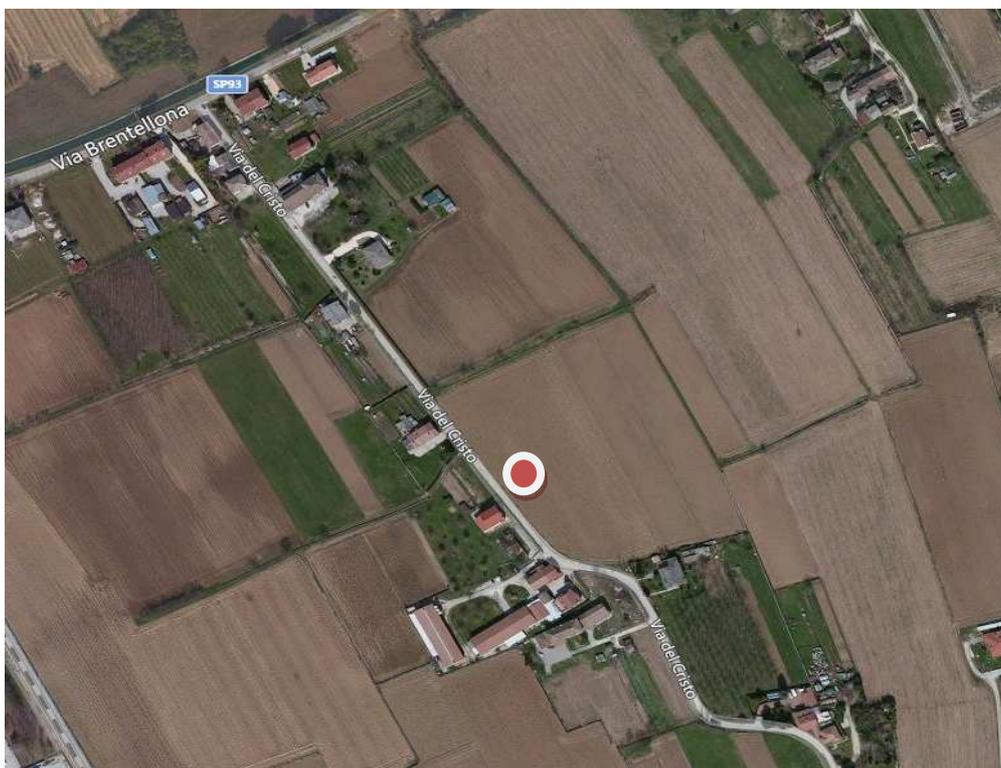


| Sito di indagine | Frequenza max H/V |
|------------------|-------------------|
| HV               | 3,7 Hz            |

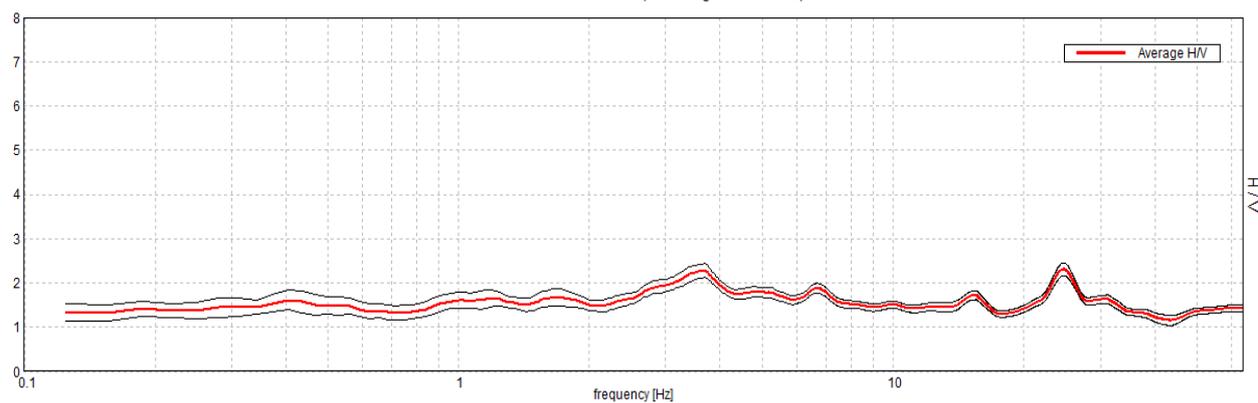
# CDM HVSR 11

## CROCETTA DEL MONTELLO

### Via Del Cristo



Max. H/V at  $24.69 \pm 6.75$  Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



| Sito di indagine | Frequenza max H/V        |
|------------------|--------------------------|
| HV               | 3,5 Hz; 6,5 Hz e 24,7 Hz |

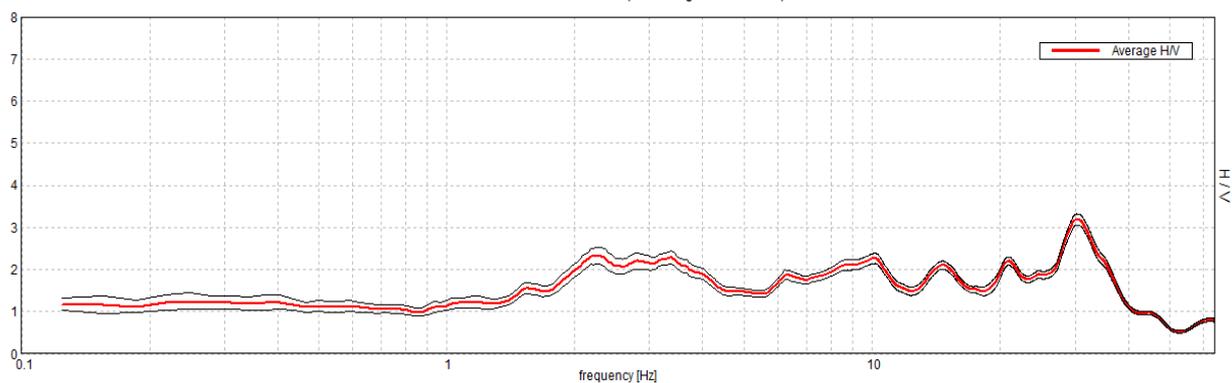
# CDM HVSR 12

## CROCETTA DEL MONTELLO

### Via Canapificio



Max. H/V at 30.31 ± 6.64 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).

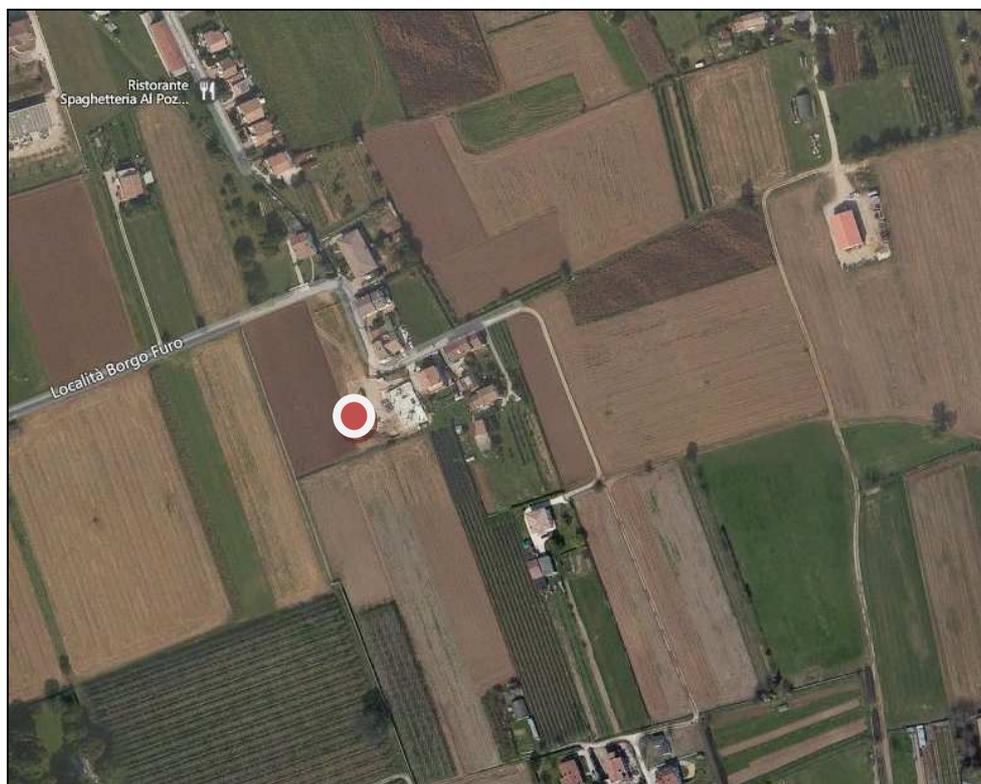


| Sito di indagine | Frequenza max H/V               |
|------------------|---------------------------------|
| HV               | 2,4 Hz; 6,1 Hz; 10 Hz e 30,3 Hz |

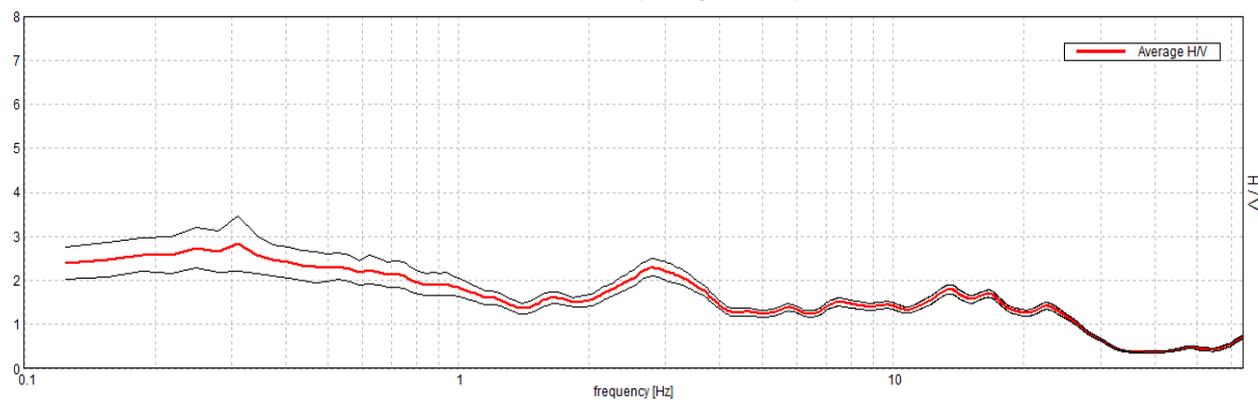
# CDM HVSR 13

## CROCETTA DEL MONTELLO

### Località Borgo Furo



Max. H/V at  $0.31 \pm 0.74$  Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).

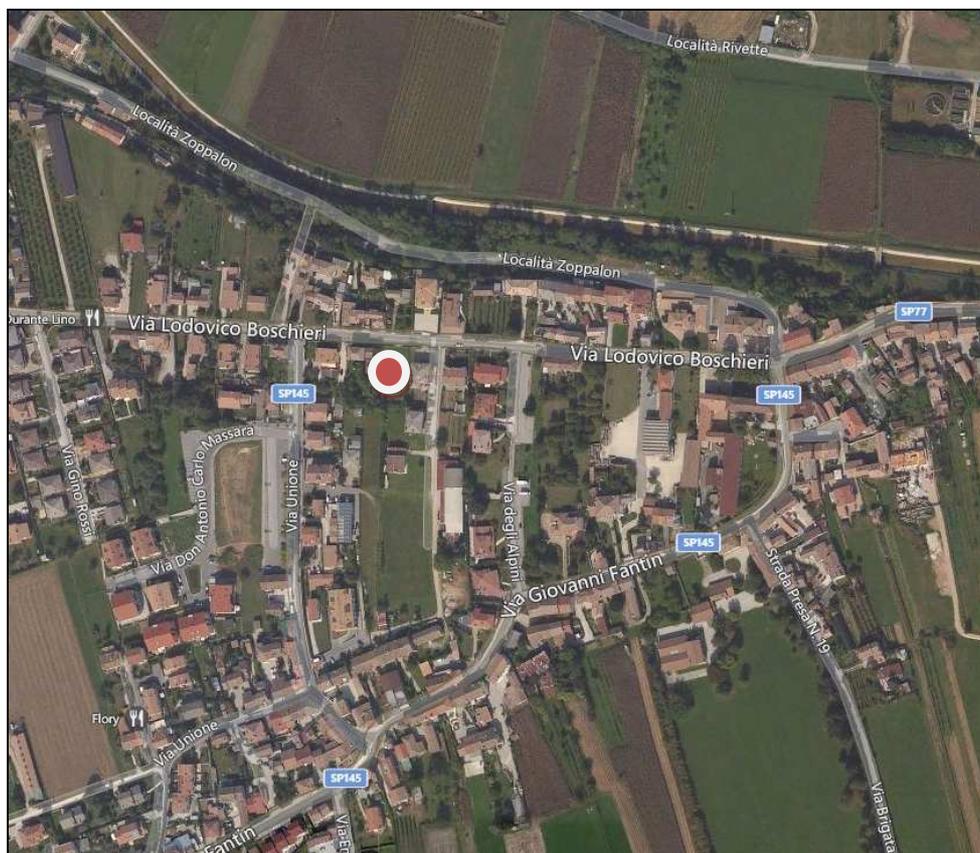


| Sito di indagine | Frequenza max H/V |
|------------------|-------------------|
| HV               | 2,8 Hz            |

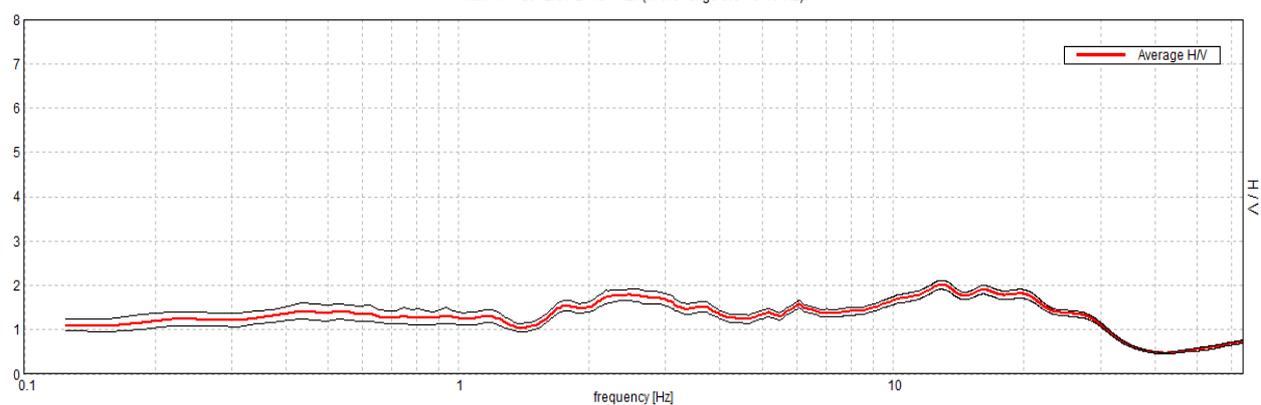
# CDM HVSR 14

## CROCETTA DEL MONTELLO

### Via Lodovico Boschieri



Max. H/V at 12.97 ± 4.54 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).

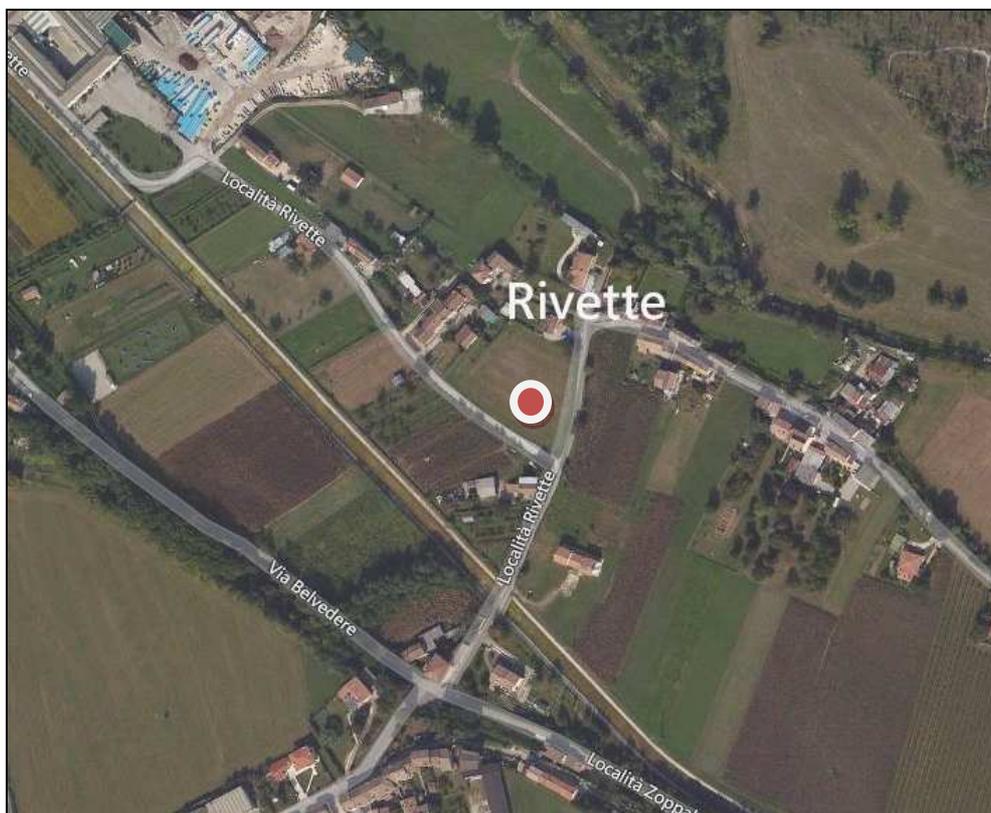


| Sito di indagine | Frequenza max H/V       |
|------------------|-------------------------|
| HV               | 2,5 Hz; 6 Hz e 12,97 Hz |

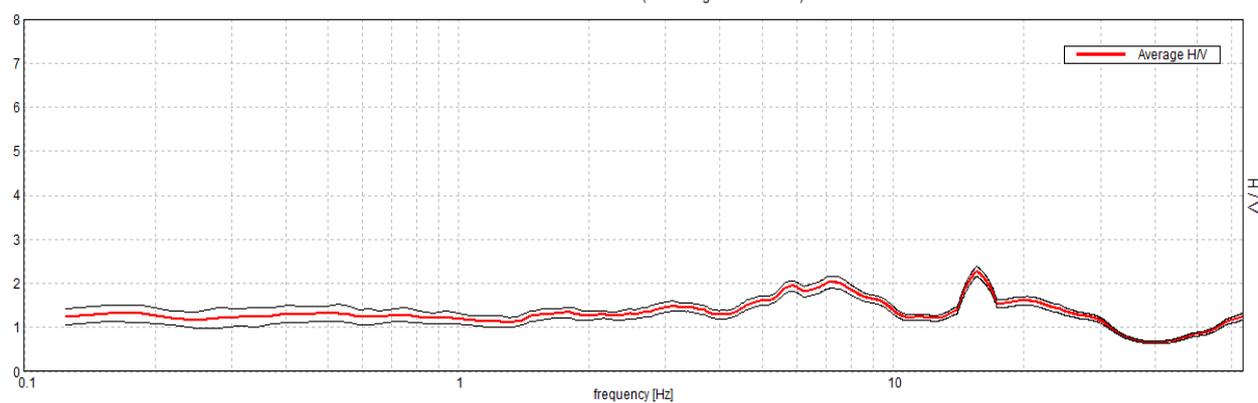
# CDM\_HVSR 16

## CROCETTA DEL MONTELLO

### Località Rivette



Max. H/V at 15.56 ± 4.59 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



| Sito di indagine | Frequenza max H/V |
|------------------|-------------------|
| HV               | 7 Hz e 15,56 Hz   |

#### **8.4.2 Zona B2 - Categoria di suolo B**

La zona è posta al piede del Montello dove vi sono materiali alluvionali e/o fluvioglaciali riferibili a terreni a granulometria medio grossa ed addensati, alternati ed interdigitati a terreni a grana fina di media consistenza e di origine colluviale, ricoperti da una coltre prevalentemente argillosa residuale; le caratteristiche fisico-meccaniche hanno graduale miglioramento con la profondità.

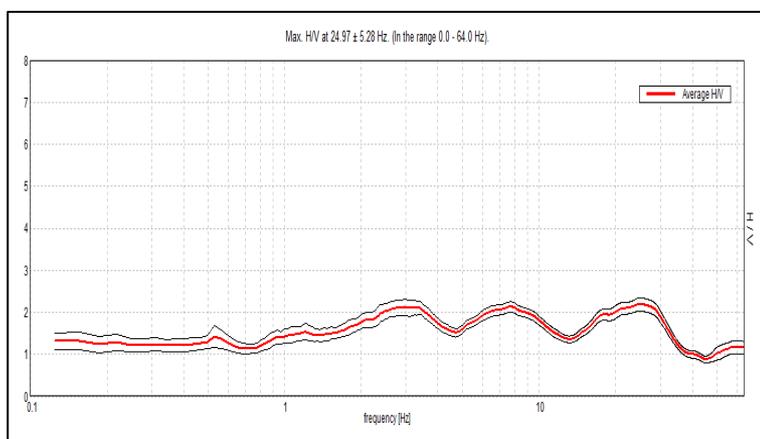
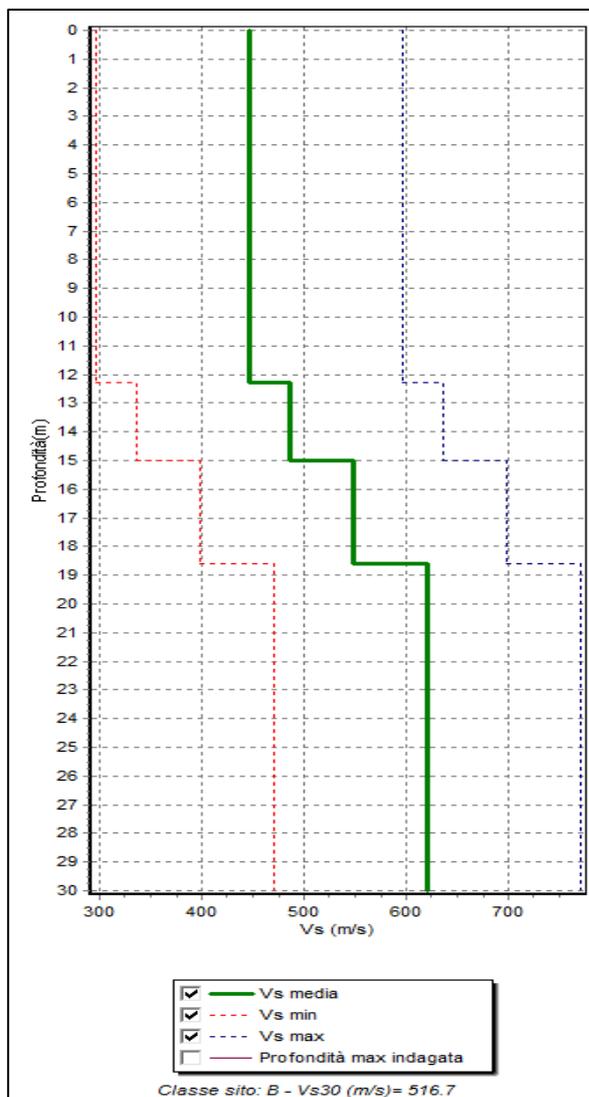
I sismo-strati rilevati evidenziano un primo livello colluviale con velocità attorno a 300-350 m/s a cui seguono banchi o strati con valori di Vs compresi tra 450 m/s e 550 m/s. Pertanto la tipologia di sottosuolo è ascrivibile alla categoria B (Vs30 compresa tra 360 m/s e 800ms ovvero NSPT30 > 50 nei terreni a grana grossa e cu30 > 250 kPa nei terreni a grana fina).

Tali materiali della copertura detritica colluviale, addensati e costituiti da elementi granulari sabbioso-ghiaiosi in variabile matrice limo-sabbiosa con spessori > 3 m, ricoprono diffusamente l'ampia fascia posta al piede del Montello che fa da raccordo con l'antistante pianura. Lo spessore della copertura è variabile e supera i 30 metri di profondità; infatti non è stato possibile identificare la profondità del bedrock sismico. Questi terreni derivano dall'accumulo di materiali in prevalenza argillosi e limosi in parte legati alla locale degradazione ed alterazione dei conglomerati ed in parte trasportati ad opera delle acque correnti dai rilievi soprastanti. La loro composizione è eterogenea e variabile, localmente possono divenire più ghiaiosi in corrispondenza delle piccole conoidi presenti al piede del Montello oppure per interdigitazione con le alluvioni del f. Piave, nella zona del centro del capoluogo.

# CDM\_SMC 6

## CROCETTA DEL MONTELLO (TV)

### Via Francesco Baracca

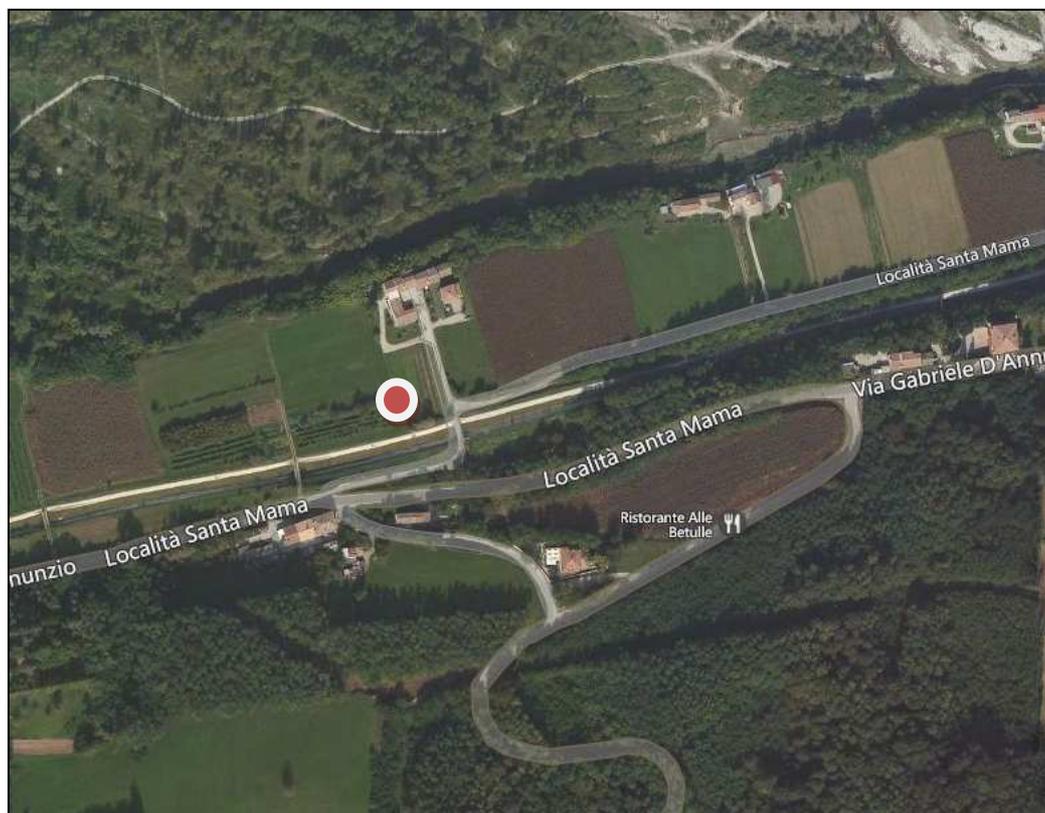


|                                                                   | BEDROCK                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|----|
|                                                                   | NO                                                | SI |
| <b>COPERTURA</b>                                                  | Sciolta                                           |    |
| <b>SPESSORE</b>                                                   | 25-26 m (spessore certo registrato)               |    |
| <b>PARAMETRO Vs da MASW</b><br><b>PARAMETRO Vs da <u>ReMi</u></b> | <b><u>Vs 30</u> = 516 m/s</b>                     |    |
| <b>CATEGORIA DEL SOTTOSUOLO</b>                                   | <b>B</b>                                          |    |
| <b>PICCHI DI FREQUENZE da H/V</b>                                 | <b>3 Hz; 7,5 Hz</b><br><b>Picco massimo 25 Hz</b> |    |

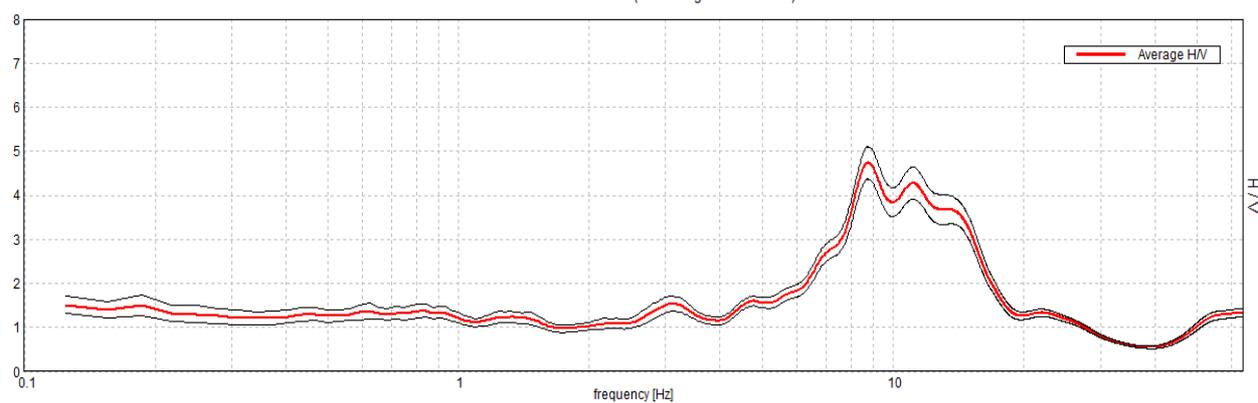
# CDM\_HVSR 15

## CROCETTA DEL MONTELLO

### Via Gabriele D'Annunzio (Loc. Santa Mama)



Max. H/V at  $8.75 \pm 1.5$  Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).



| Sito di indagine | Frequenza max H/V |
|------------------|-------------------|
| HV               | 3 Hz e 8,57 Hz    |

### 8.4.3 Zona 2 - Categoria di suolo C

Tale Zona occupa la porzione del territorio comprendente il rilievo collinare del Montello, limitrofa alla precedente Zona B2. La coltre superficiale sciolta, in genere per uno spessore di circa 10-15 m, è formata da depositi residuali di pedogenesi pooliciclica in matrice prevalentemente limosa argilloso-sabbiosa che si poggiano sulla parte decompressa, fratturata ed incarsita del substrato geologico costituito dal Conglomerato del Montello.

I sismo-strati rilevati evidenziano un primo livello con velocità  $V_s$  attorno a 240-300 m/s a cui segue il substrato alterato con valori di  $V_s$  che non superano i 400 m/s fino a 30 m di profondità. La tipologia di sottosuolo è quindi ascrivibile alla categoria C (depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{s30}$ , compresi fra 180 m/s e 360 m/s ( $N_{spt,15} > 50$  nei terreni a grana grossa o  $c_u < 250$  kPa nei terreni a grana fina).

I terreni di copertura del rilievo del Montello sono costituiti da un suolo derivato primariamente dalla degradazione meteorica dei conglomerati; trattasi di un terreno “argilloso” rossastro con inclusi di varie dimensioni, a volte integri, di solito però in uno stato avanzato di alterazione. Spesso sono i resti silicei di ciottoli di calcare selcifero completamente decalcificati, coperti da patine nerastre. Questa terra rossa (ferretto) si riscontra variamente alternata o mescolata con materiali di origine glaciale che hanno subito processi analoghi di alterazione. I due materiali sono molto simili, variamente frammisti ed alternati, difficilmente distinguibili come unità geologiche separate.

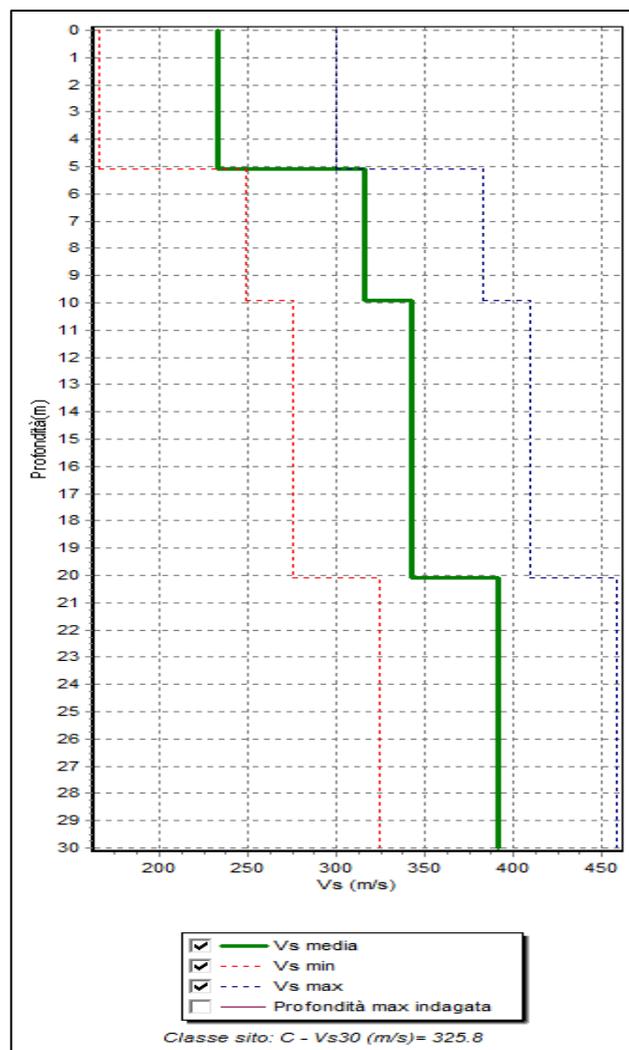
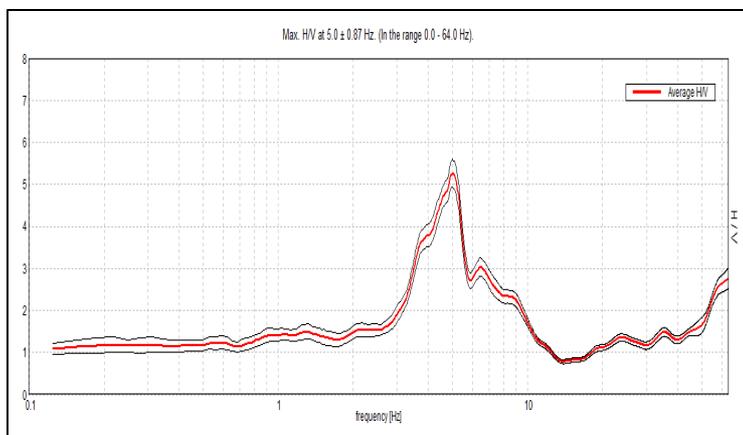
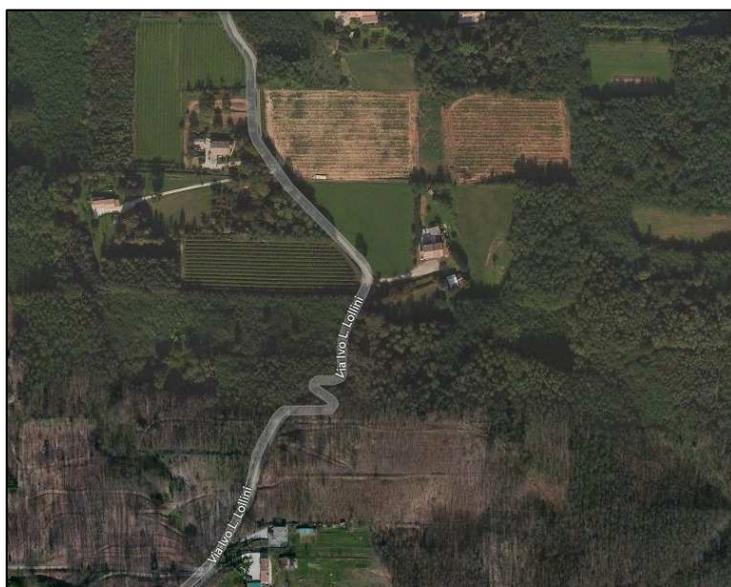
Dal punto di vista granulometrico possono essere definiti come: “argilla con limo e sabbia debolmente ghiaiosa” e “limo con sabbia ed argilla ghiaiosa”, si rilevano poi vari termini intermedi. Prove penetrometriche che hanno interessato questo terreno forniscono valori di  $R_p$  tra 10 e 25 kg/cm<sup>2</sup>, con punte inferiori. La coesione può essere quantificata in circa 0,3÷0,6 kg/cm<sup>2</sup> per i livelli con minor resistenza e in 0,8÷0,9 kg/cm<sup>2</sup> per quelli con maggior resistenza. I livelli con caratteristiche meccaniche più scadenti debbono considerarsi variamente compressibili.

Lo spessore dei materiali di copertura è molto variabile, tanto che in alcune zone affiorano a giorno i conglomerati alterati del substrato geologico, ma generalmente tale spessore supera la decina di metri.

# CDMSMC 7

## CROCETTA DEL MONTELLO (TV)

### Via Ivo L. Lollini



|                                                            | BEDROCK                          |    |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------|----|
|                                                            | NO                               | SI |
| <b>COPERTURA</b>                                           | Sciolta                          |    |
| <b>SPESSORE</b>                                            | 12 m (spessore certo registrato) |    |
| <b>PARAMETRO Vs da MASW</b><br><b>PARAMETRO Vs da ReMi</b> | <b>Vs 30 = 326 m/s</b>           |    |
| <b>CATEGORIA DEL SOTTOSUOLO</b>                            | <b>B</b>                         |    |
| <b>PICCO DI FREQUENZA da H/V</b>                           | <b>5 Hz</b>                      |    |

#### **8.4.4 Zone suscettibili di instabilità**

Dallo studio di MS è emerso che, nelle aree urbanisticamente sensibili, non sussistono zone “stabili”, nelle quali cioè non si ipotizzano effetti locali di rilievo di alcuna natura (substrato sismico posto a profondità inferiore a 3 m con morfologia piatta o semi-pianeggiante).

Si ricorda ancora che le aree golenali del f. Piave non sono state oggetto di alcuna valutazione.

Dalle nuove indagini è emerso che quasi tutto il territorio comunale rientra in aree stabili suscettibili di amplificazione sismica, nelle quali cioè sono attese amplificazioni del moto sismico, come effetto dell’assetto litostratigrafico (non sono stati rilevati infatti suoli di categoria A) e come effetto della morfologia locale (pendenze diffuse maggiori di 15°, presenza di cigli di scarpata e possibilità di cedimenti diffusi).

Le principali cause riscontrate per le “aree suscettibili di instabilità”, nelle quali secondo la DGR 1572/2013 gli effetti sismici attesi e predominanti sono riconducibili a deformazioni del territorio, sono principalmente l’instabilità di versante, i cedimenti differenziali dovuti a sprofondamento carsico escludendo comunque la possibilità di liquefazioni. Si ritiene infatti non sussistono zone di deformazione permanente caratterizzate da suscettibilità alla liquefazione in quanto il fuso granulometrico dei terreni sciolti del territorio indagato è esterno alle zone indicate nel Testo delle Nuove Norme Tecniche per le costruzioni (fig. 7.11.1), trattandosi prevalentemente di terreni grossolani oppure per la mancanza di condizioni sature per l’ambiente collinare.

La successione stratigrafica in talune zone è comunque caratterizzata da terreni abbastanza “soffici” e pertanto potenzialmente suscettibili di cedimenti differenziali; si considera comunque basso anche il rischio di tali cedimenti sulla base del fatto che si tratta di depositi antichi non con sabbie sciolte, così come non ci sono marcate eteropie laterali. Nelle aree indicate con particolare concentrazione di fenomeni carsici rimane in evidenza la possibilità di cedimenti differenziali dovuti all’evoluzione del carsismo ipogeo.

Le scarpate che delimitano il Montello verso Ovest e verso Nord possono invece essere interessate da vari fenomeni gravitativi, sia attivi che potenziali che possono interferire con le attività e gli insediamenti antropici.

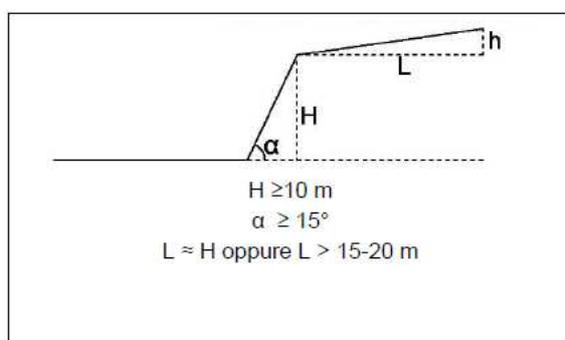
Si ribadisce quindi che, nel caso si progettassero nuovi insediamenti all’interno delle suddette zone, si dovranno effettuare approfondimenti geologici e geofisici specifici in tal senso.

#### **8.4.5 Forme di superficie**

Per le forme di instabilità legate a possibili amplificazioni dovute ad effetti topografici, si richiamano soltanto i casi dei pendii con inclinazione maggiore di 15°, le posizioni di cresta di

dorsale e la fascia retrostante il ciglio di scarpate di rilevante altezza. Le forme di instabilità di versante segnalate in carta riguardano gli orli di scarpata più ripidi nella zona del Montello. Tale morfologia può dar luogo a fenomeni di amplificazione topografica come previsto dal D.M. 14-01-2008 - § 3.2, per cui la relativa categoria topografica è la T2 (ed eventualmente la T3).

A questo proposito si rammenta che le Linee Guida 2013 (Regione Veneto DGR 1572 del 03/09/2013) considerano amplificabili le fasce prospicienti le scarpate caratterizzate da fronti di altezza (H) maggiori o uguali a 10 m, inclinazione del fronte principale ( $\alpha$ ) maggiore o uguale a  $15^\circ$  ed estensione del fronte superiore (L) almeno pari all'altezza H o comunque non inferiore ai 15-20 metri.



L'altezza H è da intendersi come distanza verticale dal piede al ciglio del fronte principale, mentre il fronte superiore L è identificato dalla distanza tra il ciglio del fronte principale e la prima evidente irregolarità morfologica.

Infine, sempre tra le condizioni che possono generare instabilità, è stata considerata la porzione di territorio comunale caratterizzata da diffusi fenomeni carsici, l'area del Montello, che possono dare luogo a fenomeni di cedimento differenziale o sprofondamento.

#### 8.4.6 *Faglie attive e capaci*

Per quanto riguarda le faglie sono state riportate le strutture note dalla letteratura e desumibili dal catalogo delle faglie capaci ITHACA "ITaly HAZard from CAPable faults" disponibile on-line all'indirizzo <http://www.apat.gov.it/site/it-IT/Progetti/ITHACA> - Catalogo delle faglie capaci (vedi anche fig. 4). Va comunque segnalato che non si tratta di strutture lineari, ma piuttosto di fasce di disturbo tettonico la cui larghezza può essere di decine o anche di centinaia di metri.

La loro localizzazione in carta è desunta dai data base disponibili in quanto sepolte sotto la copertura sciolta quaternaria.

Alla luce di quanto emerso nel presente studio di MS, nel contesto del territorio di collina e di valle del comune di Crocetta del Montello, la Carta delle microzone omogenee in prospettiva sismica è utilizzabile in modo organico ai fini di progettazione. Va da se che per interventi di un certo impegno o rilievo esso è un utile strumento che può indirizzare verso specifici e ulteriori

approfondimenti, con misure puntuali di Vs ed eventuali integrazioni con la determinazione di altri parametri (es. down hole, periodo proprio del terreno, ecc.).

A livello di programmazione superiore nelle zone stabili suscettibili di amplificazioni locali possono essere utilizzati per la progettazione gli appositi abachi, purché il sito di costruzione presenti caratteristiche conformi alle ipotesi di base utilizzate per l'elaborazione degli abachi stessi. In generale tali ipotesi assumono che il sottosuolo sia assimilabile ad una successione di strati approssimativamente piano paralleli, con modeste irregolarità morfologiche. Per tali condizioni sono ipotizzabili differenti procedure da adottare da parte della regione, conformemente al proprio contesto normativo, a partire dal confronto fra l'azione sismica dedotta dagli abachi con quella che si ottiene utilizzando la categoria di sottosuolo e lo spettro per essa previsto dalla norma.

## 9 CONCLUSIONI

Dal punto di vista del rischio sismico tutto il territorio comunale è classificato sismico di seconda categoria, con sismicità massima  $S = 9^\circ$  M.C.S. (v. il D.M. 14.05.1982), tale classificazione è stata aggiornata, alla luce dell'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri del 20.03.2003 n. 3274, "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per la costruzione in zona sismica" con l'inserimento in classe 2 realizzato dalla Deliberazione n. 67 del 03.12.2003 del Consiglio Regionale del Veneto.

Il presente lavoro di Microzonazione Sismica ha poi consentito di dividere il territorio comunale in cinque microzone sismiche distinte per categoria di sottosuolo e per la presenza di potenziali instabilità.

Per le zone B1 e B2 gli interventi edilizi di manutenzione/ristrutturazione potranno fare riferimento ai parametri di caratterizzazione del sito ricavati dallo studio della microzonazione sismica; le nuove costruzioni o gli ampliamenti significativi dovranno invece prevedere almeno una misura di frequenza propria del terreno oppure una caratterizzazione sismica dello stesso (HVSR, MASW, ecc.) oppure la determinazione di queste in via indiretta attraverso prove geotecniche (SPT in foro, prove penetrometriche ecc.), come previsto dal D.M 14/01/2008 capitolo 3.

Per la zona C la relazione geologica a corredo delle pratiche edilizie prevedrà la verifica della stratigrafia del sito attraverso indagini dirette o indirette oltre alla determinazione della frequenza propria del terreno e/o la caratterizzazione sismica dello stesso (HVSR, MASW, ecc.), anche eventualmente per via indiretta attraverso prove geotecniche (SPT in foro, prove penetrometriche ecc.), come previsto dal D.M 14/01/2008 capitolo 3. Sarà particolarmente importante definire la

profondità del substrato sismico (sismostrato con  $V_s > 800$  m/s) se questo si posiziona entro i primi 30 m di profondità.

Nelle zone suscettibili di instabilità sarà importante, oltre valutazione della amplificazione sismica locale, anche la valutazione delle condizioni di stabilità dei versanti estesa ad un adeguato intorno; per le zone caratterizzate da diffusi fenomeni carsici sarà invece da valutare l'effettivo rischio di cedimento differenziale e/o di sprofondamento localizzato.

Cison di Valmarino, 15 Maggio 2015

Dott. Geol. Simone Bortolini  
Ordine Geologi del Veneto n. 763

## 10 BIBLIOGRAFIA

AA.VV. Seismogenetic sources potentially responsible for earthquakes with  $M \geq 6$  in the Southern Alps (Thiene – Udine sector, NE Italy)” *Geophysical Journal International* (2005).

AA.VV. “Modello sismotettonico dell’Italia Nord Orientale”, C.N.R., Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Rendiconto N. 1, Trieste, 1987.

Benedetti, L., Tapponnier, P., King, G. C. P., Meyer, B., Manighetti, I., 2000. Growth folding and active thrusting in the Montello region, Veneto, northern Italy. *J. Geophys. Res.*, 105, 739-766.

Castaldini, D. & Panizza, M., 1991. Inventario delle faglie attive tra i fiumi Po e Piave e il Lago di Como (Italia settentrionale), *Il Quaternario*, 4, 333–410.

Castellarin A. Nicolich R., Fantoni R., Cantelli L., Sella M., Selli L., 2006 b. Structure of the lithosphere beneath the Eastern Alps (southern sector of the TRANSALP transect). *Tectonophysics* vol. 414, pp. 259 - 282.

Cruden D.M. & Varnes D. J. (1996) - Landslide types and processes. In: TURNER A.K. & SCHUSTER R.L. (eds) - “Landslide: Investigation and Mitigation. Transportation Research Board”, Special Report 247, National Academy Press, pp. 36-75, Washington D.C.

Database of Individual Seismogenic Sources (DISS), Version 3.0.4: A compilation of potential sources for earthquakes larger than  $M 5,5$  in Italy and surrounding areas, in I. N. d. G. e Vulcanologia, ed., <http://diss.rm.ingv.it/diss/>.

Ferrarese, F., Sauro, U. & Tonello, C., 1998. The Montello Plateau. Karst evolution of an alpine neotectonic morphostructure, *Zeit. für Geomorph.*, N.F. Suppl.-Bd., 109, 41–62.

Galadini, F., Poli, M. E., Zanferrari, A., 2005. Seismogenic sources potentially responsible for earthquakes with  $M \geq 6$  in the eastern Southern Alps (Thiene-Udine sector, NE Italy). *Geophys. J. Int.*, 161, 739-762.

Galadini, F., Meletti, C. & Vittori, E., 2001b. Major active faults in Italy: available surficial data, *Geol. en Mijn.* (Netherlands Journal of Geosciences), 80, 273–296.

Meletti, C., Galadini, F., Valensise, G., Stucchi, M., Basili, R., Barba, S., Vannucci, G., Boschi, E., 2007. The ZS9 seismic source model for the seismic hazard assessment of the Italian territory. *Tectonophysics*.

Merlini, S., Doglioni, C., Fantoni, R. & Ponton, M., 2002. Analisi strutturale lungo un profilo geologico tra la linea Fella-Sava e l’avampaese adriatico (Friuli Venezia Giulia-Italia), *Mem. Soc. Geol. It.*, 57, 293–300

Peruzza, L., Poli, M.E., Rebez, A., Renner, G., Rogledi, S., Slejko, D. & Zanferrari, A., 2002. The 1976–1977 seismic sequence in Friuli: new seismotectonic aspects, *Mem. Soc. Geol. It.*, 57, 391–400

Sirovich, L., Pettenati, F. & Bobbio, M., 2000. Inversione di intensità macro-sismiche per le faglie di terremoti storici, in *Le ricerche del GNDT nel campo della pericolosità sismica (1996–1999)*, pp. 237–245, eds Galadini, F., Meletti, C. & Rebez, A., CNR—Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti, Roma, Italy.

M. Sukan e L. Peruzza, Distretti Sismici del Veneto in *Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata* Vol. 52 n. 4 supplement., dicembre 2011

TRANSALP Working Group, 2002. First deep reflexion images of the Eastern Alps reveal giant crustal wedges and transcrustal ramps. *Geophysical Research Letters* Vol.29, N. 10, pp. 92-1 / 92-4.

Valensise, G., Pantosti, D. (Eds.), 2001a. Database of potential sources for earthquakes larger than M 5.5 in Italy. *Annali di Geofisica*, 44(4), Suppl., 797–964, with CD-ROM.

Zanferrari, A. et al., 1982. Evoluzione neotettonica dell'Italia nord-orientale, *Mem. Sc. Geol.*, 35, 355–376.

### **Per quanto riguarda i riferimenti bibliografici dei cataloghi sismici citati nel testo:**

**NT4.1** - Camassi R. e Stucchi M., 1998. NT4.1, un catalogo parametrico di terremoti di area italiana al di sopra della soglia del danno

**CPTI04 (maggio 2004)** - Gruppo di lavoro CPTI (2004). Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, versione 2004 (CPTI04), INGV, Bologna. <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI04/>

**CPTI11** - A. Rovida, R. Camassi, P. Gasperini e M. Stucchi (a cura di), 2011. *CPTI11, la versione 2011 del Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani*. Milano, Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI>

**DOM4.1** - Monachesi G. e Stucchi M.: "DOM4.1, un database di osservazioni macrosismiche di terremoti di area italiana al di sopra della soglia del danno"

**DBMI04** - Stucchi et alii. (2007). DBMI04, il database delle osservazioni macrosismiche dei terremoti italiani utilizzate per la compilazione del catalogo parametrico CPTI04. <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI04/>  
Quaderni di Geofisica, Vol 49, pp.38.

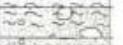
**DBMI11** - M. Locati, R. Camassi e M. Stucchi (a cura di), 2011. DBMI11, la versione 2011 del Database Macrosismico Italiano. Milano, Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/DBMI11>.

## 11 ALLEGATI

Gli allegati alla Relazione Illustrativa sono così suddivisi:

- **Allegati “Indagini Pregresse”** contengono le indagini pregresse già documentate nel P.A.T..
- **Allegati “Indagini MS”**: contengono le indagini realizzate ex novo:
  - Elaborati delle 8 prove sismiche con tecnica MASW – ReMI – Rifrazione - HVSR e 8 prove HVSR realizzate nell’ambito del presente studio di MS.

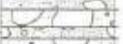
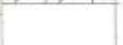
|                                    |                                           |
|------------------------------------|-------------------------------------------|
| <b>STRATIGRAFIA</b>                | <b>Denominazione: T 1</b>                 |
| Località: Ciano                    | Comune: Crocetta del Montello             |
| Committente:                       | Metodo di perforazione: Scavatore a benna |
| Data: 1986                         | Quota s.l.m. (m): 134.0                   |
| Profondità falda da p.c. (m): ass. | Profondità (m): 3.90                      |

| Scala 1:100 | Stratigrafia                                                                      | Profondita' | Descrizione                                                                                         | Pocket Pen. | Torvane | Campioni |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|---------|----------|
| 1           |  | 0.95        | terreno vegetale, limo con sabbia fine, deb. ghiaioso e argilloso, col. bruno-mar-<br>ron-rossastro |             |         |          |
| 2           |  | 1.50        | ghiaia con sabbia, limosa, ø max 25 cm, col. bruno rossastro                                        |             |         |          |
| 3           |  | 1.65        | ghiaia con sabbia                                                                                   |             |         |          |
| 4           |  | 3.90        | ghiaia deb. ciottolosa con sabbia, col. grigio giallo                                               |             |         |          |
| 5           |                                                                                   |             |                                                                                                     |             |         |          |
| 6           |                                                                                   | 6.00        |                                                                                                     |             |         |          |

- 1) la profondità è espressa in metri  
2) il Pocket Penetrometer è espresso in Kg/cm<sup>2</sup>  
3) il Torvane è espresso in Kg/cm<sup>2</sup>

Assistente: dr. geol. G. Marcolin

|                                    |                                           |
|------------------------------------|-------------------------------------------|
| <b>STRATIGRAFIA</b>                | <b>Denominazione: T 2</b>                 |
| Località: Nogarè                   | Comune: Crocetta del Montello             |
| Committente:                       | Metodo di perforazione: Scavatore a benna |
| Data: 1986                         | Quota s.l.m. (m): 150.0                   |
| Profondità falda da p.c. (m): ass. | Profondità (m): 3.80                      |

| Scala 1:100 | Stratigrafia                                                                        | Profondita' | Descrizione                                                                                         | Pocket Pen. | Torvane | Campioni |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|---------|----------|
| 1           |  | 0.90        | terreno vegetale, limo con sabbia fine, deb. ghiaioso e argilloso, col. bruno-mar-<br>ron-rossastro |             |         |          |
| 2           |  | 1.05        | ghiaia con sabbia, limosa, deb. ciottolosa, col. bruno rossastro                                    |             |         |          |
| 3           |  | 1.60        | ghiaia con ciottoli e sabbia                                                                        |             |         |          |
| 4           |  | 1.90        | ghiaia . ciottolosa con sabbia, col. grigio giallo                                                  |             |         |          |
| 5           |  | 2.10        | ghiaia con sabbia                                                                                   |             |         |          |
| 6           |  | 3.80        | ghiaia con ciottoli e sabbia, col. grigio                                                           |             |         |          |
| 5           |                                                                                     |             |                                                                                                     |             |         |          |
| 6           |                                                                                     | 6.00        |                                                                                                     |             |         |          |

- 1) la profondità è espressa in metri  
2) il Pocket Penetrometer è espresso in Kg/cm<sup>2</sup>  
3) il Torvane è espresso in Kg/cm<sup>2</sup>

Assistente: dr. geol. G. Marcolin

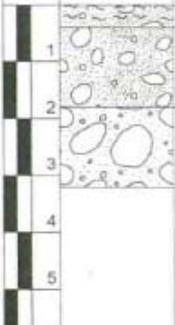
|                                    |                                           |
|------------------------------------|-------------------------------------------|
| <b>STRATIGRAFIA</b>                | <b>Denominazione: T 3</b>                 |
| Località: Crocetta                 | Comune: Crocetta del Montello             |
| Committente:                       | Metodo di perforazione: Scavatore a benna |
| Data: 1986                         | Quota s.l.m. (m): 148.6                   |
| Profondità falda da p.c. (m): ass. | Profondità (m): 3.10                      |

| Scala 1:100 | Stratigrafia                                                                      | Profondità' | Descrizione                                                                               | Pocket Pen. | Torvane | Campioni |
|-------------|-----------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|---------|----------|
| 1           |  | 0.40        | terreno vegetale, limo con sabbia fine, ghiaioso e argilloso, col. bruno-marron-rossastro |             |         |          |
|             |                                                                                   | 0.70        | ghiaia con sabbia, limosa e argillosa, deb. ciottolosa, col. bruno rossastro              |             |         |          |
|             |                                                                                   | 1.80        | ghiaia e sabbia con ciottoli                                                              |             |         |          |
|             |                                                                                   | 3.10        | ghiaia con ciottoli e sabbia, ø max 25 cm, col. giallo grigio                             |             |         |          |
|             |                                                                                   | 6.00        |                                                                                           |             |         |          |

- 1) la profondità è espressa in metri
- 2) il Pocket Penetrometer è espresso in Kg/cm<sup>2</sup>
- 3) il Torvane è espresso in Kg/cm<sup>2</sup>

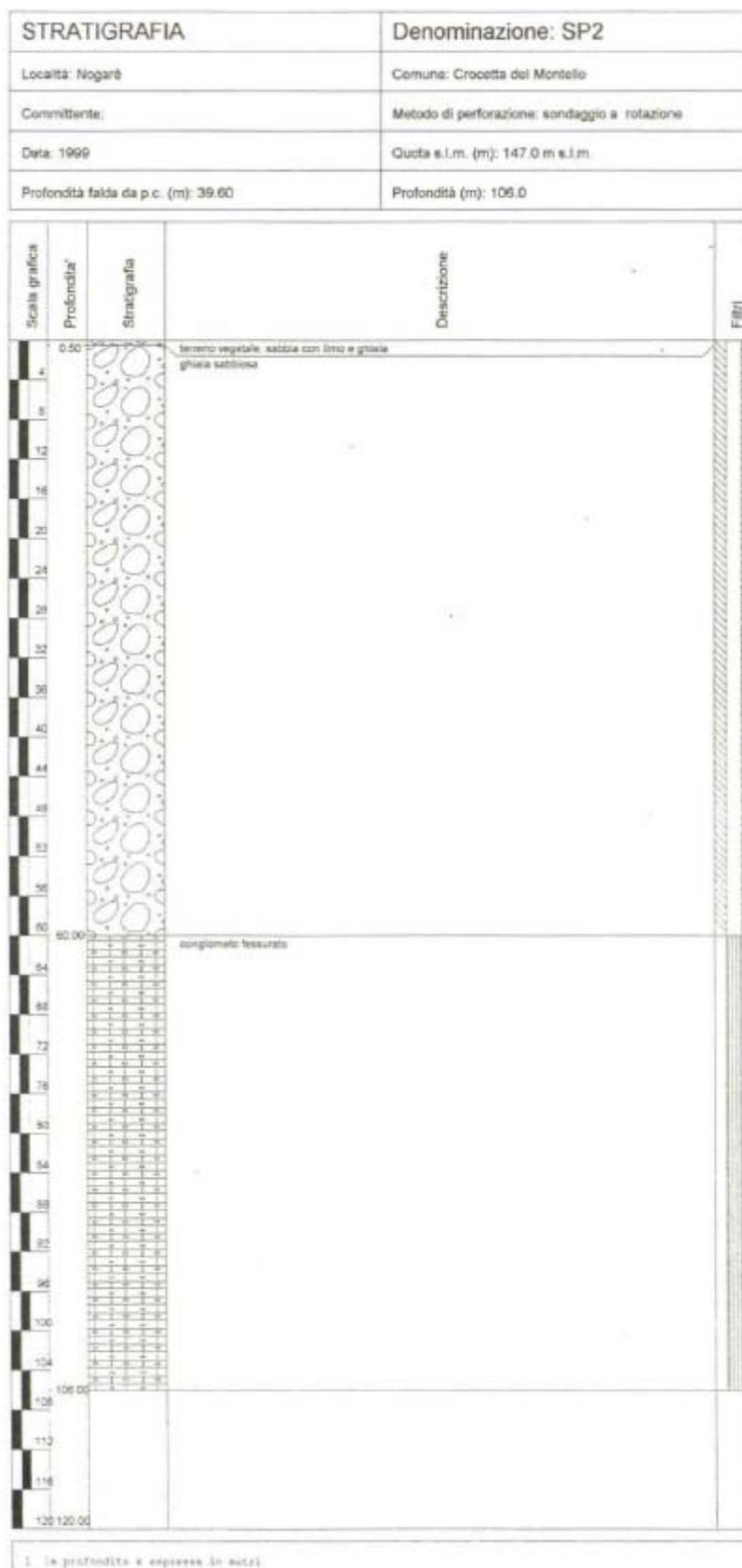
Assistente: dr. geol. G. Marcolin

|                                    |                                           |
|------------------------------------|-------------------------------------------|
| <b>STRATIGRAFIA</b>                | <b>Denominazione: T 4</b>                 |
| Località: Crocetta                 | Comune: Crocetta del Montello             |
| Committente:                       | Metodo di perforazione: Scavatore a benna |
| Data: 1986                         | Quota s.l.m. (m): 148.6                   |
| Profondità falda da p.c. (m): ass. | Profondità (m): 3.20                      |

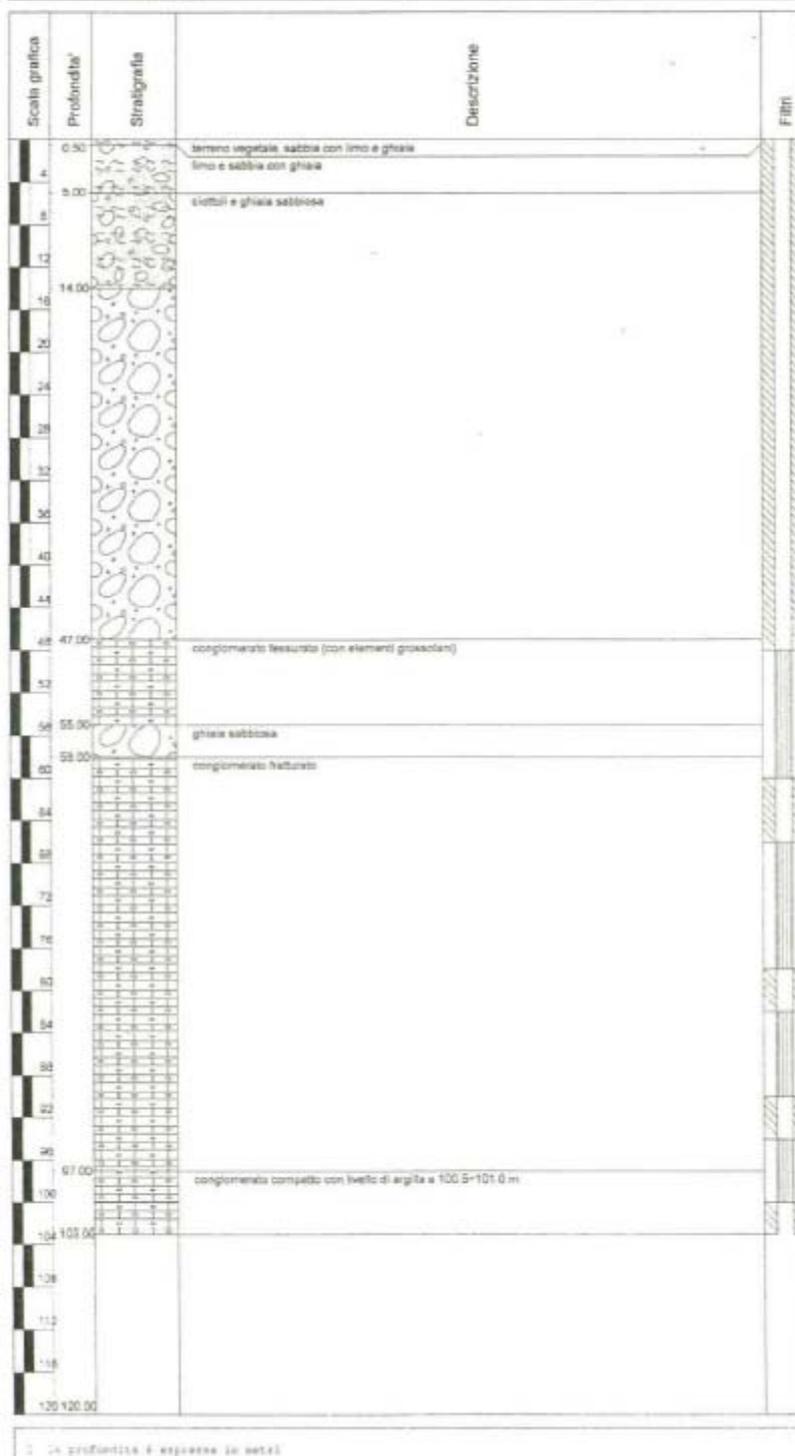
| Scala 1:100 | Stratigrafia                                                                        | Profondità' | Descrizione                                                                               | Pocket Pen. | Torvane | Campioni |
|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|---------|----------|
| 1           |  | 0.40        | terreno vegetale, limo con sabbia fine, ghiaioso e argilloso, col. bruno-marron-rossastro |             |         |          |
|             |                                                                                     | 1.80        | ghiaia con sabbia, limosa e argillosa, deb. ciottolosa, col. bruno rossastro              |             |         |          |
|             |                                                                                     | 3.20        | ghiaia e sabbia con ciottoli, ø max 30 cm                                                 |             |         |          |
|             |                                                                                     | 6.00        |                                                                                           |             |         |          |

- 1) la profondità è espressa in metri
- 2) il Pocket Penetrometer è espresso in Kg/cm<sup>2</sup>
- 3) il Torvane è espresso in Kg/cm<sup>2</sup>

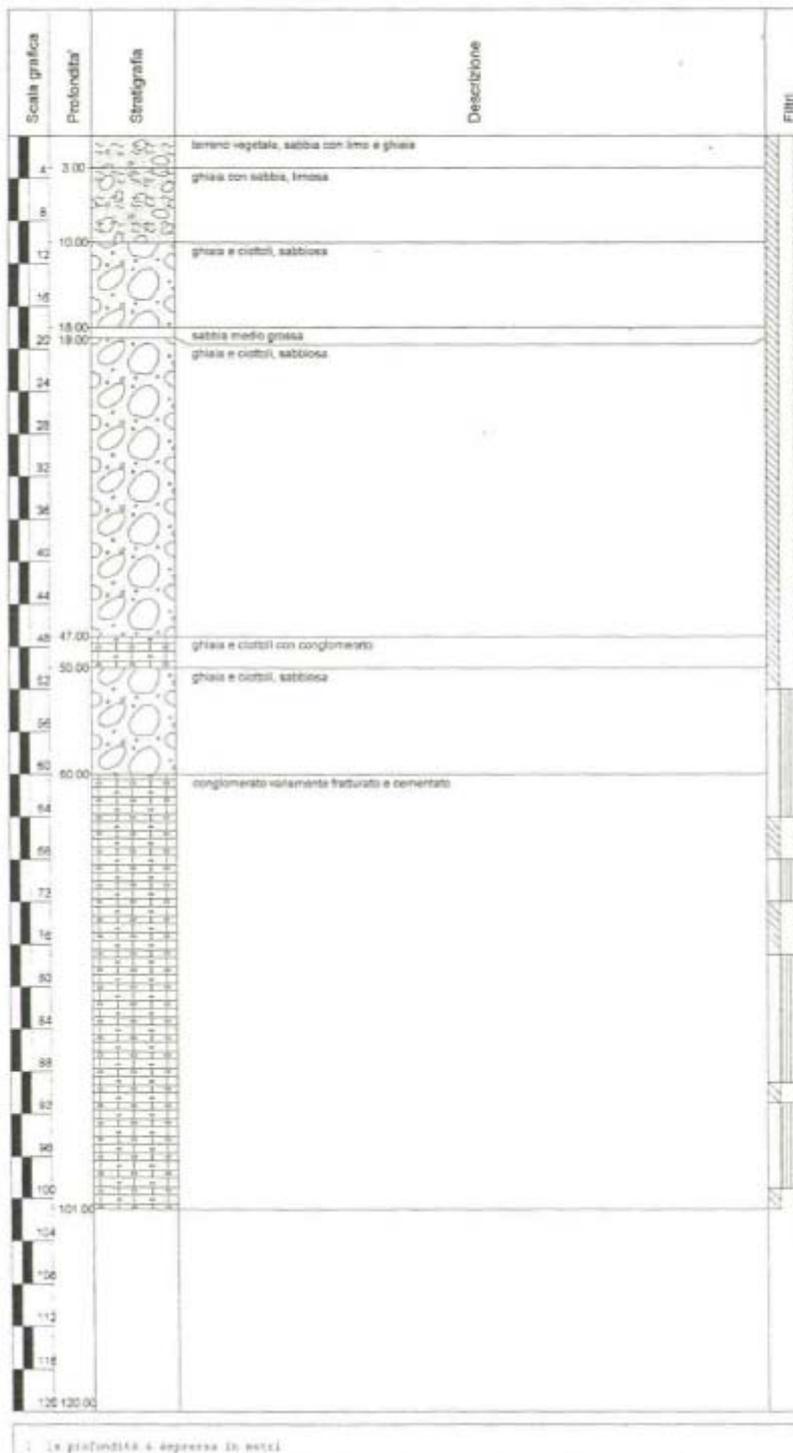
Assistente: dr. geol. G. Marcolin



|                                    |                                               |
|------------------------------------|-----------------------------------------------|
| <b>STRATIGRAFIA</b>                | <b>Denominazione: SP3</b>                     |
| Località: Crocetta                 | Comune: Comuda                                |
| Committente: Consorzio Schieverin  | Metodo di perforazione: sondaggio a rotazione |
| Data:                              | Quota s.l.m. (m): 152.9 m s.l.m.              |
| Profondità falda da p.c. (m): 36.0 | Profondità (m): 103.0                         |



|                                    |                                               |
|------------------------------------|-----------------------------------------------|
| <b>STRATIGRAFIA</b>                | <b>Denominazione: SP4</b>                     |
| Località: Crocetta                 | Comune: Crocetta del Montello                 |
| Committente: Consorzio Schievenin  | Metodo di perforazione: sondaggio a rotazione |
| Data:                              | Quota s.l.m. (m): 155.0 m s.l.m.              |
| Profondità falda da p.c. (m): 40.0 | Profondità (m): 101.0                         |



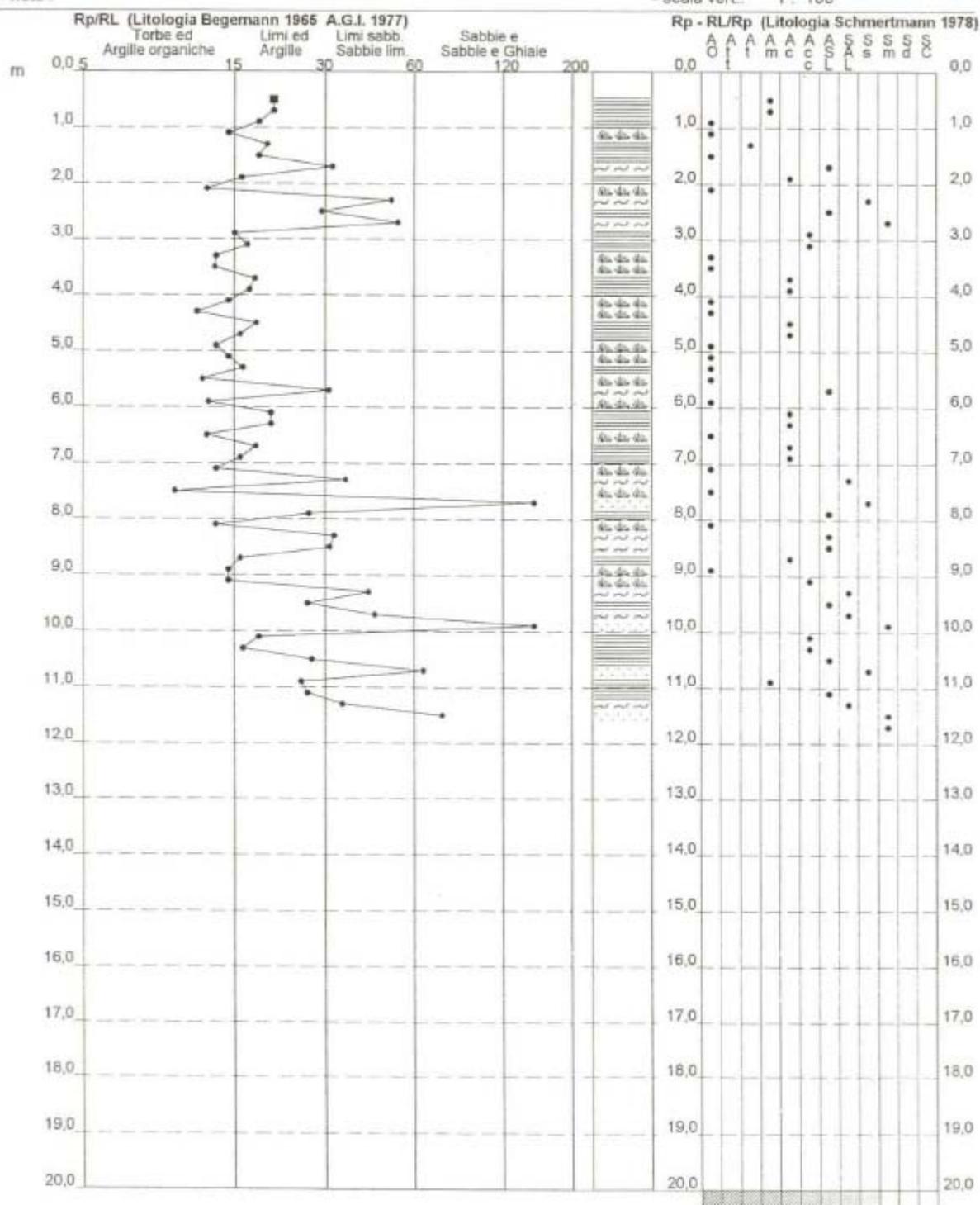
# PROVA PENETROMETRICA STATICA VALUTAZIONI LITOLOGICHE

CPT C7

2.010496-109

- committente : Comune di Crocetta  
- lavoro :  
- località : Montello - Via Lollini  
- note :

- data : 30/12/1899  
- quota inizio : 295,5 m s.l.m.  
- prof. falda : Falda non rilevata  
- scala vert. : 1 : 100



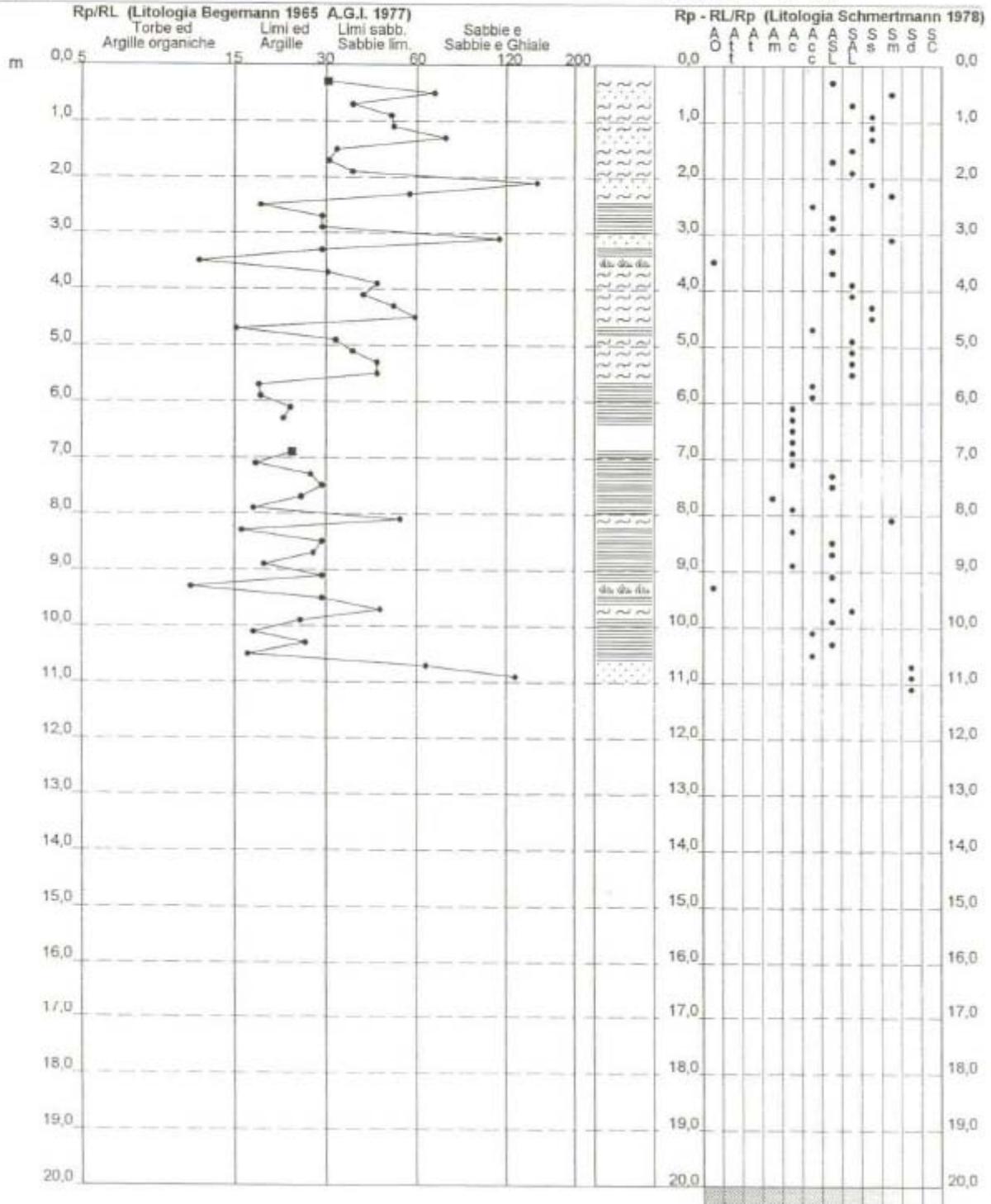
# PROVA PENETROMETRICA STATICA VALUTAZIONI LITOLOGICHE

## CPT C6

2.010496-109

- committente : Comune di Crocetta  
 - lavoro :  
 - località : Montello - Via Lollini  
 - note :

- data : 05/08/1992  
 - quota inizio : 295.5 m s.l.m.  
 - prof. falda : Falda non rilevata  
 - scala vert. : 1 : 100



**STUDIO TECNICO DI GEOLOGIA APPLICATA ALL'INGEGNERIA**  
dott. geol. SIMONE BORTOLINI via San Vito, 9/A Cison di Valmarino (TV)  
tel. 338-1977870  
e-mail simonebortolini@libero.it

---

# Relazione

## Sismica a Rifrazione - MASW – ReMi - HVSr

per la definizione del profilo verticale Vs e parametro Vs30

---

# CDM\_SMC 1

## CROCETTA DEL MONTELLO (TV)

### Viale Antonini

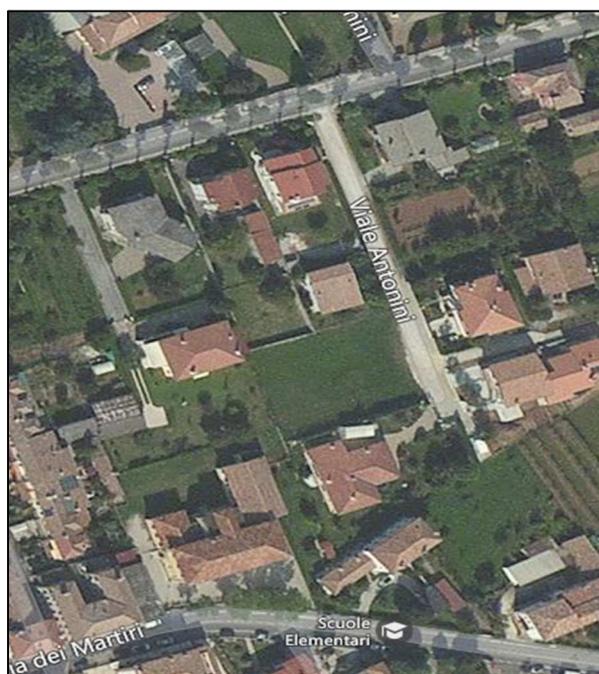
Coordinate WGS84

Lat. N 45,833641 Long. E 12,035713

Coordinate ED50

Lat. N 45,834540 Long. E 12,036713

---



il Geologo

dott. Simone Bortolini

# Introduzione

Al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame è stata effettuata una serie di acquisizioni MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves, analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva – e.g. Park et al., 1999) e ReMi (Refraction Microtremor -Louie, 2001) utili a definire il profilo verticale della  $V_s$  (velocità di propagazione delle onde di taglio) oltre alla tradizionale sismica a rifrazione.

## 1. Interpretazione di stendimenti di sismica a rifrazione

Questo metodo, di semplice applicazione, è utilizzabile nel caso di strati orizzontali o con inclinazione uniforme e in presenza di una superficie topografica, almeno lungo lo stendimento, orizzontale. Si parte inoltre dal presupposto che la velocità dei rifrattori aumenti con la profondità. In pratica si dovrà verificare che la velocità delle onde P nel primo strato sia minore della velocità delle onde P nel secondo, a sua volta inferiore a quella del terzo, ecc. ( $V_1 < V_2 < V_3$ ).

## 2. Tecnica di misurazione e interpretazione MASW

La tecnica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves - Park et al., 1999) è un metodo d'indagine geofisica, sviluppato e diffuso negli ultimi dieci anni circa, che sfrutta le modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare delle onde di Rayleigh, generate da sorgenti artificiali (mazza battente o scoppio). Le onde di Rayleigh si muovono lungo l'interfaccia terra-aria e sono generate dalla rifrazione e riflessione multipla di onde di compressione (P) e onde di taglio che si propagano in direzione verticale (SV).

## 3. Tecnica di misurazione e interpretazione ReMi

La tecnica ReMi (Refraction Microtremor) è un metodo d'indagine geofisica che sfrutta invece le modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare delle onde di Rayleigh, generate però da sorgenti ambientali.

A differenza di quanto avviene nell'indagine eseguita con la tecnica MASW, dove la posizione delle sorgenti è nota ed è allineata allo stendimento, nel caso del ReMi i punti di origine dei microtremori sono spesso non identificabili. Quindi la registrazione viene protratta per tempi più lunghi. Essendo la potenza associata al segnale utile comparabile con quella del rumore di fondo è necessario rilevare un numero di tremori molto elevato, questo sarà ottenibile semplicemente andando a allungare i tempi di registrazione del segnale. A differenza dei pochi secondi necessari per acquisizioni MASW sono qui necessari da alcuni a molti minuti di acquisizione (in genere 10 - 20 minuti sono sufficienti).

I principi teorici e gli aspetti di acquisizione ed elaborazione dei dati sono sostanzialmente gli stessi della tecnica MASW con la differenza che con ReMi si ha una maggior definizione degli strati profondi.

## 4. Tecnica di misure ed interpretazione HVSR (tramite TROMINO)

Tale prospezione sismica si basa sull'acquisizione e sull'analisi del Rumore Sismico Ambientale (Seismic Noise) ovvero la continua vibrazione del suolo dovuta sia a cause antropiche che naturali. Questa tipologia di tecniche (definite metodi sismici passivi), dunque, non ha bisogno

di alcuna energizzazione esterna poiché utilizza come sorgente il traffico veicolare, la produzione industriale, il vento, la pioggia e tutto ciò che è in grado di produrre una minima vibrazione sulla superficie del suolo.

In particolar modo con la tecnica a “ Stazione Singola” viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero “Horizontal to Vertical Spectral Ratios) (Nakamura, Y. [1989]). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno e individuare la frequenza fondamentale ( $f$ ) di questa vibrazione. Sapendo che in generale esiste una relazione semplice fra  $f$ , lo spessore della parte più soffice del terreno (ovvero la parte di materiali sovrastante il bed-rock) e la velocità media ( $V_s$ ) delle onde sismiche nel sottosuolo, attraverso le misure HVSR è possibile risalire allo spessore di questo strato. Si possono inoltre effettuare delle considerazioni di tipo “qualitativo” molto utili in merito a possibili interferenze tra le frequenze risonanti del suolo e degli edifici sovrastanti.

Per la valutazione del periodo proprio di risonanza del sottosuolo è stata utilizzata la tecnica a stazione singola Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Kanai, 1957; Igarashi 1970; Nakamura 1989) che permette di estrarre informazioni relative alla frequenza di vibrazione del suolo a partire dagli spettri di rumore sismico registrati in sito. La tecnica prevede di calcolare il rapporto, in funzione della frequenza, tra gli spettri di risposta della componente orizzontale e verticale del moto dovuto ai microtremori ambientali. La misura di rumore sismico della durata di 26 minuti per ogni punto di misura è stata eseguita con una frequenza di campionamento a 128 Hz.

## 5. Strumentazione impiegata

### Hardware

L’acquisizione dati per l’elaborazione MASW, ReMI e sismica a rifrazione è avvenuta tramite sismografo a 24 canali (mod. Dolang Geophysical DBS280 24 bit 24 canali) collegato a geofoni verticali a frequenza propria di 4.5Hz.

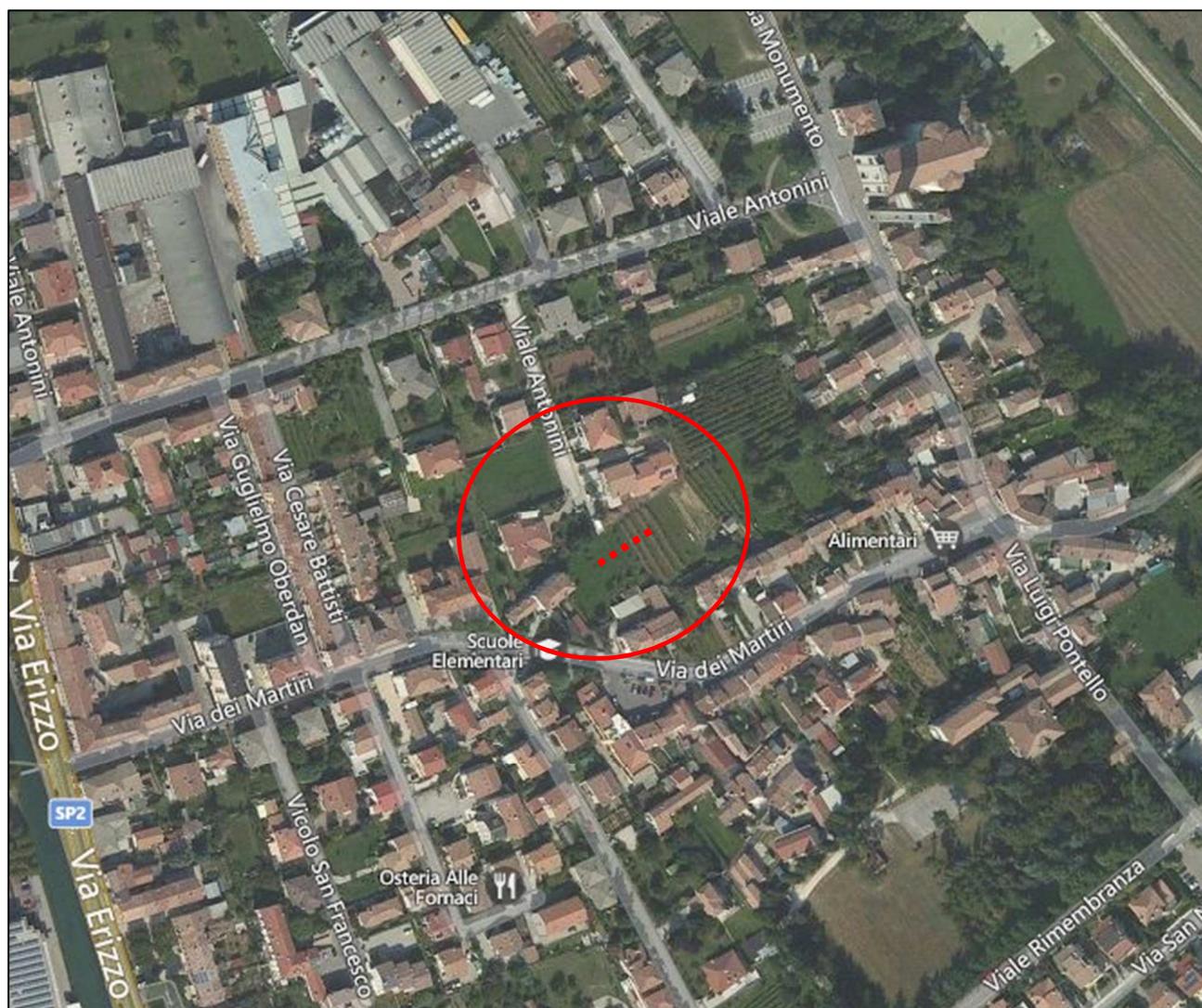
È stato utilizzato un tromografo digitale modello “Tromino” (Micromed srl) avente un intervallo di acquisizione sulle frequenze da 0.1 a 256 Hz, dotato di sistema di acquisizione digitale ad alta risoluzione (24 bit) e primo-processing interno. La livellazione micrometrica dello strumento è stata assicurata per ogni misura tramite bolla di precisione agendo sui tre punti di appoggio (punte) ed orientando uno dei 3 sensori di acquisizione (ortogonali tra loro) verso il N magnetico.

### Software

Per le analisi dei dati acquisiti si sono adottati i software GeoMASW , GeoReMi, SismaCon di ProgramGeo (Brescia) e il software Grilla.

## Sito Stendimento Sismico St<sub>1</sub>

L'immagine a seguire mostra l'ubicazione dell'indagine denominata 'St<sub>1</sub>' ( ..... ) per lo stendimento sismico effettuato ai fini della classificazione sismica del suolo.



Lo stendimento sismico geofonico lineare multicanale con geofoni verticali (4.5 Hz) è stato posizionato e utilizzato per le prospezioni sismiche tipo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), ReMI (Refraction Microtremor) e Sismica a Rifrazione, analizzano le onde di superficie.

## Dati sperimentali (St<sub>1</sub>)

|                                               |        |
|-----------------------------------------------|--------|
| Numero di ricevitori .....                    | 24     |
| Distanza tra i sensori: .....                 | 2 m    |
| Numero di campioni temporali.....             | 2048   |
| Passo temporale di acquisizione.....          | 0.6 ms |
| Numero di ricevitori usati per l'analisi..... | ...24  |

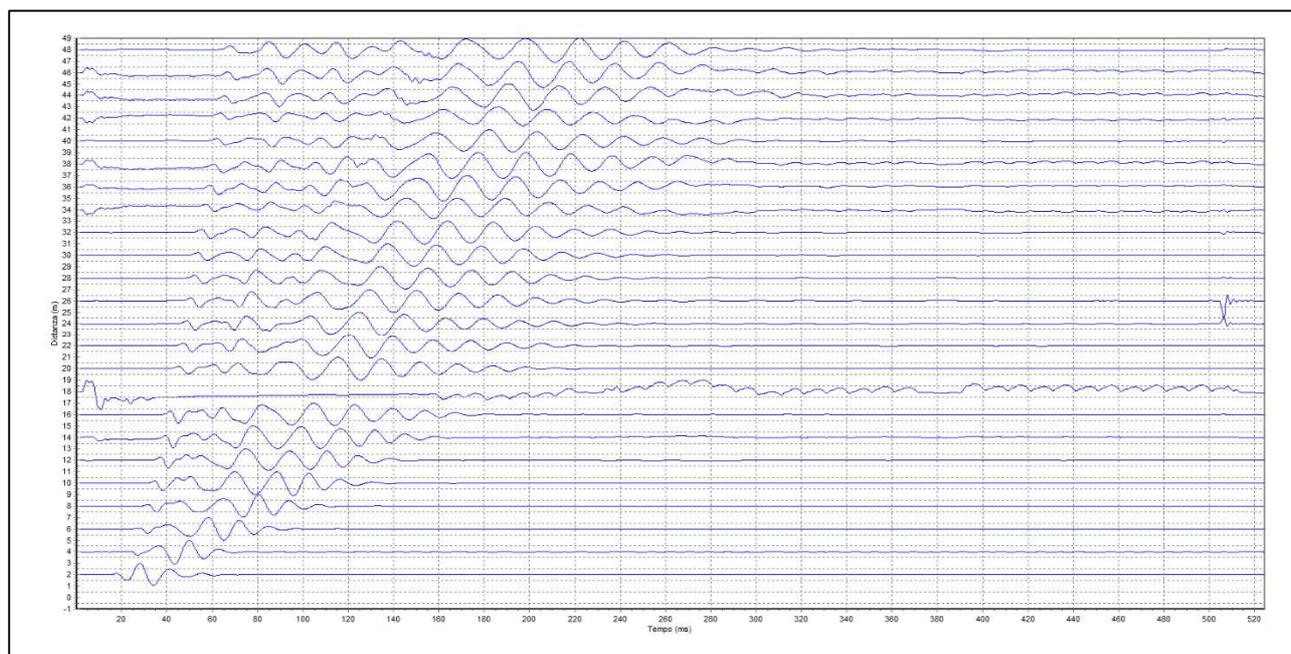


Figura 1.1: Tracce sperimentali tiro diretto

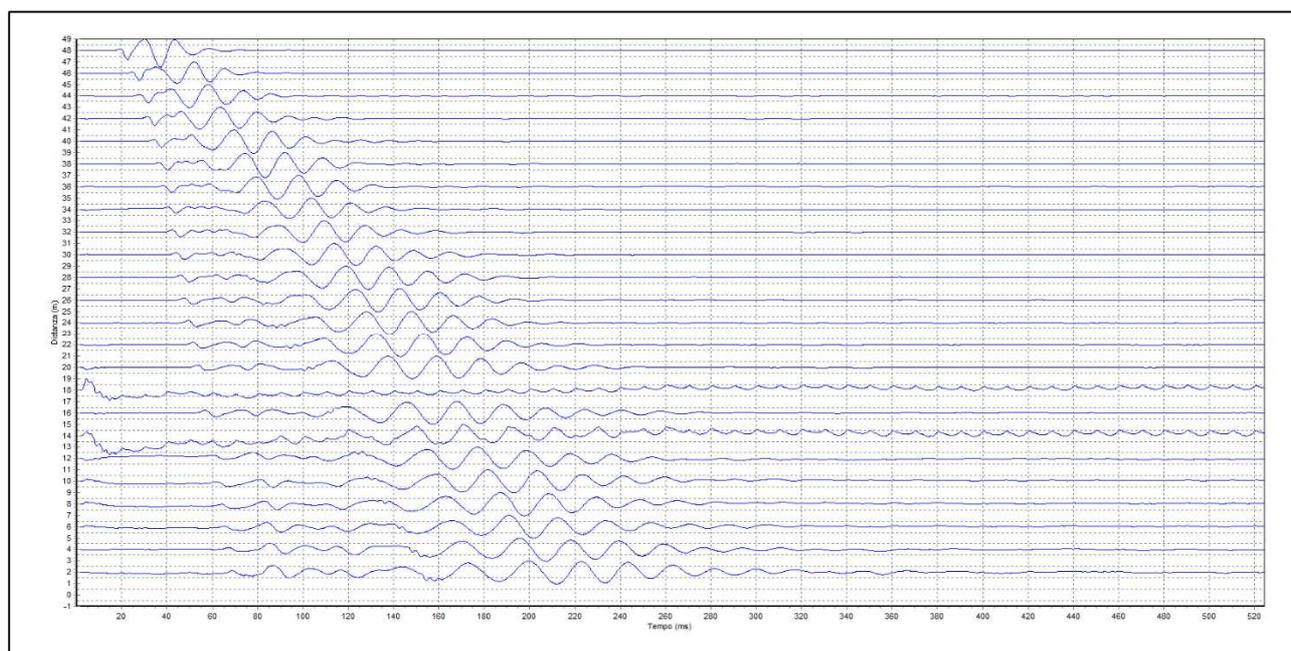


Figura 1.2: Tracce sperimentali tiro coniugato

## Sismica a rifrazione 1

L'interpretazione è stata effettuata sulla base di due sorgenti (mazza su piattello di battuta) poste rispettivamente 2 metri prima del primo geofono e 2 m oltre l'ultimo geofono.

Il metodo utilizzato è il Metodo convenzionale (metodo del tempo di ritardo - delay time); tale metodo è utilizzabile nel caso di strati orizzontali o con inclinazione uniforme e in presenza di una superficie topografica, almeno lungo lo stendimento, orizzontale. Si parte inoltre dal presupposto che la velocità dei rifrattori aumenti con la profondità. In pratica si dovrà verificare che la velocità delle onde P nel primo strato sia minore della velocità delle onde P nel secondo, a sua volta inferiore a quella del terzo, ecc. ( $V_1 < V_2 < V_3$ ), così come nel caso in esame.

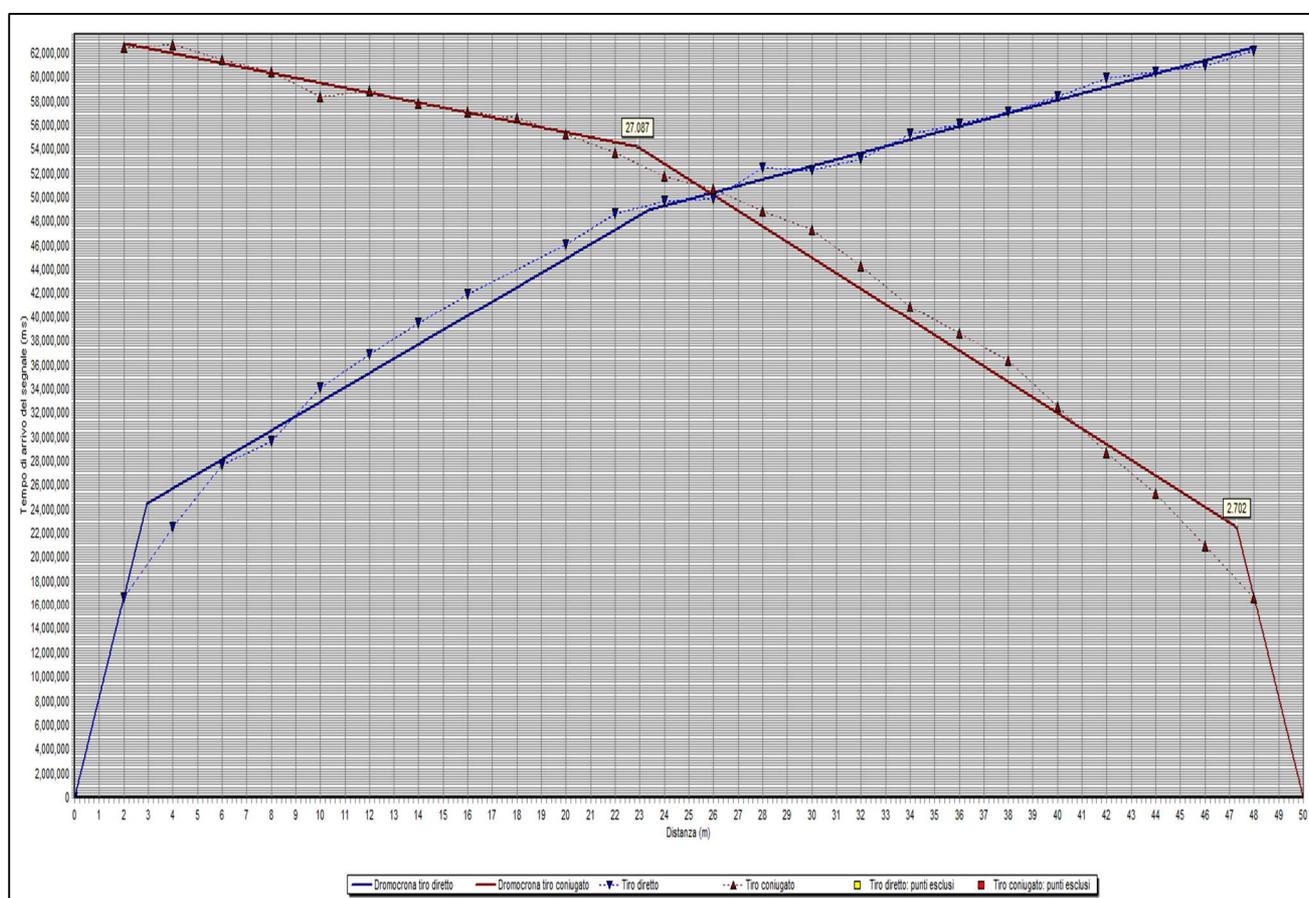


Figura 1.3: gráfico general curva distancia-tempo

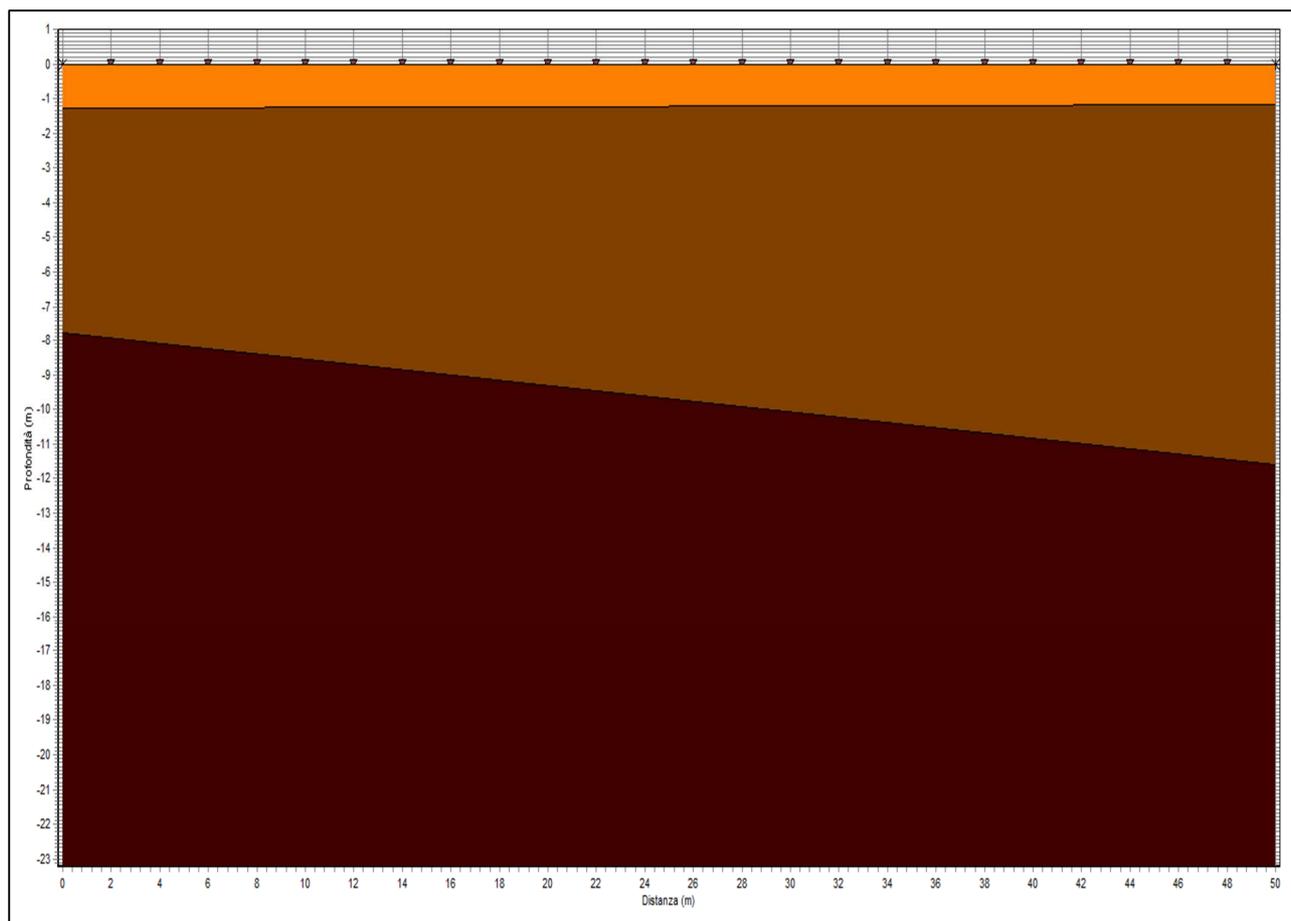


Figura 1.4: Sezione stratigrafica interpretata

La sezione stratigrafica è stata interpretata sulla base dei valori delle velocità delle onde P considerando il profilo topografico orizzontale e gli strati inclinati in maniera pseudo-uniforme.

| Strato n. | Vp (m/s) | Hs(m) | Hd(m)  | rd    | ri    |
|-----------|----------|-------|--------|-------|-------|
| 1         | 744      | 1.273 | 1.153  | 1     | 1     |
| 2         | 1024     | 7.774 | 11.611 | 0.984 | 0.987 |
| 3         | 1218     |       |        | 0.993 | 0.974 |

**LEGENDA:**

Hs = spessore strato lato sinistro;

Hd = spessore strato lato destro;

Vp = velocità delle onde P.

Vs = velocità delle onde S.

rd = coefficiente correlazione tiro diretto

ri = coefficiente correlazione tiro inverso

# Analisi MASW 1

Frequenza minima .....15 Hz

Frequenza massima .....50 Hz

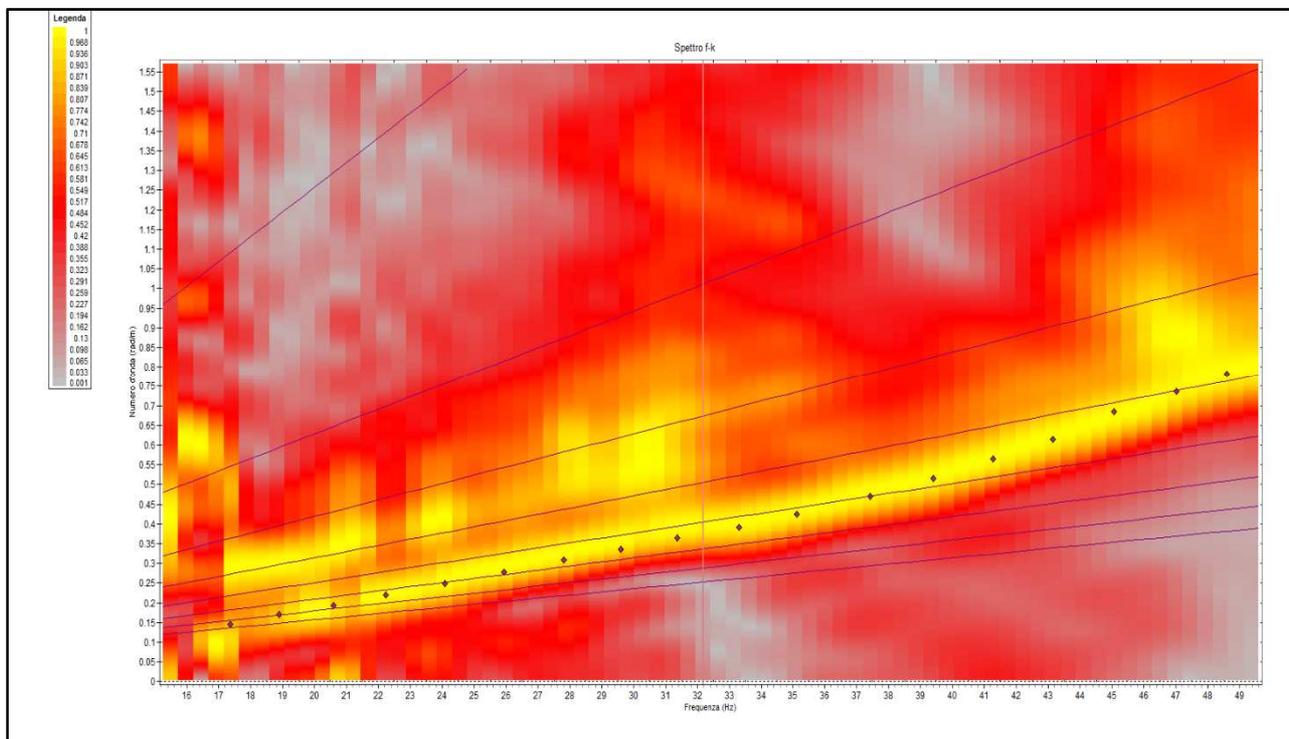


Figura 1.5: Spettro f – k

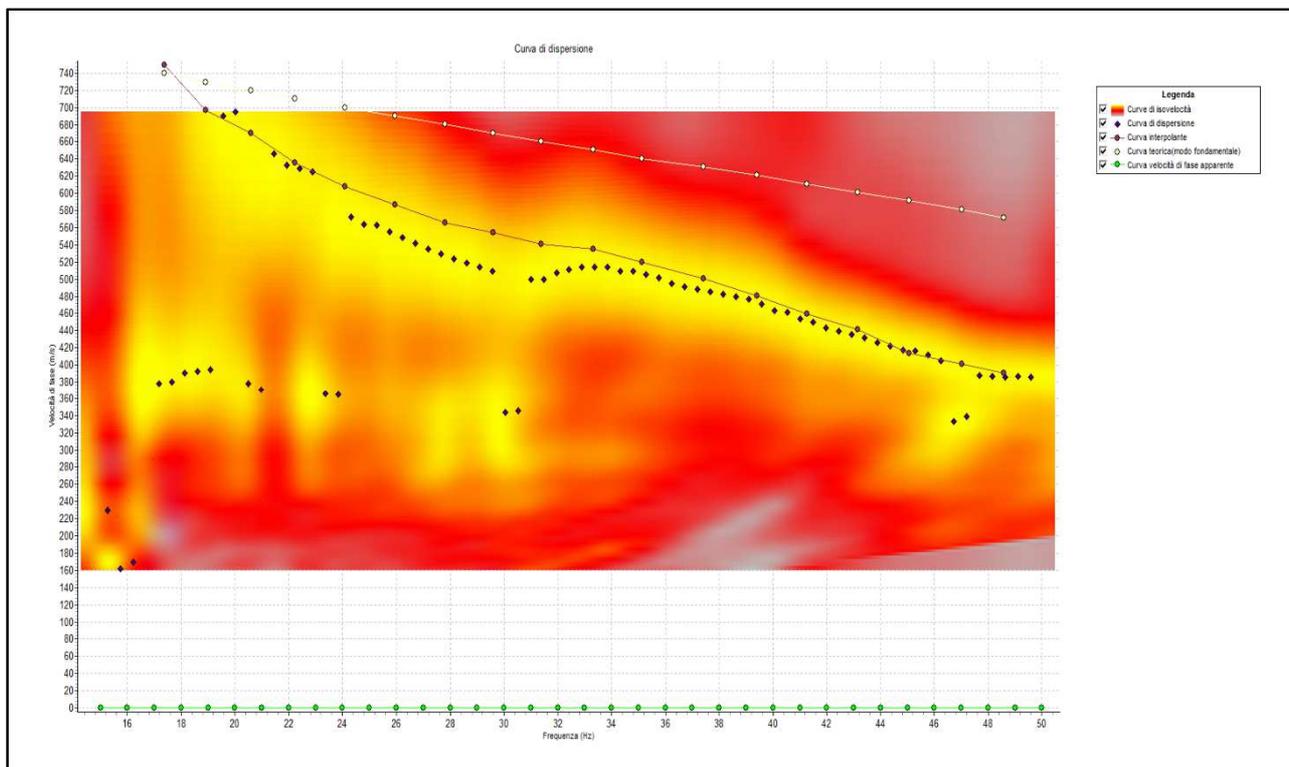


Figura 1.6: Curva di dispersione

L'interpretazione utilizza un algoritmo di inversione che consente di generare una curva di dispersione teorica una volta inserito un modello stratigrafico iniziale del terreno fino alla profondità desiderata e le caratteristiche del semispazio elastico di riferimento.

Procedendo per tentativi, secondo la procedura di Dunkin (1965) modificata da Watson (1970), il programma modifica in automatico il modello iniziale fino a quando lo scarto quadratico medio calcolato fra curva sperimentale e teorica non scende sotto un valore di soglia impostato e modificabile dall'operatore.

Poiché generalmente il metodo empirico genera in automatico un numero elevato di strati, si semplifica il modello iniziale generato mediando i livelli con valori di Vs simili.

|                                            |     |
|--------------------------------------------|-----|
| Numero di strati (escluso semispazio)..... | 4   |
| Spaziatura ricevitori [m].....             | 2 m |
| Numero ricevitori .....                    | 24  |

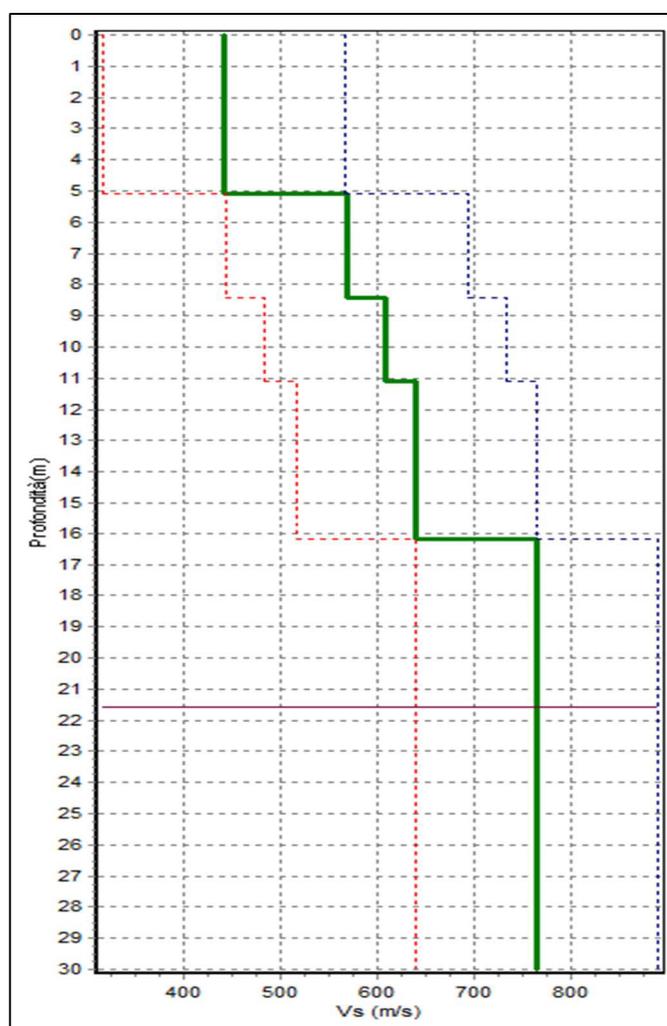


Figura 1.7: Profilo Vs numerico

La sezione stratigrafica risulta attendibile fino a circa 21-22 m di profondità; oltre tale valore il segnale risulta troppo disturbato anche se si può intuire un aumento dei valori di velocità con la profondità.

## Analisi ReMi 1

|                                               |     |
|-----------------------------------------------|-----|
| Numero di ricevitori .....                    | 24  |
| Distanza tra i sensori: .....                 | 2 m |
| Numero di ricevitori usati per l'analisi..... | 24  |

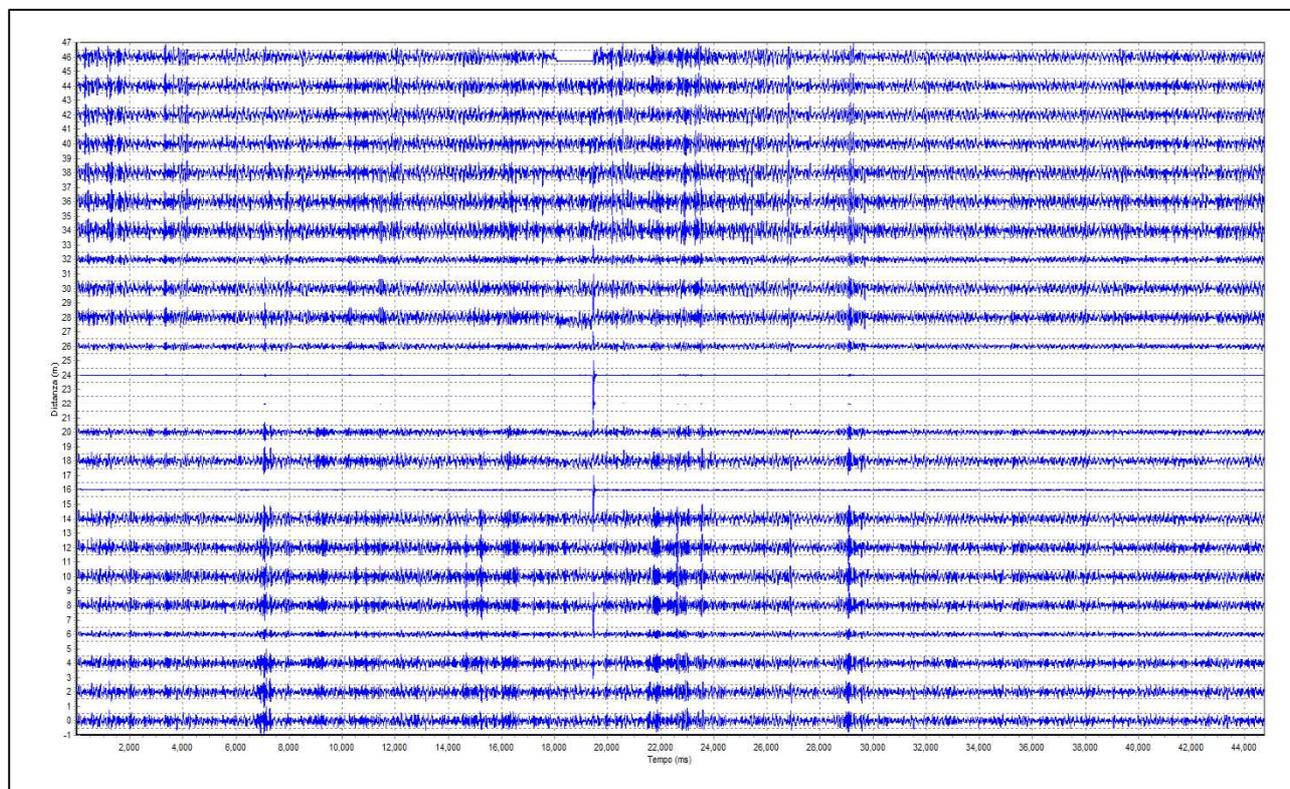


Figura 2.1: Tracce sperimentali

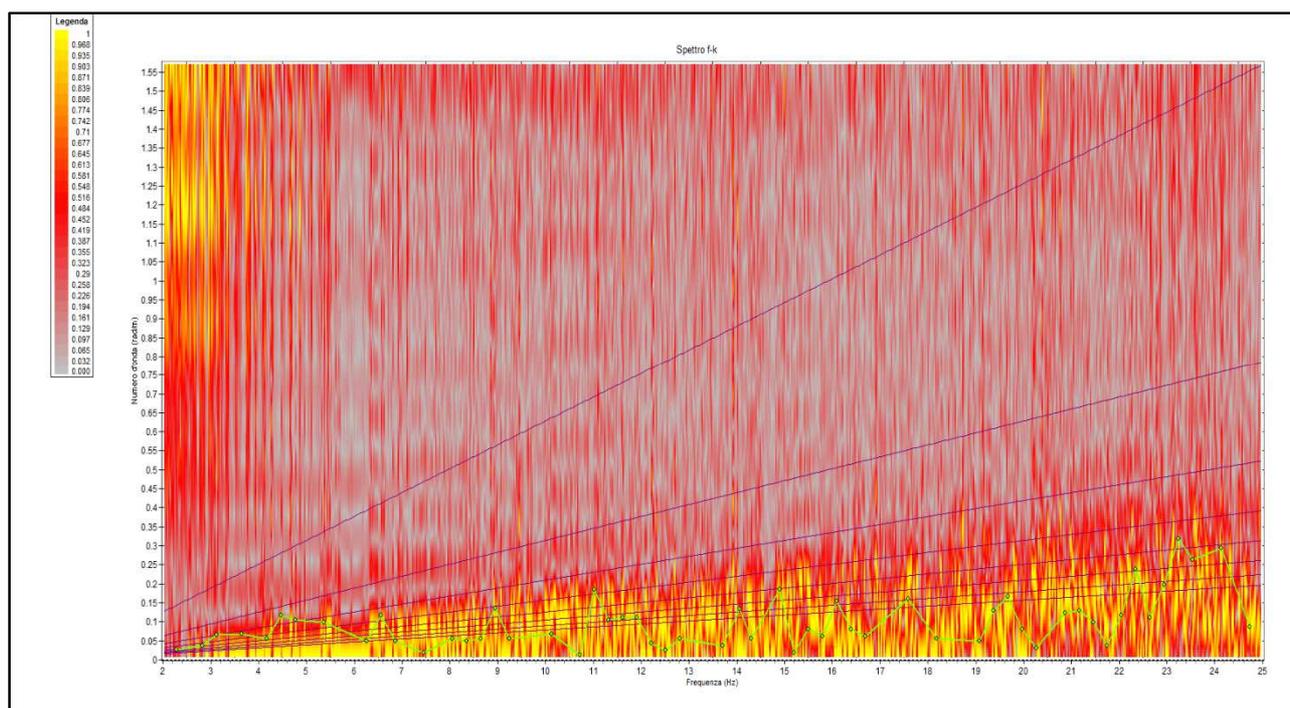


Figura 2.2: Spettro  $f - k$

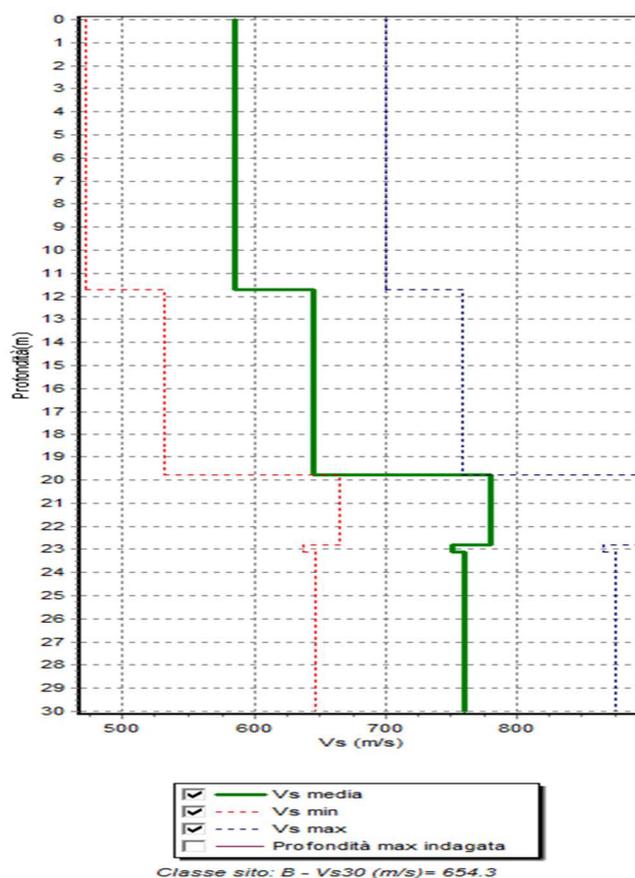


Figura 2.3: Profilo ReMi Vs numerico

## Conclusioni (St<sub>1</sub>)

Secondo la misura sperimentale effettuata e la modellazione del sottosuolo elaborata dal trattamento dei dati con i tre metodi appena descritti, per lo stendimento sismico St<sub>1</sub> si individuano materiali sciolti di media consistenza caratterizzati da velocità delle onde sismiche di taglio tipiche di materiali granulari medio fini.

In sintesi viene riportata una stratigrafia sismica di massima del sito indagato:

| Profondità (m) | Vs (m/s) | Considerazioni  |
|----------------|----------|-----------------|
| 0 – 11 m       | 580      | Ghiaie          |
| 11 - 20 m      | 640      | Ghiaie compatte |
| 20 - 30 m      | 740      | Ghiaie compatte |

## Periodo proprio di risonanza del suolo (HV<sub>1</sub>)

La foto aerea mostra l'ubicazione della indagine denominata HV<sub>1</sub> (  ) indicante il punto di acquisizione di rumore sismico ambientale finalizzata alla definizione del periodo proprio del suolo.



Nello studio specifico degli effetti di sito, la frequenza di campionamento utilizzata è di 128 Hz, con tempi di misura dell'ordine di 26 minuti.

Per la misura, oltre allo spettro H/V, è palesata la trasformata delle singole componenti, l'analisi direzionale e temporale del rumore sismico acquisito.

# Analisi HV<sub>1</sub>

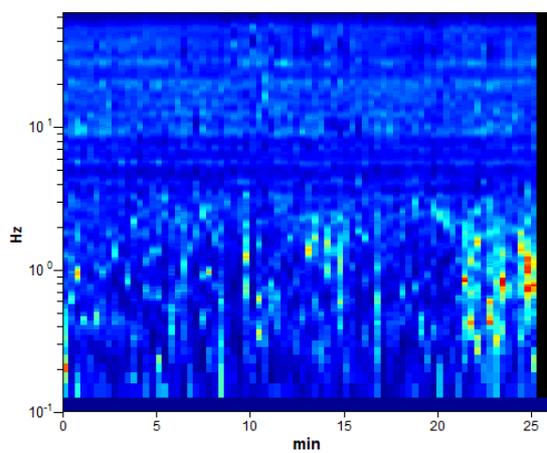


Figura 3.1: analisi temporale del rumore

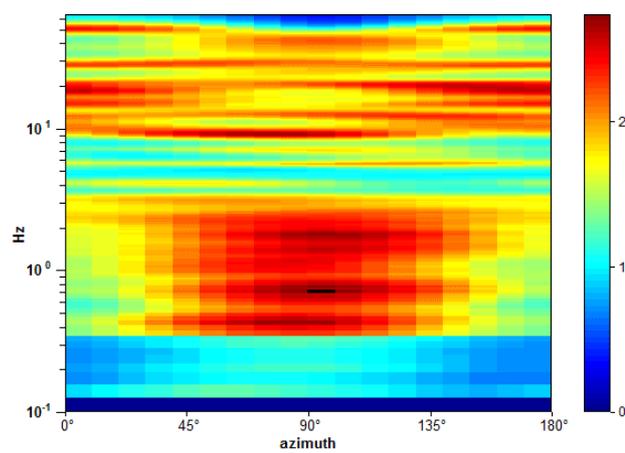


Figura 3.2: analisi direzionale del rumore

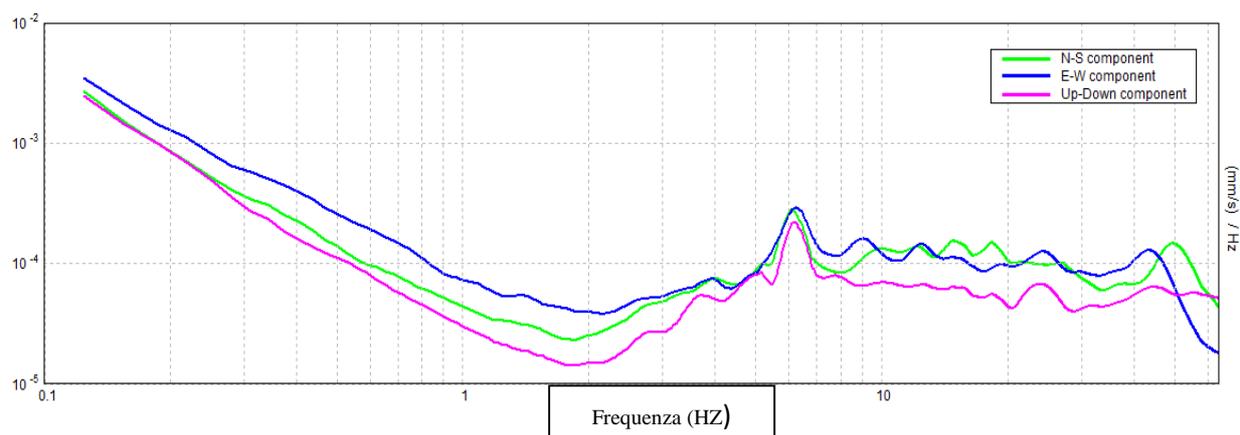


Figura 3.3: spettri delle 3 componenti

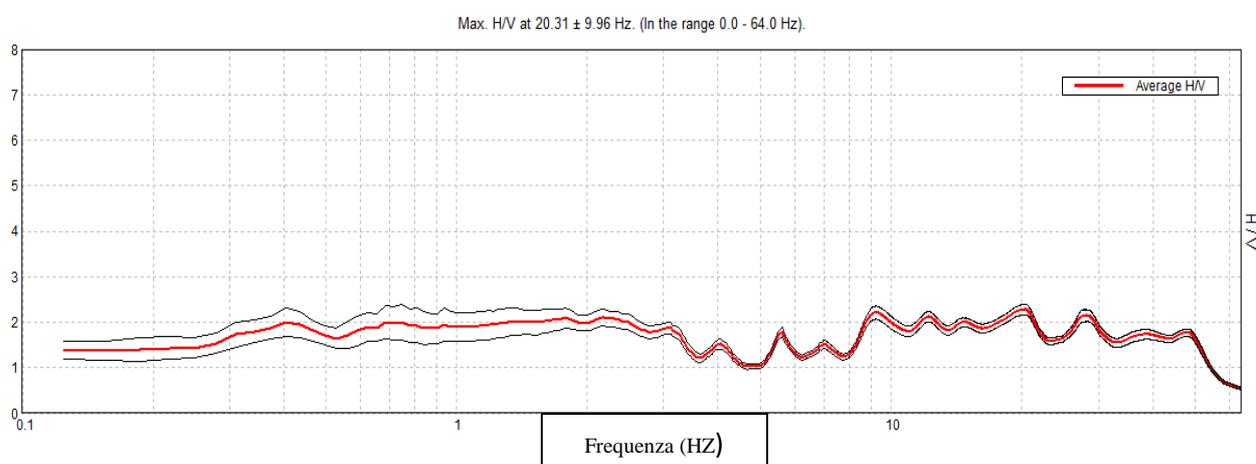


Figura 3.4: rapporto H/V

Una delle misure effettuate (HV) ha subito notevole influenza da rumore antropico. Tutte le tracce escludono la presenza di un netto contrasto di impedenza acustica nel sottosuolo. Non si individuano picchi di risonanza.

In termini di interpretazione del contrasto di impedenza acustica responsabile, eventuali picchi riscontrati, adottando secondo l'ipotesi  $\lambda/4$  una funzione di trasferimento di tipo:

$$F(\omega) = 1/\cos(\omega H/V_s)$$

La frequenza naturale ( $F_n$ ) di vibrazione dello strato di terreno corrisponde ai massimi della funzione di amplificazione:

$$F_n = \omega_n / 2\pi (V_s/4H)$$

con H profondità del rifrattore e  $V_s$  velocità delle onde sismiche di taglio, si può imporre la risonanza del sistema secondo la seguente relazione con T periodo proprio del suolo:

$$T = 2\pi/\omega = 4H/V_s$$

La situazione più pericolosa in termini di fenomeni di amplificazione si verifica quando la frequenza dell'eccitazione armonica ( $\omega$ ) è pari ad una delle frequenze fondamentali dello strato ( $\omega_n$ ). Quando si verifica tale condizione ( $\omega = \omega_n$ ) si ha la risonanza dello strato, ed il fattore di amplificazione è teoricamente infinito. È quindi di fondamentale importanza porre attenzione ai fenomeni di "doppia risonanza", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei fabbricati.

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

$$\text{Freq. Naturale edificio} \approx 10 \text{ Hz} / \text{numero piani}$$

È la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

$$\text{Freq. naturale edificio} = \text{Freq. fondamentale di risonanza del sito}$$

ad essere particolarmente pericolosa, poiché dà luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.

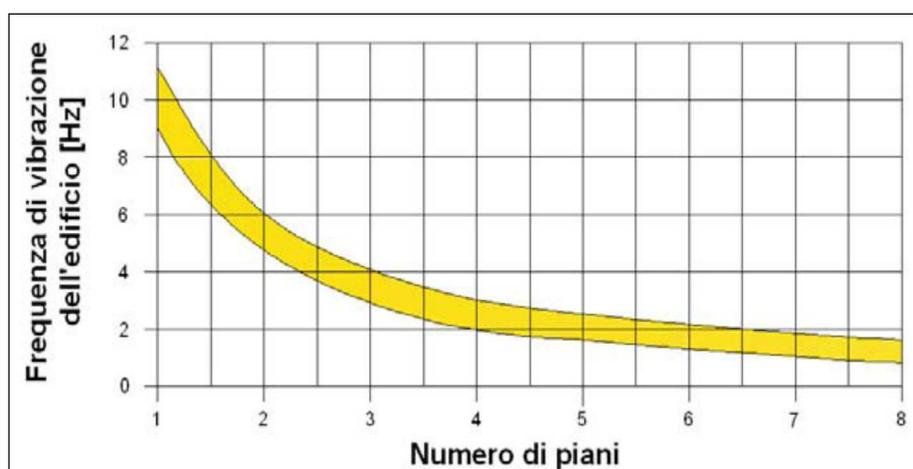


Tabella riassuntiva delle frequenze registrate in un range da 0,0 a 64,0 Hz:

| Sito di indagine | Frequenza max H/V                         | Considerazioni                                                                     |
|------------------|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| HV               | 4 Hz; 5,5 Hz; 7 Hz; 9 Hz;<br><br>20,13 HZ | Dato registrato in condizioni di basso rumore antropico (traffico automobilistico) |

## Conclusioni HV<sub>1</sub>

Tutte le misurazioni sono state testate per validarne l'efficacia tramite i parametri suggeriti dal Progetto Europeo SESAME:

| Max. H/V at 20.31 ± 9.96 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).                                                                              |                                                                                                                                     |           |            |            |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|------------|------------|------------|
| <b>Criteria for a reliable H/V curve</b><br>[All 3 should be fulfilled]                                                                |                                                                                                                                     |           |            |            |            |
| $f_0 > 10 / L_w$                                                                                                                       | 20.31 > 0.50                                                                                                                        | OK        |            |            |            |
| $n_c(f_0) > 200$                                                                                                                       | 31687.5 > 200                                                                                                                       | OK        |            |            |            |
| $\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$<br>$\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$ | Exceeded 0 out of 976 times                                                                                                         | OK        |            |            |            |
| <b>Criteria for a clear H/V peak</b><br>[At least 5 out of 6 should be fulfilled]                                                      |                                                                                                                                     |           |            |            |            |
| Exists $f^-$ in $[f_0/4, f_0]$   $A_{HV}(f^-) < A_0 / 2$                                                                               | 5.125 Hz                                                                                                                            | OK        |            |            |            |
| Exists $f^+$ in $[f_0, 4f_0]$   $A_{HV}(f^+) < A_0 / 2$                                                                                | 53.344 Hz                                                                                                                           | OK        |            |            |            |
| $A_0 > 2$                                                                                                                              | 2.28 > 2                                                                                                                            | OK        |            |            |            |
| $f_{\text{peak}}[A_{HV}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$                                                                             | 0.49042  < 0.05                                                                                                                     |           | NO         |            |            |
| $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$                                                                                                          | 9.96156 < 1.01563                                                                                                                   |           | NO         |            |            |
| $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$                                                                                                          | 0.1168 < 1.58                                                                                                                       | OK        |            |            |            |
| $L_w$                                                                                                                                  | window length                                                                                                                       |           |            |            |            |
| $n_w$                                                                                                                                  | number of windows used in the analysis                                                                                              |           |            |            |            |
| $n_c = L_w n_w f_0$                                                                                                                    | number of significant cycles                                                                                                        |           |            |            |            |
| $f$                                                                                                                                    | current frequency                                                                                                                   |           |            |            |            |
| $f_0$                                                                                                                                  | H/V peak frequency                                                                                                                  |           |            |            |            |
| $\sigma_f$                                                                                                                             | standard deviation of H/V peak frequency                                                                                            |           |            |            |            |
| $\varepsilon(f_0)$                                                                                                                     | threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$                                                           |           |            |            |            |
| $A_0$                                                                                                                                  | H/V peak amplitude at frequency $f_0$                                                                                               |           |            |            |            |
| $A_{HV}(f)$                                                                                                                            | H/V curve amplitude at frequency $f$                                                                                                |           |            |            |            |
| $f^-$                                                                                                                                  | frequency between $f_0/4$ and $f_0$ for which $A_{HV}(f^-) < A_0/2$                                                                 |           |            |            |            |
| $f^+$                                                                                                                                  | frequency between $f_0$ and $4f_0$ for which $A_{HV}(f^+) < A_0/2$                                                                  |           |            |            |            |
| $\sigma_A(f)$                                                                                                                          | standard deviation of $A_{HV}(f)$ , $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{HV}(f)$ curve should be multiplied or divided |           |            |            |            |
| $\sigma_{\log HV}(f)$                                                                                                                  | standard deviation of $\log A_{HV}(f)$ curve                                                                                        |           |            |            |            |
| $\theta(f_0)$                                                                                                                          | threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$                                                             |           |            |            |            |
| Threshold values for $\sigma_f$ and $\sigma_A(f_0)$                                                                                    |                                                                                                                                     |           |            |            |            |
| <b>Freq. range [Hz]</b>                                                                                                                | < 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 $f_0$ |
| $\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$                                                                                                      | 3.0                                                                                                                                 | 2.5       | 2.0        | 1.78       | 1.58       |
| $\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log HV}(f_0)$                                                                                         | 0.48                                                                                                                                | 0.40      | 0.30       | 0.25       | 0.20       |

Sulla base di queste considerazioni, il sito in esame presenta picchi di risonanza riscontrabili a **4 Hz; 5,5 Hz; 7 Hz; 9 Hz e 20,13 HZ**; i dati appaiono propri di un graduale e progressivo miglioramento delle condizioni meccaniche del sottosuolo sino a rilevanti profondità.

## Risultati finali

L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) e sismica passiva (ReMI) ha consentito di determinare il profilo verticale della VS (e del modulo di taglio) e, di conseguenza, del parametro Vs30 (considerando come riferimento il piano campagna  $z = 0$  m).

Questi trovano peraltro riscontro nel modello sismostratigrafico ricavato dalla sismica a rifrazione.

In sintesi:

|                                                            | BEDROCK                            |    |
|------------------------------------------------------------|------------------------------------|----|
|                                                            | NO                                 | SI |
| <b>COPERTURA</b>                                           | Sciolta                            |    |
| <b>SPESSORE</b>                                            | 20 m (spessore certo registrato)   |    |
| <b>PARAMETRO Vs da MASW</b><br><b>PARAMETRO Vs da ReMi</b> | Vs 30 = 654 m/s                    |    |
| <b>CATEGORIA DEL SOTTOSUOLO</b>                            | <b>B</b>                           |    |
| <b>PICCHI di FREQUENZA da H/V</b>                          | 4 Hz; 5,5 Hz; 7 Hz; 9 Hz; 20,13 HZ |    |

Rispetto le norme tecniche per le costruzioni (DM 14 gennaio 2008, ex DM 14/09/2005) il sito in esame rientra quindi nella **categoria B**

### **Suolo di tipo B**

Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, con spessori superiori a 30m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs30, compresi fra 360 m/s e 800 m/s ( $N_{spt,30} > 50$  nei terreni a grana grossa o  $cu_{30} > 250$  kPa nei terreni a grana fina).

Naturalmente il vero dato di velocità va considerato in un ragionevole intorno del dato proveniente dalle elaborazioni sperimentali ( $\pm 10\%$ ), per cui i terreni con velocità borderline vengono cautelativamente attribuiti alla categoria inferiore.

**Una elaborazione più spinta dei dati con l'introduzione di filtraggi particolari avrebbe portato a risultati opinabili. Le conclusioni riguardano quindi solo le elaborazioni dei dati ritenuti attendibili.**

Cison di Valmarino, 10/04/2015

il Geologo  
dott. Simone Bortolini

**STUDIO TECNICO DI GEOLOGIA APPLICATA ALL'INGEGNERIA**  
dott. geol. SIMONE BORTOLINI via San Vito, 9/A Cison di Valmarino (TV)  
tel. 338-1977870  
e-mail simonebortolini@libero.it

---

# **Relazione**

## **Sismica a Rifrazione - MASW – ReMi - HVSr**

per la definizione del profilo verticale Vs e parametro Vs30

---

# **CDM\_SMC 2**

## **CROCETTA DEL MONTELLO (TV)**

### **Via Sant' Apollonia**

Coordinate WGS84

Lat. N 45,827796 Long. E 12,038911

Coordinate ED50

Lat. N 45,828695 Long. E 12,039911

---



il Geologo

dott. Simone Bortolini

# Introduzione

Al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame è stata effettuata una serie di acquisizioni MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves, analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva – e.g. Park et al., 1999) e ReMi (Refraction Microtremor -Louie, 2001) utili a definire il profilo verticale della Vs (velocità di propagazione delle onde di taglio) oltre alla tradizionale sismica a rifrazione.

## 1. Interpretazione di stendimenti di sismica a rifrazione

Questo metodo, di semplice applicazione, è utilizzabile nel caso di strati orizzontali o con inclinazione uniforme e in presenza di una superficie topografica, almeno lungo lo stendimento, orizzontale. Si parte inoltre dal presupposto che la velocità dei rifrattori aumenti con la profondità. In pratica si dovrà verificare che la velocità delle onde P nel primo strato sia minore della velocità delle onde P nel secondo, a sua volta inferiore a quella del terzo, ecc. ( $V_1 < V_2 < V_3$ ).

## 2. Tecnica di misurazione e interpretazione MASW

La tecnica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves - Park et al., 1999) è un metodo d'indagine geofisica, sviluppato e diffuso negli ultimi dieci anni circa, che sfrutta le modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare delle onde di Rayleigh, generate da sorgenti artificiali (mazza battente o scoppio). Le onde di Rayleigh si muovono lungo l'interfaccia terra-aria e sono generate dalla rifrazione e riflessione multipla di onde di compressione (P) e onde di taglio che si propagano in direzione verticale (SV).

## 3. Tecnica di misurazione e interpretazione ReMi

La tecnica ReMi (Refraction Microtremor) è un metodo d'indagine geofisica che sfrutta invece le modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare delle onde di Rayleigh, generate però da sorgenti ambientali.

A differenza di quanto avviene nell'indagine eseguita con la tecnica MASW, dove la posizione delle sorgenti è nota ed è allineata allo stendimento, nel caso del ReMi i punti di origine dei microtremori sono spesso non identificabili. Quindi la registrazione viene protratta per tempi più lunghi. Essendo la potenza associata al segnale utile comparabile con quella del rumore di fondo è necessario rilevare un numero di tremori molto elevato, questo sarà ottenibile semplicemente andando a allungare i tempi di registrazione del segnale. A differenza dei pochi secondi necessari per acquisizioni MASW sono qui necessari da alcuni a molti minuti di acquisizione (in genere 10 - 20 minuti sono sufficienti).

I principi teorici e gli aspetti di acquisizione ed elaborazione dei dati sono sostanzialmente gli stessi della tecnica MASW con la differenza che con ReMi si ha una maggior definizione degli strati profondi.

## 4. Tecnica di misure ed interpretazione HVSR (tramite TROMINO)

Tale prospezione sismica si basa sull'acquisizione e sull'analisi del Rumore Sismico Ambientale (Seismic Noise) ovvero la continua vibrazione del suolo dovuta sia a cause antropiche che naturali. Questa tipologia di tecniche (definite metodi sismici passivi), dunque, non ha bisogno

di alcuna energizzazione esterna poiché utilizza come sorgente il traffico veicolare, la produzione industriale, il vento, la pioggia e tutto ciò che è in grado di produrre una minima vibrazione sulla superficie del suolo.

In particolar modo con la tecnica a “ Stazione Singola” viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero “Horizontal to Vertical Spectral Ratios) (Nakamura, Y. [1989]). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno e individuare la frequenza fondamentale ( $f$ ) di questa vibrazione. Sapendo che in generale esiste una relazione semplice fra  $f$ , lo spessore della parte più soffice del terreno (ovvero la parte di materiali sovrastante il bed-rock) e la velocità media ( $V_s$ ) delle onde sismiche nel sottosuolo, attraverso le misure HVSR è possibile risalire allo spessore di questo strato. Si possono inoltre effettuare delle considerazioni di tipo “qualitativo” molto utili in merito a possibili interferenze tra le frequenze risonanti del suolo e degli edifici sovrastanti.

Per la valutazione del periodo proprio di risonanza del sottosuolo è stata utilizzata la tecnica a stazione singola Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Kanai, 1957; Igarashi 1970; Nakamura 1989) che permette di estrarre informazioni relative alla frequenza di vibrazione del suolo a partire dagli spettri di rumore sismico registrati in sito. La tecnica prevede di calcolare il rapporto, in funzione della frequenza, tra gli spettri di risposta della componente orizzontale e verticale del moto dovuto ai microtremori ambientali. La misura di rumore sismico della durata di 26 minuti per ogni punto di misura è stata eseguita con una frequenza di campionamento a 128 Hz.

## 5. Strumentazione impiegata

### Hardware

L'acquisizione dati per l'elaborazione MASW, ReMI e sismica a rifrazione è avvenuta tramite sismografo a 24 canali (mod. Dolang Geophysical DBS280 24 bit 24 canali) collegato a geofoni verticali a frequenza propria di 4.5Hz.

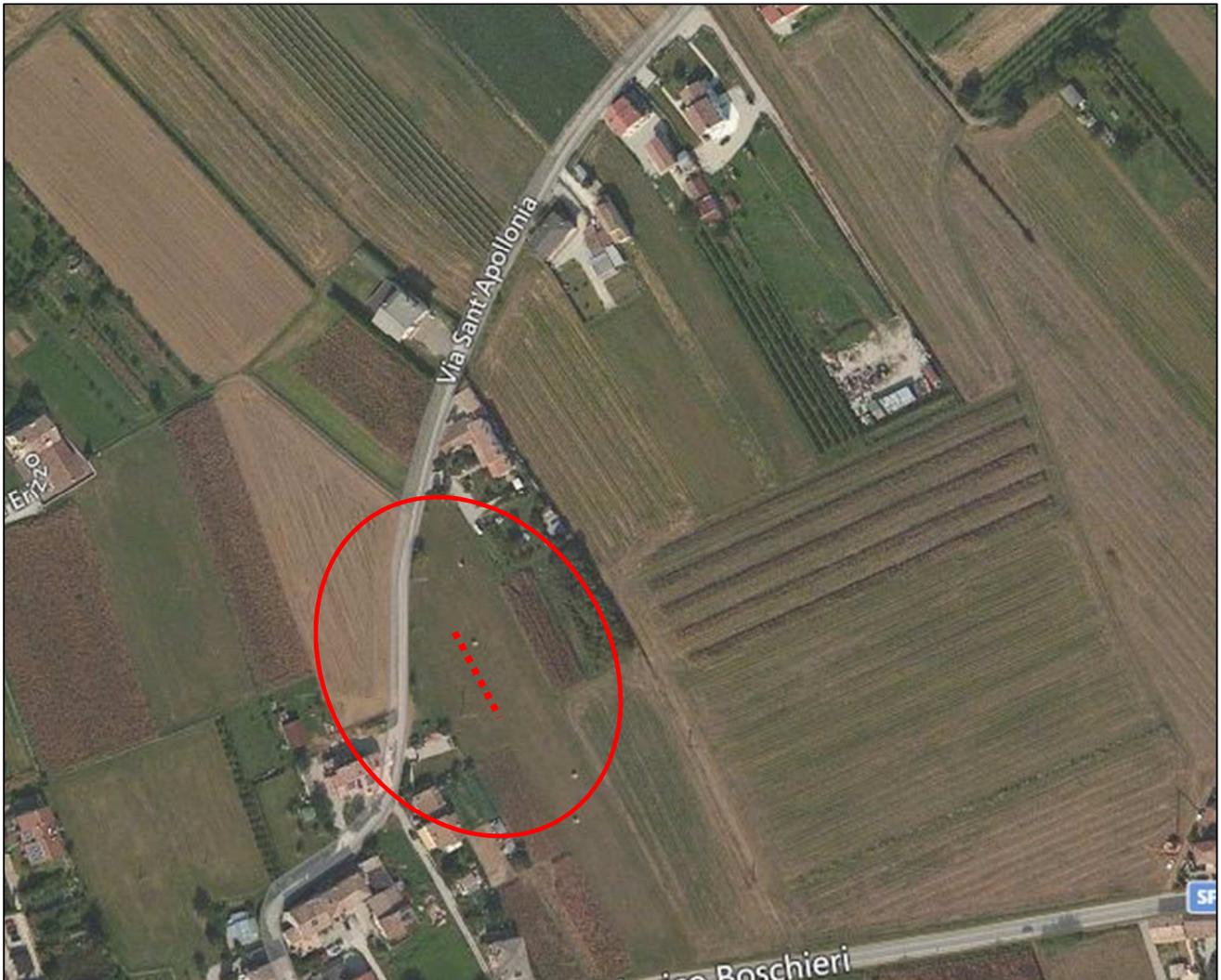
È stato utilizzato un tromografo digitale modello “Tromino” (Micromed srl) avente un intervallo di acquisizione sulle frequenze da 0.1 a 256 Hz, dotato di sistema di acquisizione digitale ad alta risoluzione (24 bit) e primo-processing interno. La livellazione micrometrica dello strumento è stata assicurata per ogni misura tramite bolla di precisione agendo sui tre punti di appoggio (punte) ed orientando uno dei 3 sensori di acquisizione (ortogonali tra loro) verso il N magnetico.

### Software

Per le analisi dei dati acquisiti si sono adottati i software GeoMASW , GeoReMi, SismaCon di ProgramGeo (Brescia) e il software Grilla.

## Sito Stendimento Sismico St<sub>2</sub>

L'immagine a seguire mostra l'ubicazione dell'indagine denominata 'St<sub>2</sub>' ( ..... ) per lo stendimento sismico effettuato ai fini della classificazione sismica del suolo.



Lo stendimento sismico geofonico lineare multicanale con geofoni verticali (4.5 Hz) è stato posizionato e utilizzato per le prospezioni sismiche tipo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), ReMI (Refraction Microtremor) e Sismica a Rifrazione, analizzano le onde di superficie.

## Dati sperimentali (St<sub>2</sub>)

|                                               |        |
|-----------------------------------------------|--------|
| Numero di ricevitori .....                    | 24     |
| Distanza tra i sensori: .....                 | 2 m    |
| Numero di campioni temporali.....             | 2048   |
| Passo temporale di acquisizione.....          | 0.6 ms |
| Numero di ricevitori usati per l'analisi..... | ...24  |

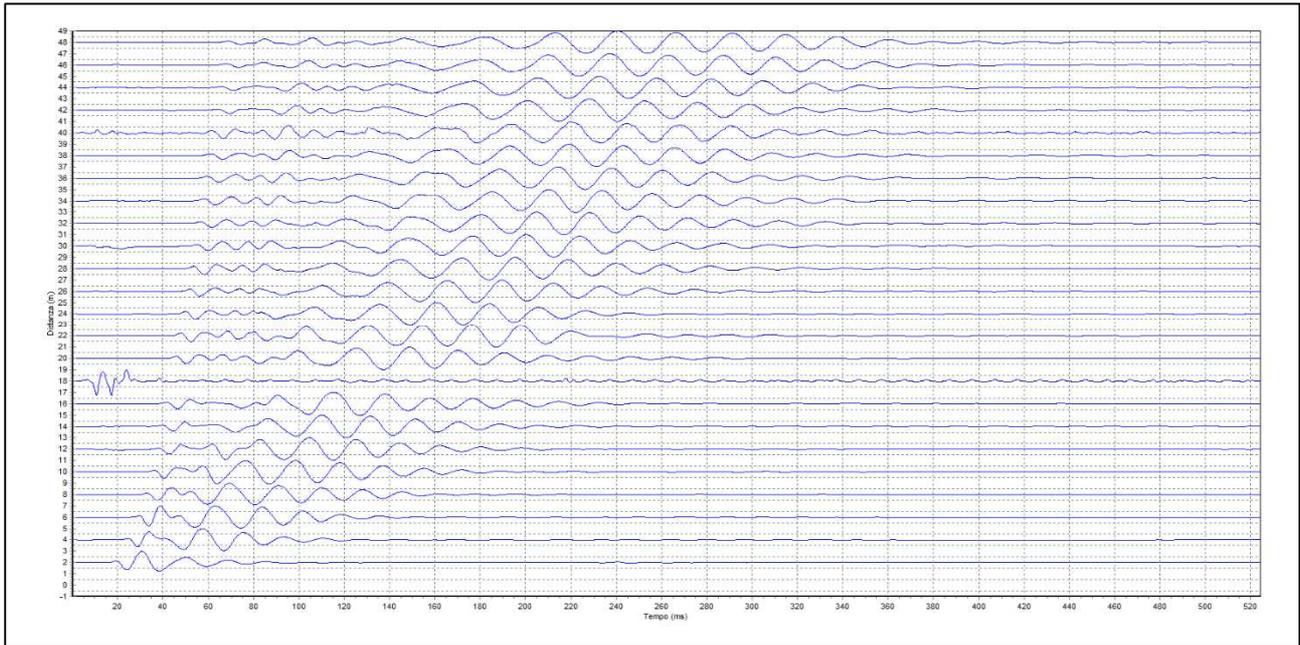


Figura 1.1: Tracce sperimentali tiro diretto

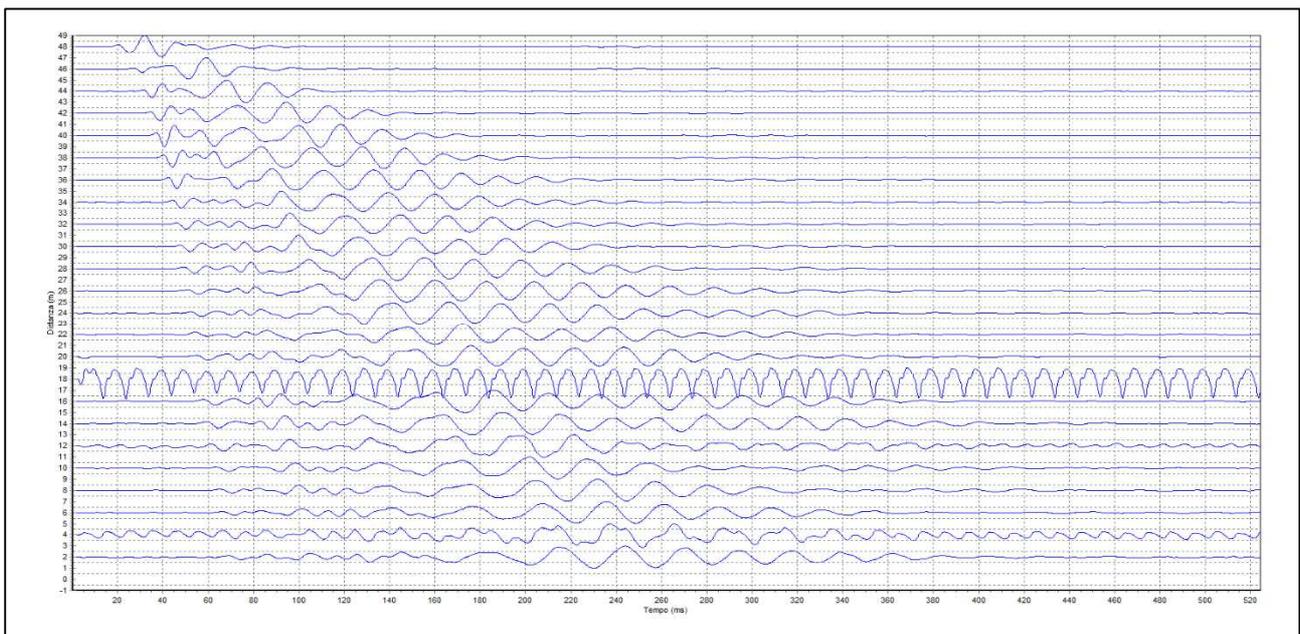


Figura 1.2: Tracce sperimentali tiro coniugato

## Sismica a rifrazione 2

L'interpretazione è stata effettuata sulla base di due sorgenti (mazza su piattello di battuta) poste rispettivamente 2 metri prima del primo geofono e 2 m oltre l'ultimo geofono.

Il metodo utilizzato è il Metodo convenzionale (metodo del tempo di ritardo - delay time); tale metodo è utilizzabile nel caso di strati orizzontali o con inclinazione uniforme e in presenza di una superficie topografica, almeno lungo lo stendimento, orizzontale. Si parte inoltre dal presupposto che la velocità dei rifrattori aumenti con la profondità. In pratica si dovrà verificare che la velocità delle onde P nel primo strato sia minore della velocità delle onde P nel secondo, a sua volta inferiore a quella del terzo, ecc. ( $V_1 < V_2 < V_3$ ), così come nel caso in esame.

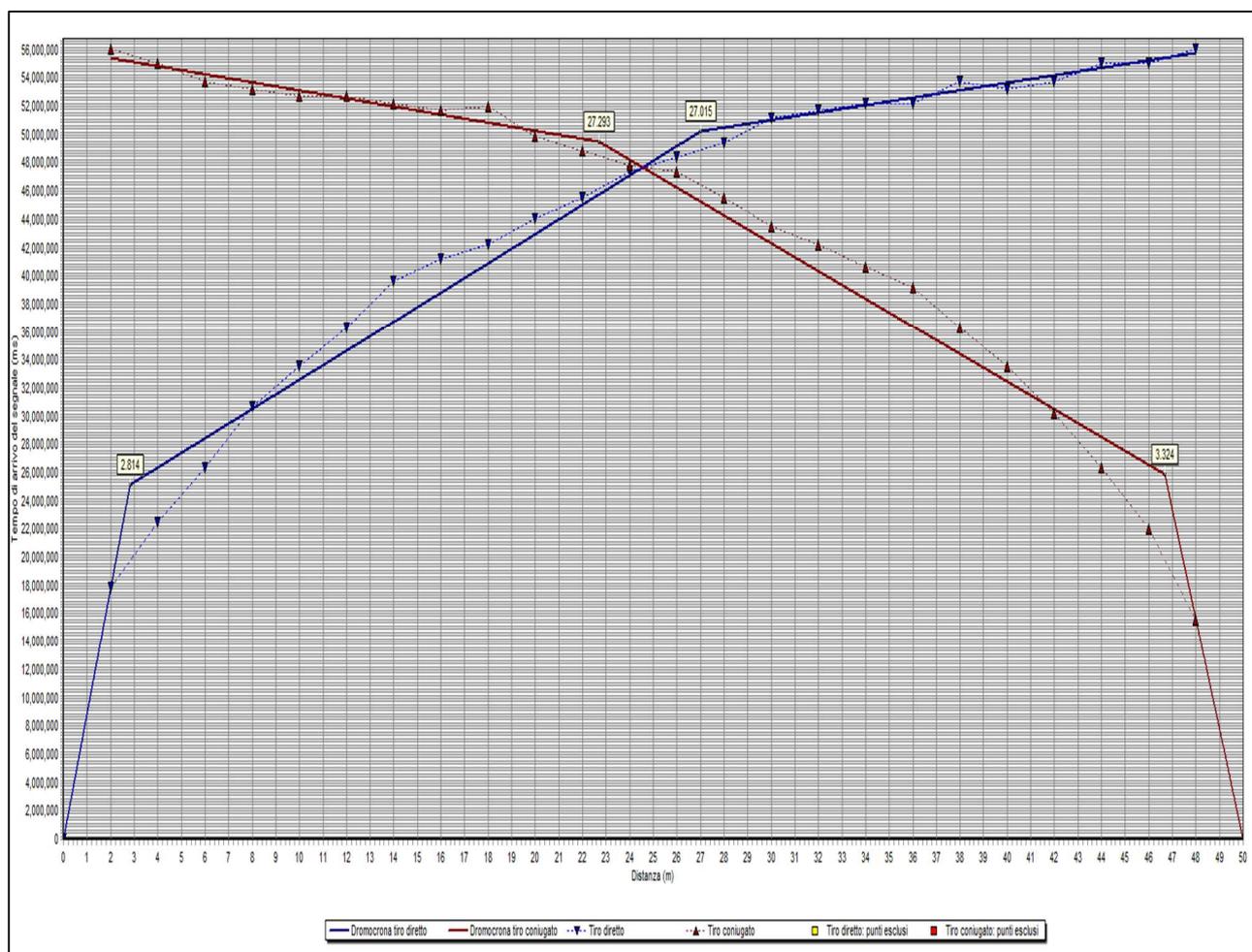


Figura 1.3: grafico generale curva distanza-tempo

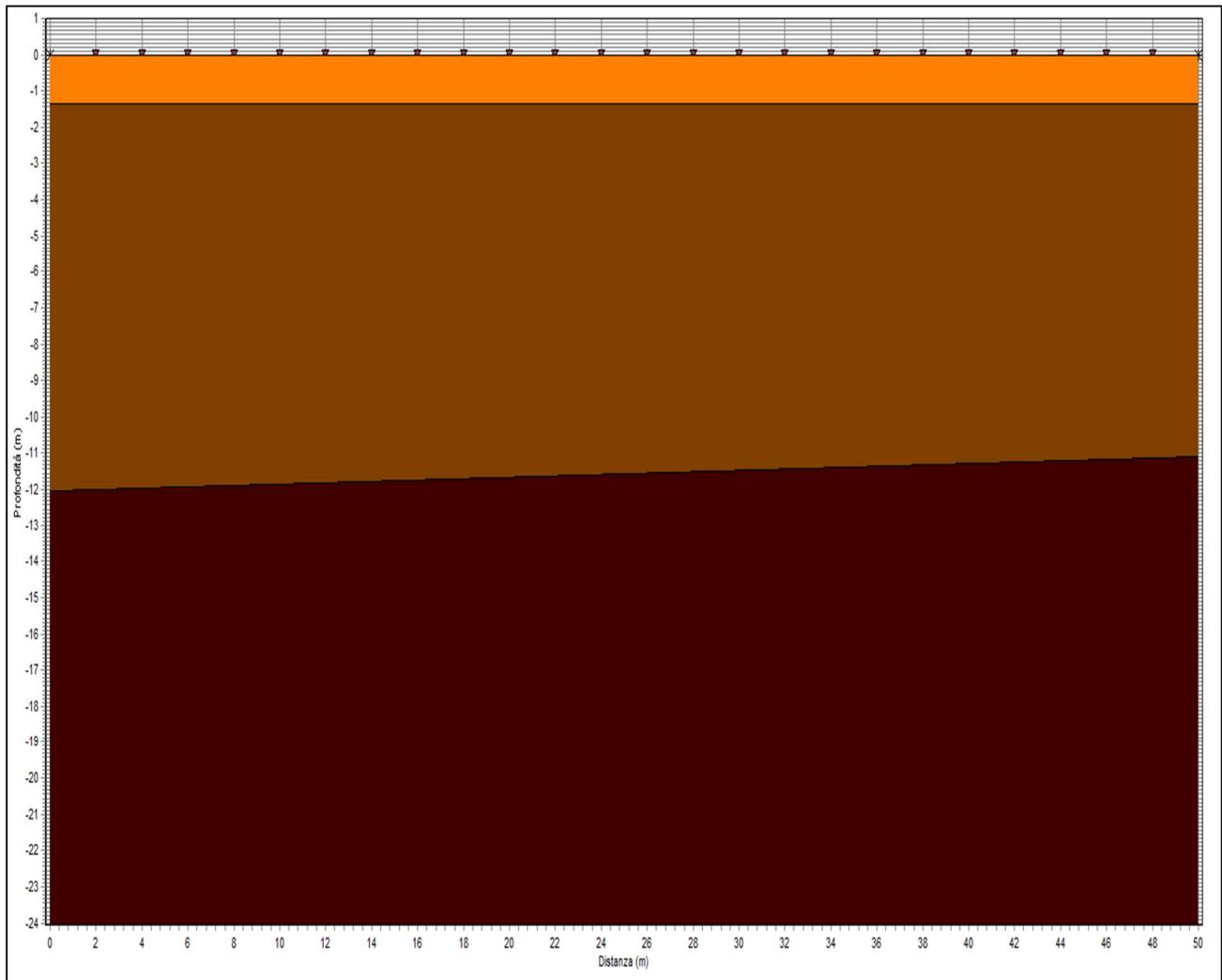


Figura 1.4: Sezione stratigrafica interpretata

La sezione stratigrafica è stata interpretata sulla base dei valori delle velocità delle onde P considerando il profilo topografico orizzontale e gli strati inclinati in maniera pseudo-uniforme.

| Strato n. | Vp (m/s) | Hs(m)  | Hd(m)  | rd    | ri    |
|-----------|----------|--------|--------|-------|-------|
| 1         | 678      | 1.346  | 1.37   | 1     | 1     |
| 2         | 846      | 12.026 | 11.083 | 0.976 | 0.972 |
| 3         | 1142     |        |        | 0.966 | 0.957 |

**LEGENDA:**

Hs = spessore strato lato sinistro;

Hd = spessore strato lato destro;

Vp = velocità delle onde P.

Vs = velocità delle onde S.

rd = coefficiente correlazione tiro diretto

ri = coefficiente correlazione tiro inverso

## Analisi MASW 2

Frequenza minima .....15 Hz

Frequenza massima .....50 Hz

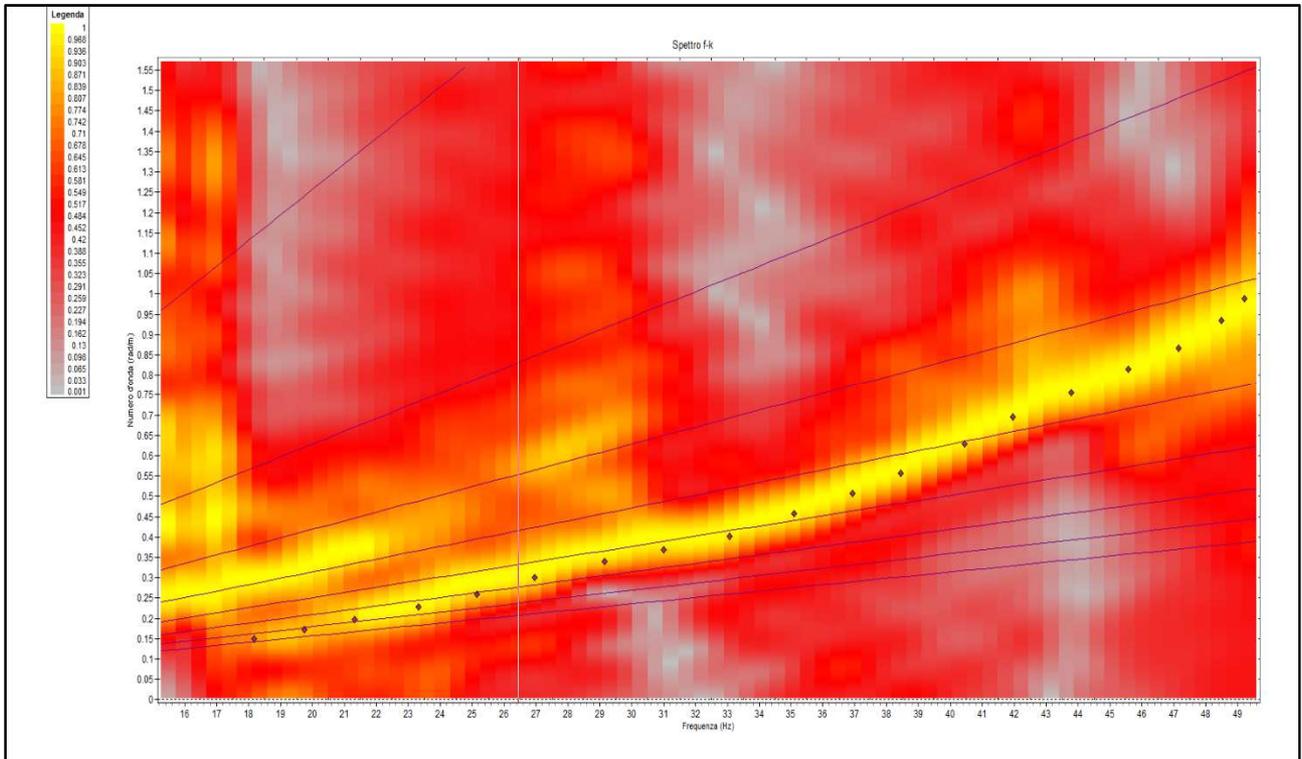


Figura 1.5: Spettro f – k

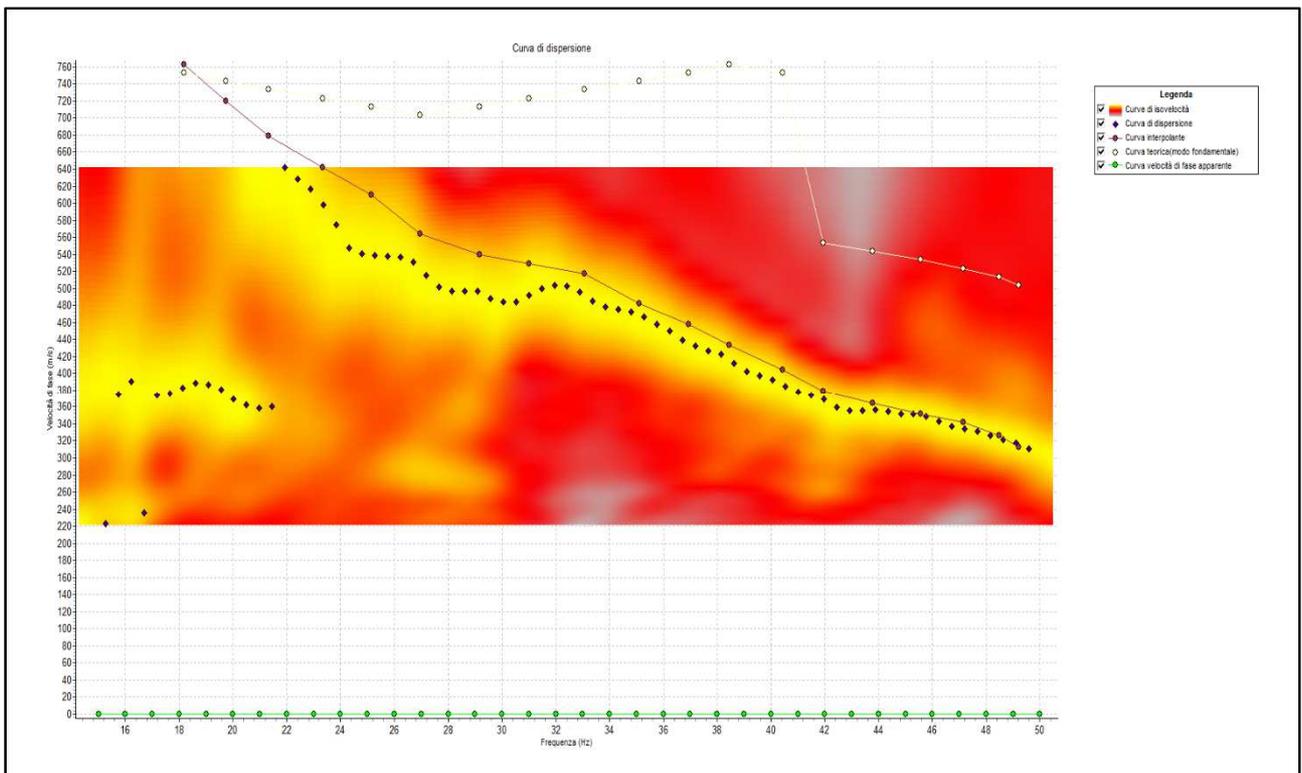


Figura 1.6: Curva di dispersione

L'interpretazione utilizza un algoritmo di inversione che consente di generare una curva di dispersione teorica una volta inserito un modello stratigrafico iniziale del terreno fino alla profondità desiderata e le caratteristiche del semispazio elastico di riferimento.

Procedendo per tentativi, secondo la procedura di Dunkin (1965) modificata da Watson (1970), il programma modifica in automatico il modello iniziale fino a quando lo scarto quadratico medio calcolato fra curva sperimentale e teorica non scende sotto un valore di soglia impostato e modificabile dall'operatore.

Poiché generalmente il metodo empirico genera in automatico un numero elevato di strati, si semplifica il modello iniziale generato mediando i livelli con valori di Vs simili.

|                                            |     |
|--------------------------------------------|-----|
| Numero di strati (escluso semispazio)..... | 4   |
| Spaziatura ricevitori [m].....             | 2 m |
| Numero ricevitori .....                    | 24  |

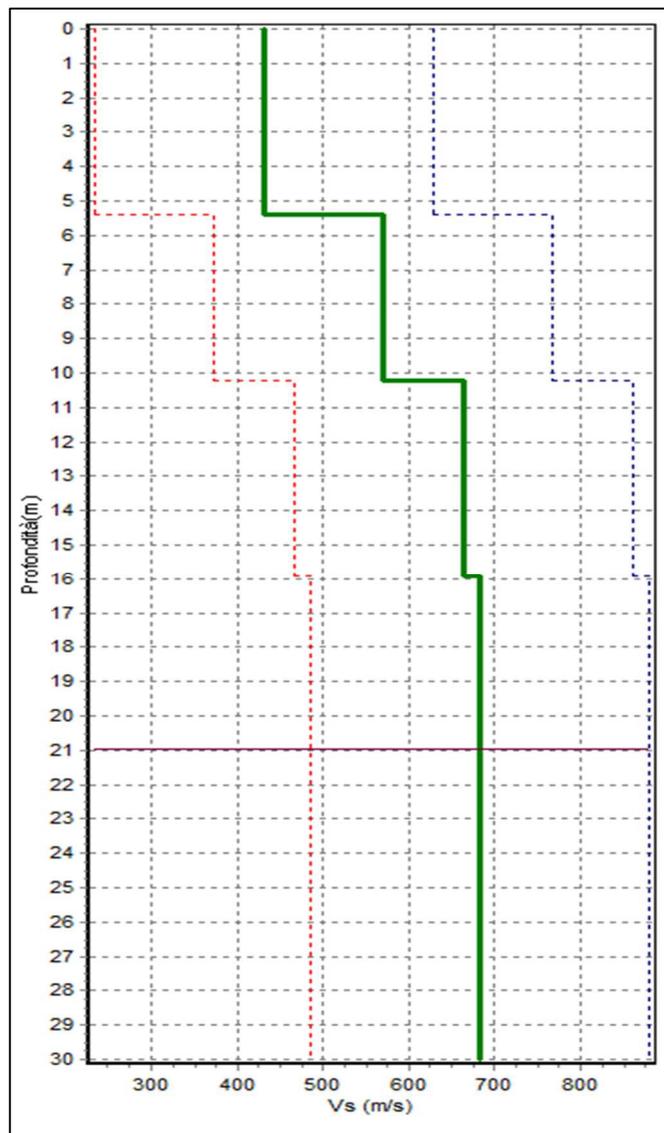


Figura 1.7: Profilo Vs numerico

La sezione stratigrafica risulta attendibile fino a circa 21-22 m di profondità; oltre tale valore il segnale risulta troppo disturbato anche se si può intuire un aumento dei valori di velocità con la profondità.

## Analisi ReMi 2

Numero di ricevitori ..... 24  
 Distanza tra i sensori: ..... 2 m  
 Numero di ricevitori usati per l'analisi.....24

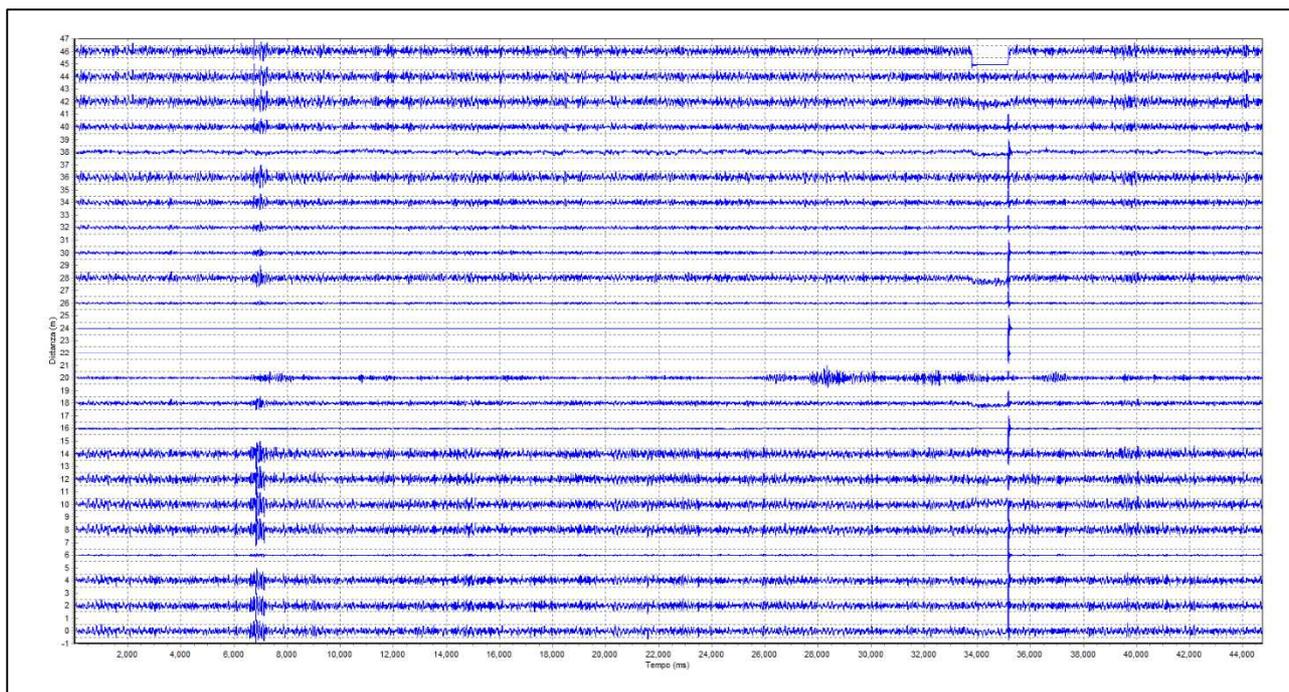


Figura 2.1: Tracce sperimentali

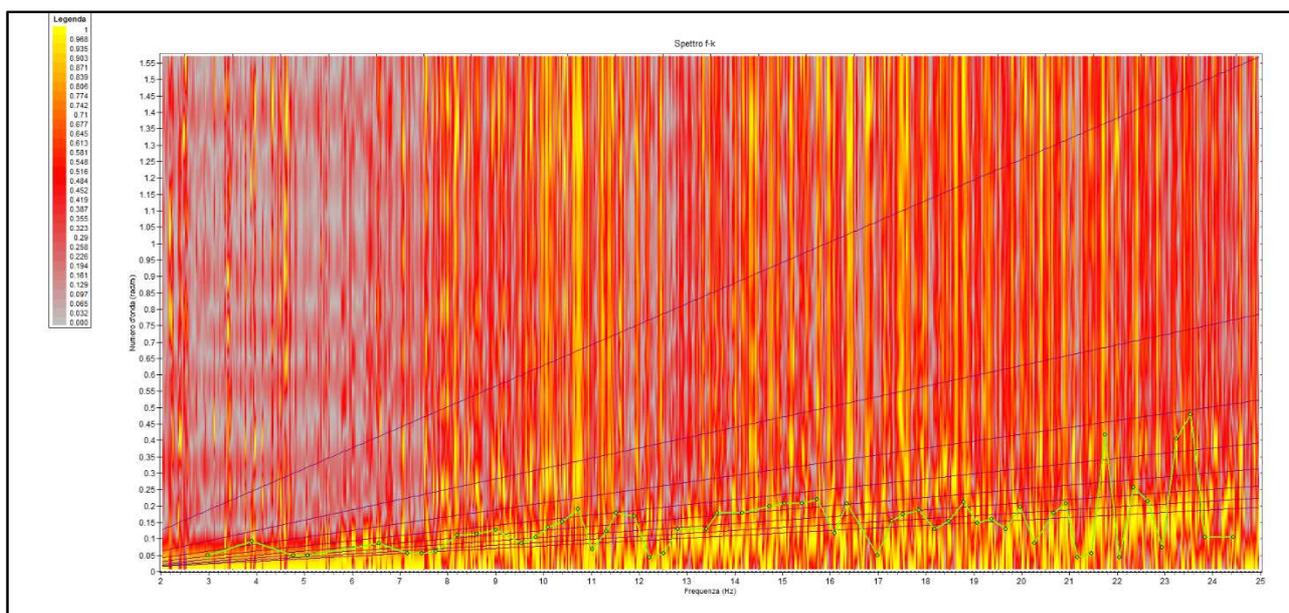


Figura 2.2: Spettro f - k

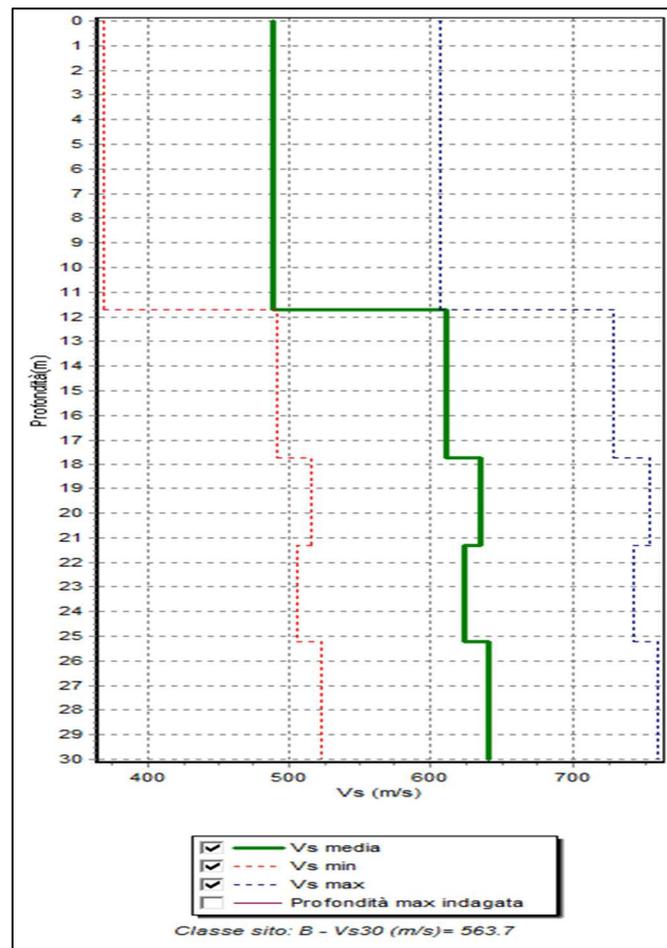


Figura 2.3: Profilo ReMi Vs numerico

## Conclusioni (St<sub>1</sub>)

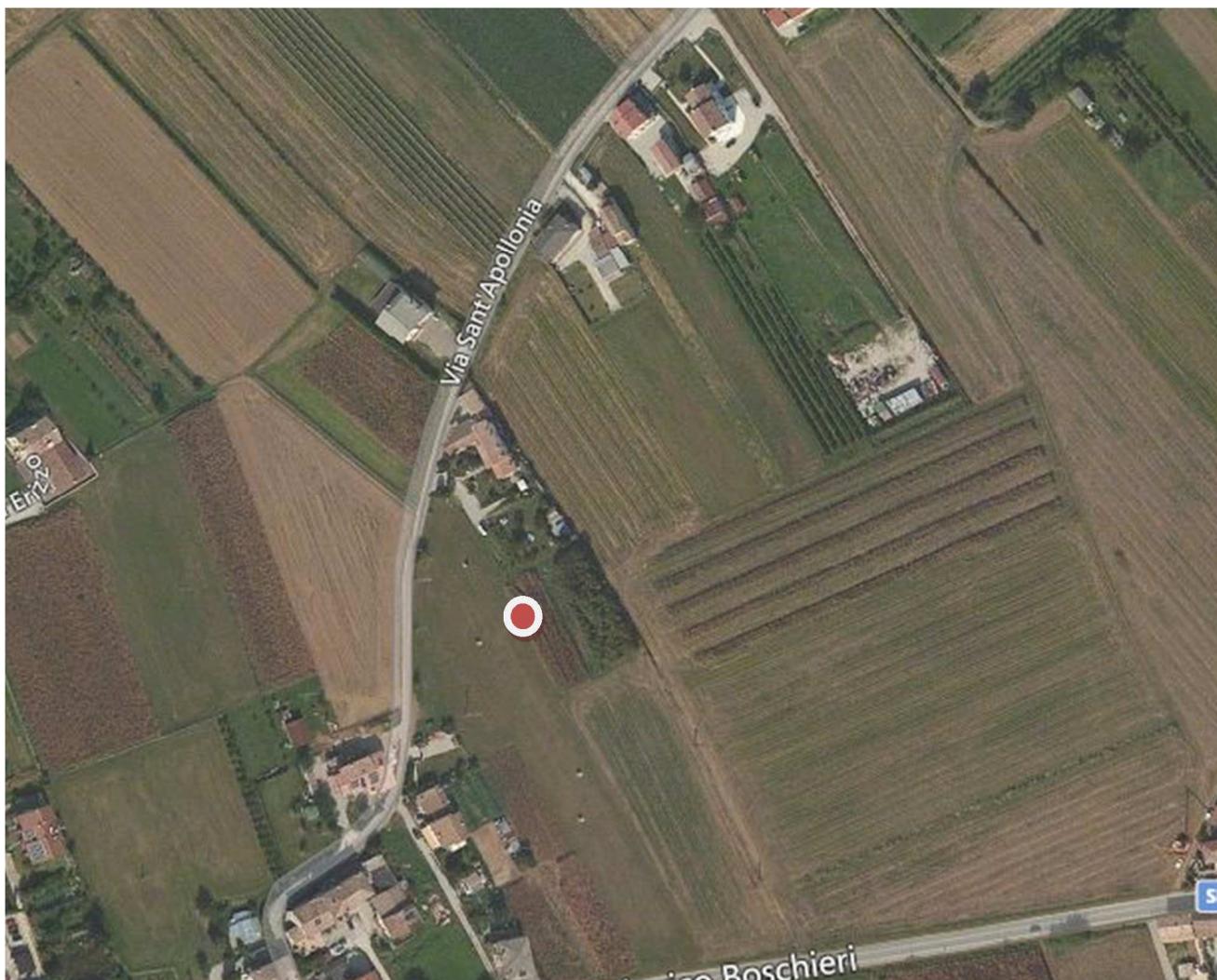
Secondo la misura sperimentale effettuata e la modellazione del sottosuolo elaborata dal trattamento dei dati con i tre metodi appena descritti, per lo stendimento sismico St<sub>1</sub> si individuano materiali sciolti di media consistenza caratterizzati da velocità delle onde sismiche di taglio tipiche di materiali granulari medio fini.

In sintesi viene riportata una stratigrafia sismica di massima del sito indagato:

| Profondità (m) | Vs (m/s) | Considerazioni  |
|----------------|----------|-----------------|
| 0 – 12 m       | 480      | Ghiaie limose   |
| 12- 30 m       | 620      | Ghiaie compatte |

## Periodo proprio di risonanza del suolo (HV<sub>2</sub>)

La foto aerea mostra l'ubicazione della indagine denominata HV<sub>2</sub> (  ) indicante il punto di acquisizione di rumore sismico ambientale finalizzata alla definizione del periodo proprio del suolo.



Nello studio specifico degli effetti di sito, la frequenza di campionamento utilizzata è di 128 Hz, con tempi di misura dell'ordine di 26 minuti.

Per la misura, oltre allo spettro H/V, è palesata la trasformata delle singole componenti, l'analisi direzionale e temporale del rumore sismico acquisito.

## Analisi HV<sub>2</sub>

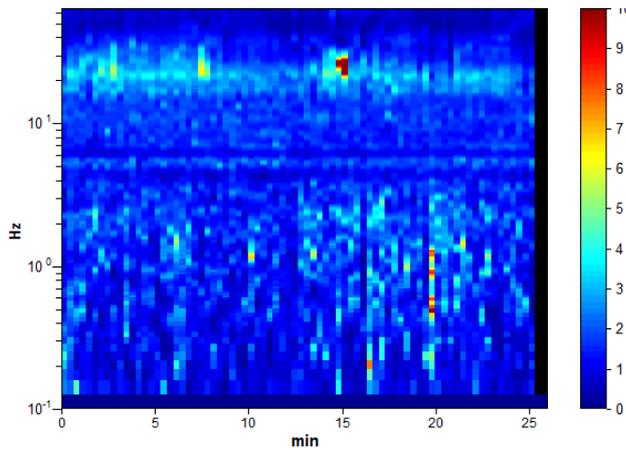


Figura 3.1: analisi temporale del rumore

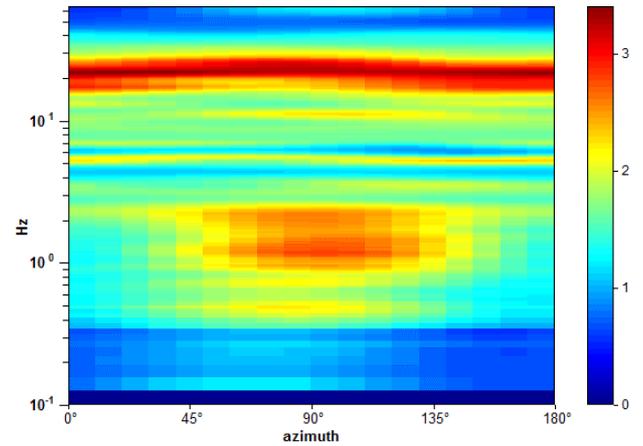


Figura 3.2: analisi direzionale del rumore

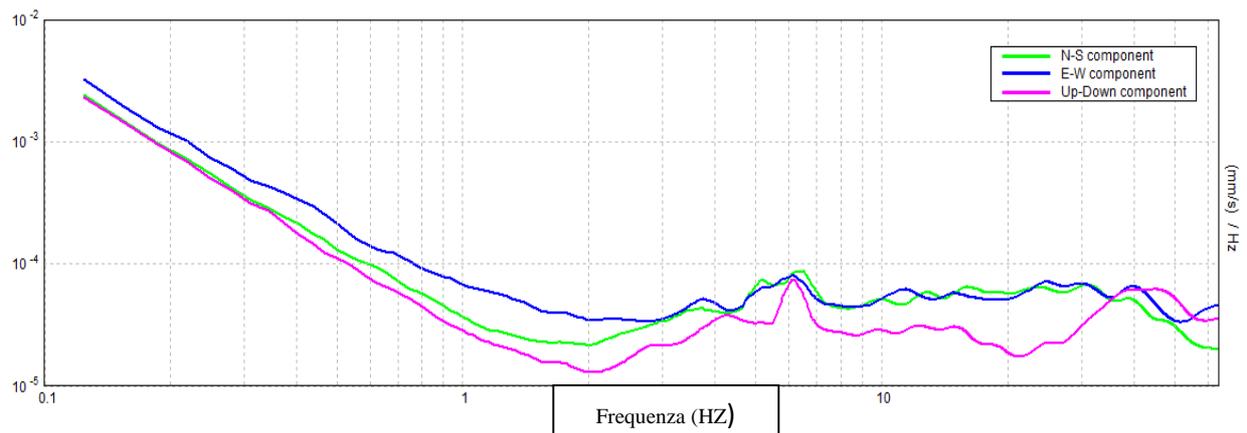


Figura 3.3: spettri delle 3 componenti

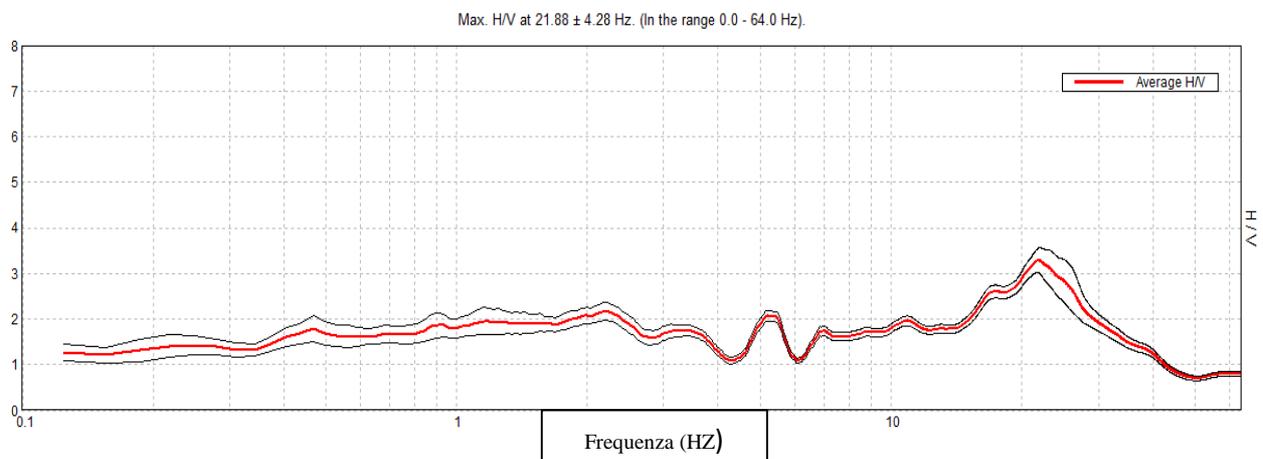


Figura 3.4: rapporto H/V

Una delle misure effettuate (HV) ha subito notevole influenza da rumore antropico. Tutte le tracce escludono la presenza di un netto contrasto di impedenza acustica nel sottosuolo. Non si individuano picchi di risonanza.

In termini di interpretazione del contrasto di impedenza acustica responsabile, eventuali picchi riscontrati, adottando secondo l'ipotesi  $\lambda/4$  una funzione di trasferimento di tipo:

$$F(\omega) = 1/\cos(\omega H/V_s)$$

La frequenza naturale ( $F_n$ ) di vibrazione dello strato di terreno corrisponde ai massimi della funzione di amplificazione:

$$F_n = \omega_n / 2\pi (V_s/4H)$$

con H profondità del rifrattore e  $V_s$  velocità delle onde sismiche di taglio, si può imporre la risonanza del sistema secondo la seguente relazione con T periodo proprio del suolo:

$$T = 2\pi/\omega = 4H/V_s$$

La situazione più pericolosa in termini di fenomeni di amplificazione si verifica quando la frequenza dell'eccitazione armonica ( $\omega$ ) è pari ad una delle frequenze fondamentali dello strato ( $\omega_n$ ). Quando si verifica tale condizione ( $\omega = \omega_n$ ) si ha la risonanza dello strato, ed il fattore di amplificazione è teoricamente infinito. E' quindi di fondamentale importanza porre attenzione ai fenomeni di "doppia risonanza", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei fabbricati.

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

#### **Freq. Naturale edificio \_ 10 Hz / numero piani**

E' la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

#### **Freq. naturale edificio - Freq. fondamentale di risonanza del sito**

ad essere particolarmente pericolosa, poiché dà luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.

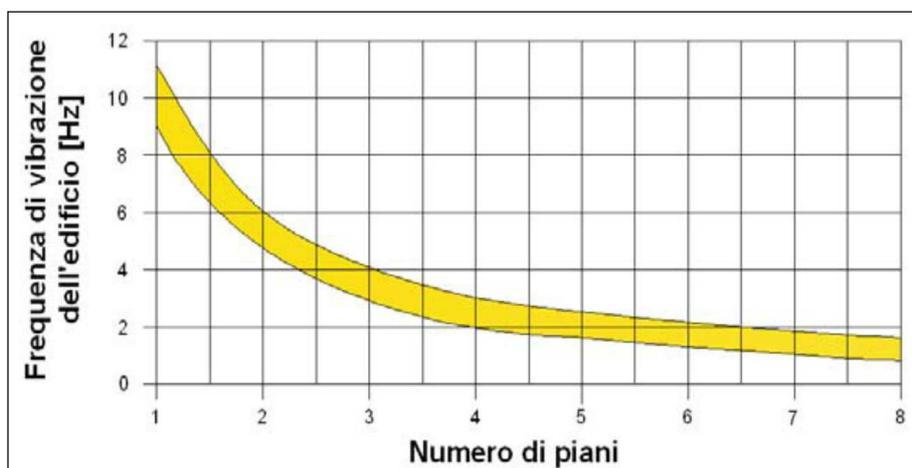


Tabella riassuntiva delle frequenze registrate in un range da 0,0 a 64,0 Hz:

| Sito di indagine | Frequenza max H/V         | Considerazioni                                                                     |
|------------------|---------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| HV               | 1,2 Hz; 5,3 Hz e 21,88 Hz | Dato registrato in condizioni di basso rumore antropico (traffico automobilistico) |

## Conclusioni HV<sub>2</sub>

Tutte le misurazioni sono state testate per validarne l'efficacia tramite i parametri suggeriti dal Progetto Europeo SESAME:

| Max. H/V at 21.88 ± 4.28 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).                                                                              |                                                                                                                                     |           |            |            |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|------------|------------|------------|
| <b>Criteria for a reliable H/V curve</b><br>[All 3 should be fulfilled]                                                                |                                                                                                                                     |           |            |            |            |
| $f_0 > 10 / L_w$                                                                                                                       | 21.88 > 0.50                                                                                                                        | OK        |            |            |            |
| $n_c(f_0) > 200$                                                                                                                       | 34125.0 > 200                                                                                                                       | OK        |            |            |            |
| $\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$<br>$\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$ | Exceeded 0 out of 1051 times                                                                                                        | OK        |            |            |            |
| <b>Criteria for a clear H/V peak</b><br>[At least 5 out of 6 should be fulfilled]                                                      |                                                                                                                                     |           |            |            |            |
| Exists $f^-$ in $[f_0/4, f_0] \mid A_{HV}(f^-) < A_0 / 2$                                                                              | 8.25 Hz                                                                                                                             | OK        |            |            |            |
| Exists $f^+$ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{HV}(f^+) < A_0 / 2$                                                                               | 33.188 Hz                                                                                                                           | OK        |            |            |            |
| $A_0 > 2$                                                                                                                              | 3.29 > 2                                                                                                                            | OK        |            |            |            |
| $f_{\text{peak}}[A_{HV}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$                                                                             | $ 0.19551  < 0.05$                                                                                                                  |           | NO         |            |            |
| $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$                                                                                                          | $4.27674 < 1.09375$                                                                                                                 |           | NO         |            |            |
| $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$                                                                                                          | $0.2684 < 1.58$                                                                                                                     | OK        |            |            |            |
| $L_w$                                                                                                                                  | window length                                                                                                                       |           |            |            |            |
| $n_w$                                                                                                                                  | number of windows used in the analysis                                                                                              |           |            |            |            |
| $n_c = L_w n_w f_0$                                                                                                                    | number of significant cycles                                                                                                        |           |            |            |            |
| $f$                                                                                                                                    | current frequency                                                                                                                   |           |            |            |            |
| $f_0$                                                                                                                                  | H/V peak frequency                                                                                                                  |           |            |            |            |
| $\sigma_f$                                                                                                                             | standard deviation of H/V peak frequency                                                                                            |           |            |            |            |
| $\varepsilon(f_0)$                                                                                                                     | threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$                                                           |           |            |            |            |
| $A_0$                                                                                                                                  | H/V peak amplitude at frequency $f_0$                                                                                               |           |            |            |            |
| $A_{HV}(f)$                                                                                                                            | H/V curve amplitude at frequency $f$                                                                                                |           |            |            |            |
| $f^-$                                                                                                                                  | frequency between $f_0/4$ and $f_0$ for which $A_{HV}(f^-) < A_0/2$                                                                 |           |            |            |            |
| $f^+$                                                                                                                                  | frequency between $f_0$ and $4f_0$ for which $A_{HV}(f^+) < A_0/2$                                                                  |           |            |            |            |
| $\sigma_A(f)$                                                                                                                          | standard deviation of $A_{HV}(f)$ , $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{HV}(f)$ curve should be multiplied or divided |           |            |            |            |
| $\sigma_{\log A_{HV}(f)}$                                                                                                              | standard deviation of $\log A_{HV}(f)$ curve                                                                                        |           |            |            |            |
| $\theta(f_0)$                                                                                                                          | threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$                                                             |           |            |            |            |
| Threshold values for $\sigma_f$ and $\sigma_A(f_0)$                                                                                    |                                                                                                                                     |           |            |            |            |
| <b>Freq. range [Hz]</b>                                                                                                                | < 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 $f_0$ |
| $\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$                                                                                                      | 3.0                                                                                                                                 | 2.5       | 2.0        | 1.78       | 1.58       |
| $\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log A_{HV}(f_0)}$                                                                                     | 0.48                                                                                                                                | 0.40      | 0.30       | 0.25       | 0.20       |

Sulla base di queste considerazioni, il sito in esame presenta picchi di risonanza riscontrabili **1,2 Hz; 5,3 Hz e 21,88 Hz**; i dati appaiono propri di un graduale e progressivo miglioramento delle condizioni meccaniche del sottosuolo sino a rilevanti profondità.

## Risultati finali

L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) e sismica passiva (ReMI) ha consentito di determinare il profilo verticale della VS (e del modulo di taglio) e, di conseguenza, del parametro Vs30 (considerando come riferimento il piano campagna  $z = 0$  m).

Questi trovano peraltro riscontro nel modello sismostratigrafico ricavato dalla sismica a rifrazione.

In sintesi:

|                                                            | BEDROCK                                  |    |
|------------------------------------------------------------|------------------------------------------|----|
|                                                            | NO                                       | SI |
| <b>COPERTURA</b>                                           | Sciolta                                  |    |
| <b>SPESSORE</b>                                            | 21 m (spessore certo registrato)         |    |
| <b>PARAMETRO Vs da MASW</b><br><b>PARAMETRO Vs da ReMi</b> | Vs 30 = 563 m/s                          |    |
| <b>CATEGORIA DEL SOTTOSUOLO</b>                            | <b>B</b>                                 |    |
| <b>PICCHI DI FREQUENZE da H/V</b>                          | 1,2 Hz; 5,3 Hz<br>Picco massimo 21,88 Hz |    |

Rispetto le norme tecniche per le costruzioni (DM 14 gennaio 2008, ex DM 14/09/2005) il sito in esame rientra quindi nella **categoria B**

### **Suolo di tipo B**

Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, con spessori superiori a 30m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs30, compresi fra 360 m/s e 800 m/s ( $N_{spt,30} > 50$  nei terreni a grana grossa o  $cu_{30} > 250$  kPa nei terreni a grana fina).

Naturalmente il vero dato di velocità va considerato in un ragionevole intorno del dato proveniente dalle elaborazioni sperimentali ( $\pm 10\%$ ), per cui i terreni con velocità borderline vengono cautelativamente attribuiti alla categoria inferiore.

**Una elaborazione più spinta dei dati con l'introduzione di filtraggi particolari avrebbe portato a risultati opinabili. Le conclusioni riguardano quindi solo le elaborazioni dei dati ritenuti attendibili.**

Cison di Valmarino, 10/04/2015

il Geologo  
dott. Simone Bortolini

**STUDIO TECNICO DI GEOLOGIA APPLICATA ALL'INGEGNERIA**  
dott. geol. SIMONE BORTOLINI via San Vito, 9/A Cison di Valmarino (TV)  
tel. 338-1977870  
e-mail simonebortolini@libero.it

---

# **Relazione**

## **Sismica a Rifrazione - MASW – ReMi - HVSr**

per la definizione del profilo verticale Vs e parametro Vs30

---

### **CDM\_SMC 3**

## **CROCETTA DEL MONTELLO (TV)**

### **Via Armando Diaz**

Coordinate WGS84

Lat. N 45,821614 Long. E 12,016436

Coordinate ED50

Lat. N 45,822514 Long. E 12,017436

---



il Geologo

dott. Simone Bortolini

## Introduzione

Al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame è stata effettuata una serie di acquisizioni MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves, analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva – e.g. Park et al., 1999) e ReMi (Refraction Microtremor - Louie, 2001) utili a definire il profilo verticale della Vs (velocità di propagazione delle onde di taglio) oltre alla tradizionale sismica a rifrazione.

### 1. Interpretazione di stendimenti di sismica a rifrazione

Questo metodo, di semplice applicazione, è utilizzabile nel caso di strati orizzontali o con inclinazione uniforme e in presenza di una superficie topografica, almeno lungo lo stendimento, orizzontale. Si parte inoltre dal presupposto che la velocità dei rifrattori aumenti con la profondità. In pratica si dovrà verificare che la velocità delle onde P nel primo strato sia minore della velocità delle onde P nel secondo, a sua volta inferiore a quella del terzo, ecc. ( $V_1 < V_2 < V_3$ ).

### 2. Tecnica di misurazione e interpretazione MASW

La tecnica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves - Park et al., 1999) è un metodo d'indagine geofisica, sviluppato e diffuso negli ultimi dieci anni circa, che sfrutta le modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare delle onde di Rayleigh, generate da sorgenti artificiali (mazza battente o scoppio). Le onde di Rayleigh si muovono lungo l'interfaccia terra-aria e sono generate dalla rifrazione e riflessione multipla di onde di compressione (P) e onde di taglio che si propagano in direzione verticale (SV).

### 3. Tecnica di misurazione e interpretazione ReMi

La tecnica ReMi (Refraction Microtremor) è un metodo d'indagine geofisica che sfrutta invece le modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare delle onde di Rayleigh, generate però da sorgenti ambientali.

A differenza di quanto avviene nell'indagine eseguita con la tecnica MASW, dove la posizione delle sorgenti è nota ed è allineata allo stendimento, nel caso del ReMi i punti di origine dei microtremori sono spesso non identificabili. Quindi la registrazione viene protratta per tempi più lunghi. Essendo la potenza associata al segnale utile comparabile con quella del rumore di fondo è necessario rilevare un numero di tremori molto elevato, questo sarà ottenibile semplicemente andando a allungare i tempi di registrazione del segnale. A differenza dei pochi secondi necessari per acquisizioni MASW sono qui necessari da alcuni a molti minuti di acquisizione (in genere 10 - 20 minuti sono sufficienti).

I principi teorici e gli aspetti di acquisizione ed elaborazione dei dati sono sostanzialmente gli stessi della tecnica MASW con la differenza che con ReMi si ha una maggior definizione degli strati profondi.

### 4. Tecnica di misure ed interpretazione HVSR (tramite TROMINO)

Tale prospezione sismica si basa sull'acquisizione e sull'analisi del Rumore Sismico Ambientale (Seismic Noise) ovvero la continua vibrazione del suolo dovuta sia a cause antropiche

che naturali. Questa tipologia di tecniche (definite metodi sismici passivi) , dunque, non ha bisogno di alcuna energizzazione esterna poiché utilizza come sorgente il traffico veicolare, la produzione industriale, il vento, la pioggia e tutto ciò che è in grado di produrre una minima vibrazione sulla superficie del suolo.

In particolar modo con la tecnica a “ Stazione Singola” viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero “Horizontal to Vertical Spectral Ratios) (Nakamura, Y. [1989]). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno e individuare la frequenza fondamentale ( $f$ ) di questa vibrazione. Sapendo che in generale esiste una relazione semplice fra  $f$ , lo spessore della parte più soffice del terreno (ovvero la parte di materiali sovrastante il bed-rock) e la velocità media ( $V_s$ ) delle onde sismiche nel sottosuolo, attraverso le misure HVSR è possibile risalire allo spessore di questo strato. Si possono inoltre effettuare delle considerazioni di tipo “qualitativo” molto utili in merito a possibili interferenze tra le frequenze risonanti del suolo e degli edifici sovrastanti.

Per la valutazione del periodo proprio di risonanza del sottosuolo è stata utilizzata la tecnica a stazione singola Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Kanai,1957; Igarashi 1970; Nakamura 1989) che permette di estrarre informazioni relative alla frequenza di vibrazione del suolo a partire dagli spettri di rumore sismico registrati in sito. La tecnica prevede di calcolare il rapporto, in funzione della frequenza, tra gli spettri di risposta della componente orizzontale e verticale del moto dovuto ai microtremori ambientali. La misura di rumore sismico della durata di 26 minuti per ogni punto di misura è stata eseguita con una frequenza di campionamento a 128 Hz.

## **5. Strumentazione impiegata**

### Hardware

L’acquisizione dati per l’elaborazione MASW, ReMI e sismica a rifrazione è avvenuta tramite sismografo a 24 canali (mod. Dolang Geophysical DBS280 24 bit 24 canali) collegato a geofoni verticali a frequenza propria di 4.5Hz.

E' stato utilizzato un sismografo digitale modello “Tromino” (Micromed srl) avente un intervallo di acquisizione sulle frequenze da 0.1 a 256 Hz, dotato di sistema di acquisizione digitale ad alta risoluzione (24 bit) e primo-processing interno. La livellazione micrometrica dello strumento è stata assicurata per ogni misura tramite bolla di precisione agendo sui tre punti di appoggio (punte) ed orientando uno dei 3 sensori di acquisizione (ortogonali tra loro) verso il N magnetico.

### Software

Per le analisi dei dati acquisiti si sono adottati i software GeoMASW , GeoReMi, SismaCon di ProgramGeo (Brescia) e il software Grilla.

## Sito Stendimento Sismico St<sub>3</sub>

L'immagine a seguire mostra l'ubicazione dell'indagine denominata 'St<sub>3</sub>' ( ..... ) per lo stendimento sismico effettuato ai fini della classificazione sismica del suolo.



Lo stendimento sismico geofonico lineare multicanale con geofoni verticali (4.5 Hz) è stato posizionato e utilizzato per le prospezioni sismiche tipo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), ReMI (Refraction Microtremor) e Sismica a Rifrazione, analizzano le onde di superficie.

## Dati sperimentali (St<sub>3</sub>)

|                                               |        |
|-----------------------------------------------|--------|
| Numero di ricevitori .....                    | 24     |
| Distanza tra i sensori: .....                 | 2 m    |
| Numero di campioni temporali.....             | 2048   |
| Passo temporale di acquisizione.....          | 0.6 ms |
| Numero di ricevitori usati per l'analisi..... | ...24  |

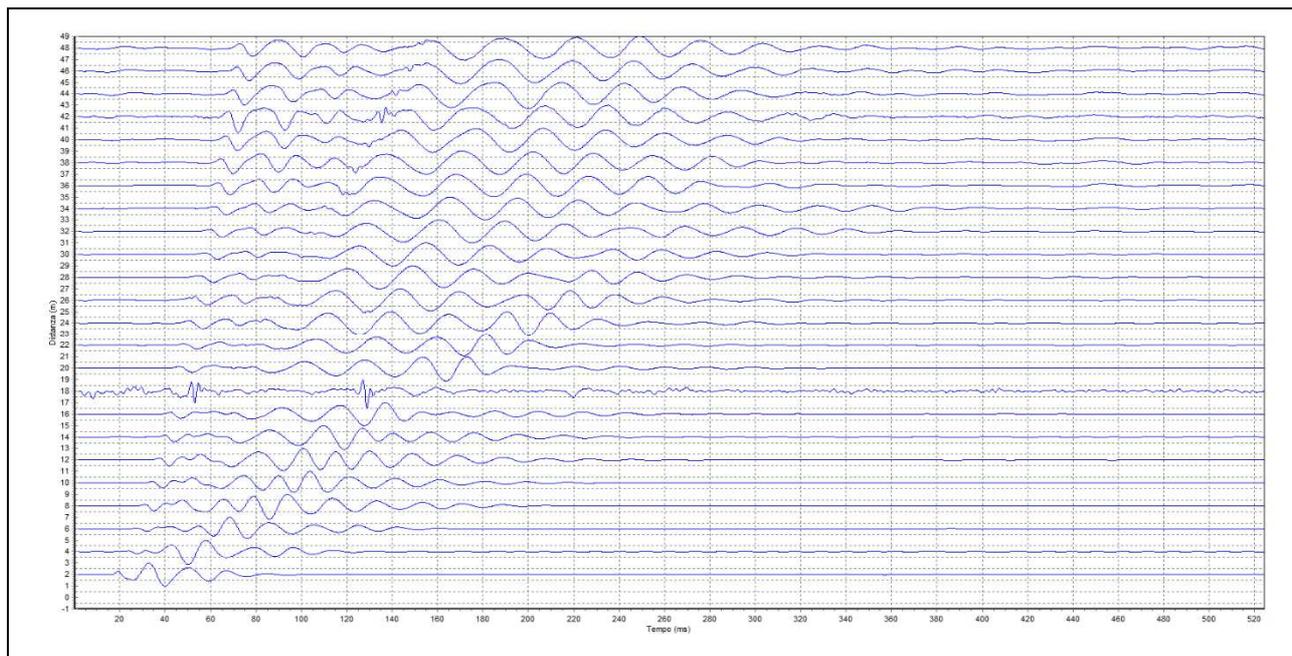


Figura 1.1: Tracce sperimentali tiro diretto

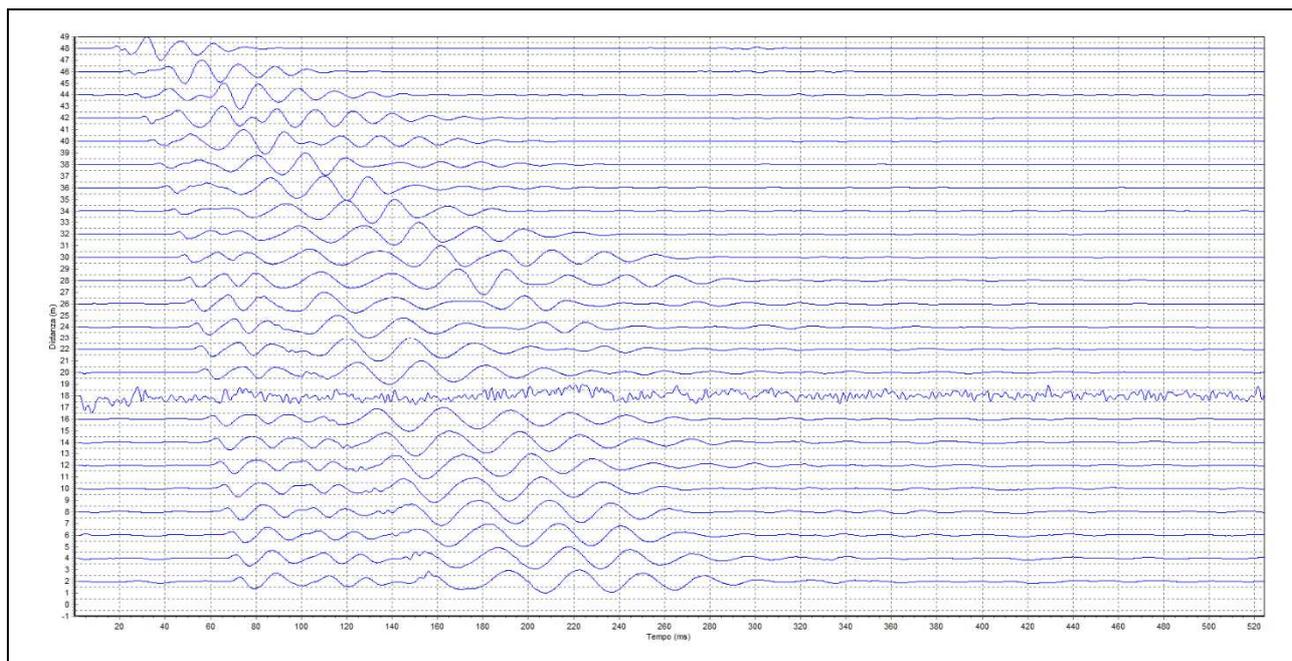


Figura 1.2: Tracce sperimentali tiro coniugato

### Sismica a rifrazione 3

L'interpretazione è stata effettuata sulla base di due sorgenti (mazza su piattello di battuta) poste rispettivamente 2 metri prima del primo geofono e 2 m oltre l'ultimo geofono.

Il metodo utilizzato è il Metodo convenzionale (metodo del tempo di ritardo - delay time); tale metodo è utilizzabile nel caso di strati orizzontali o con inclinazione uniforme e in presenza di una superficie topografica, almeno lungo lo stendimento, orizzontale. Si parte inoltre dal presupposto che la velocità dei rifrattori aumenti con la profondità. In pratica si dovrà verificare che la velocità delle onde P nel primo strato sia minore della velocità delle onde P nel secondo, a sua volta inferiore a quella del terzo, ecc. ( $V_1 < V_2 < V_3$ ), così come nel caso in esame.

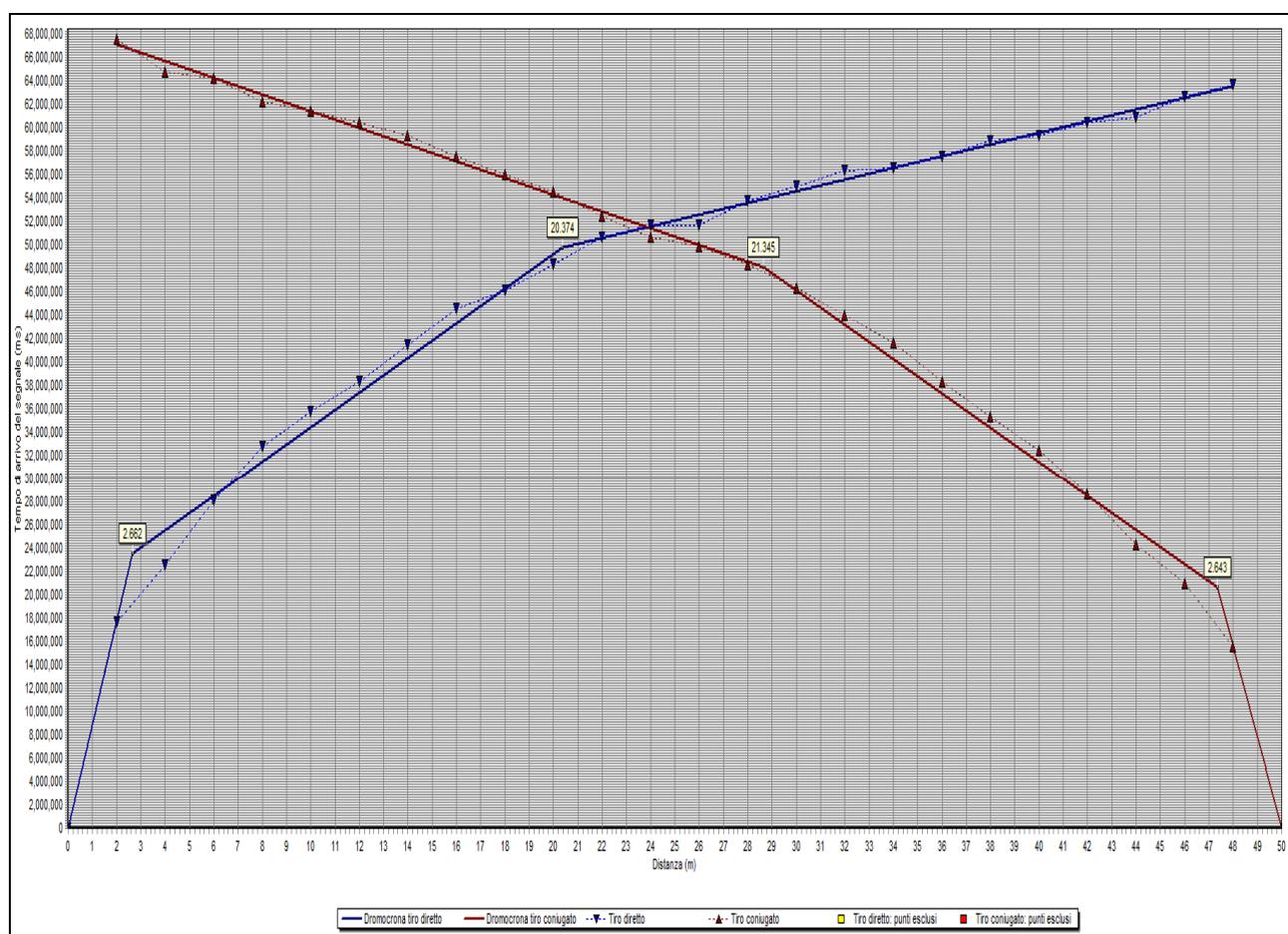


Figura 1.3: grafico generale curva distanza-tempo

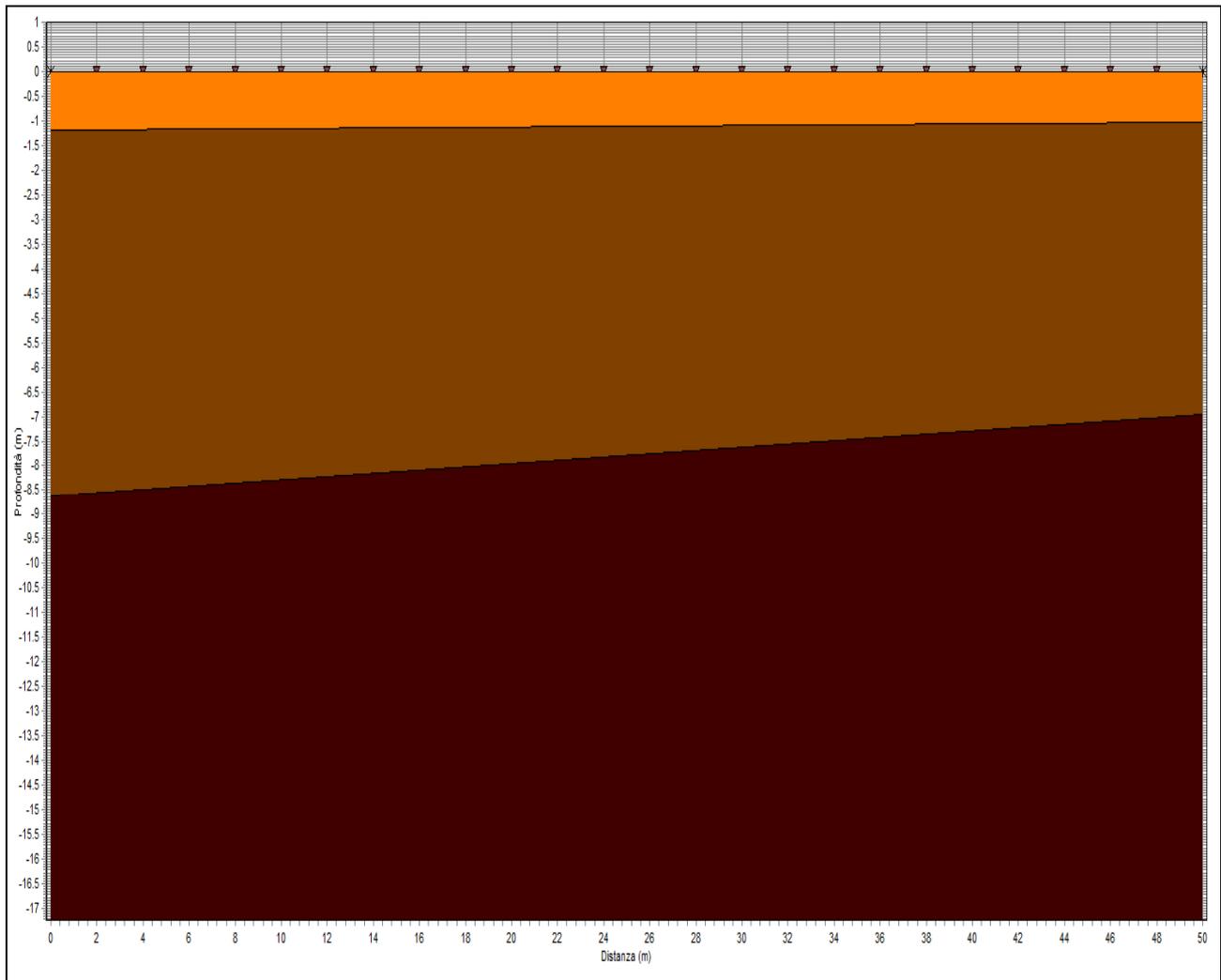


Figura 1.4: Sezione stratigrafica interpretata

La sezione stratigrafica è stata interpretata sulla base dei valori delle velocità delle onde P considerando il profilo topografico orizzontale e gli strati inclinati in maniera pseudo-uniforme.

| Strato n. | Vp (m/s) | Hs(m) | Hd(m) | rd    | ri    |
|-----------|----------|-------|-------|-------|-------|
| 1         | 488      | 1.199 | 1.027 | 1     | 1     |
| 2         | 854      | 8.619 | 6.956 | 0.987 | 0.992 |
| 3         | 998      |       |       | 0.994 | 0.994 |

**LEGENDA:**

Hs = spessore strato lato sinistro;

Hd = spessore strato lato destro;

Vp = velocità delle onde P.

Vs = velocità delle onde S.

rd = coefficiente correlazione tiro diretto

ri = coefficiente correlazione tiro inverso

## Analisi MASW 3

Frequenza minima .....15 Hz

Frequenza massima .....50 Hz

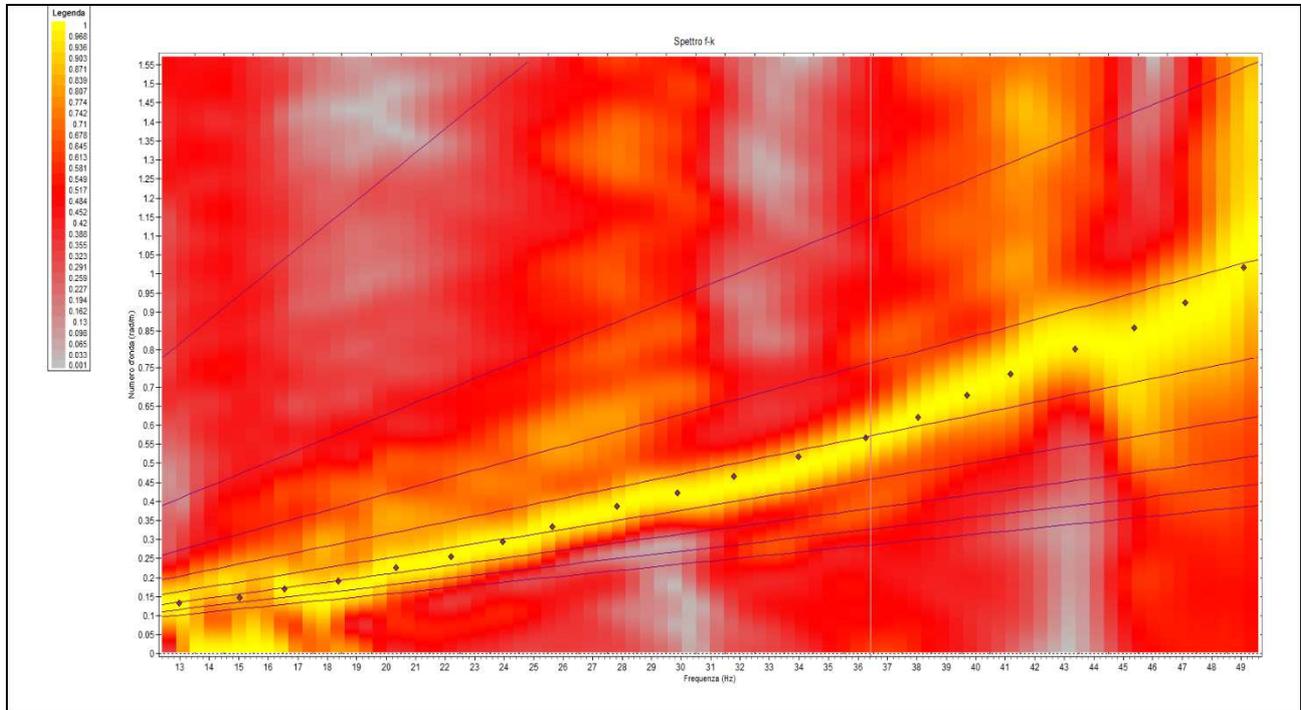


Figura 1.5: Spettro f – k

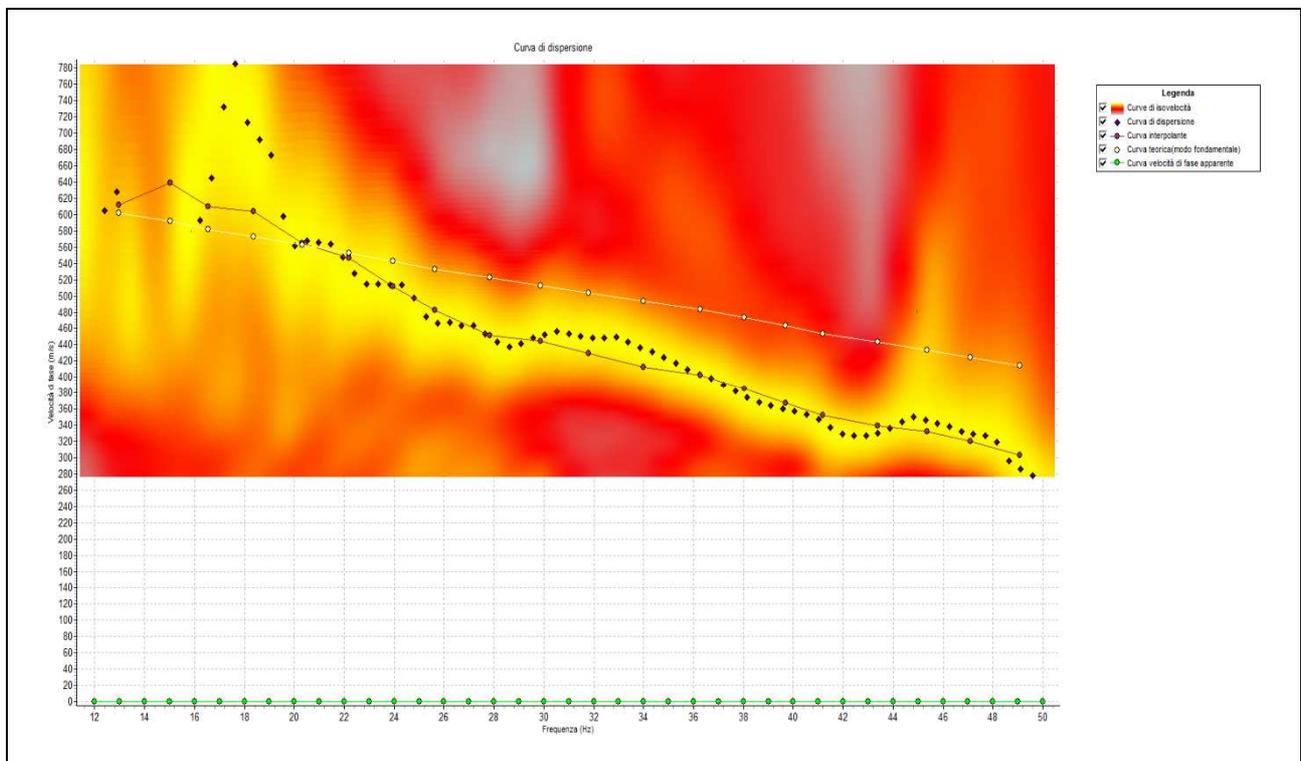


Figura 1.6: Curva di dispersione

L'interpretazione utilizza un algoritmo di inversione che consente di generare una curva di dispersione teorica una volta inserito un modello stratigrafico iniziale del terreno fino alla profondità desiderata e le caratteristiche del semispazio elastico di riferimento.

Procedendo per tentativi, secondo la procedura di Dunkin (1965) modificata da Watson (1970), il programma modifica in automatico il modello iniziale fino a quando lo scarto quadratico medio calcolato fra curva sperimentale e teorica non scende sotto un valore di soglia impostato e modificabile dall'operatore.

Poiché generalmente il metodo empirico genera in automatico un numero elevato di strati, si semplifica il modello iniziale generato mediando i livelli con valori di Vs simili.

Numero di strati (escluso semispazio)..... 4  
 Spaziatura ricevitori [m]..... 2 m  
 Numero ricevitori ..... 24

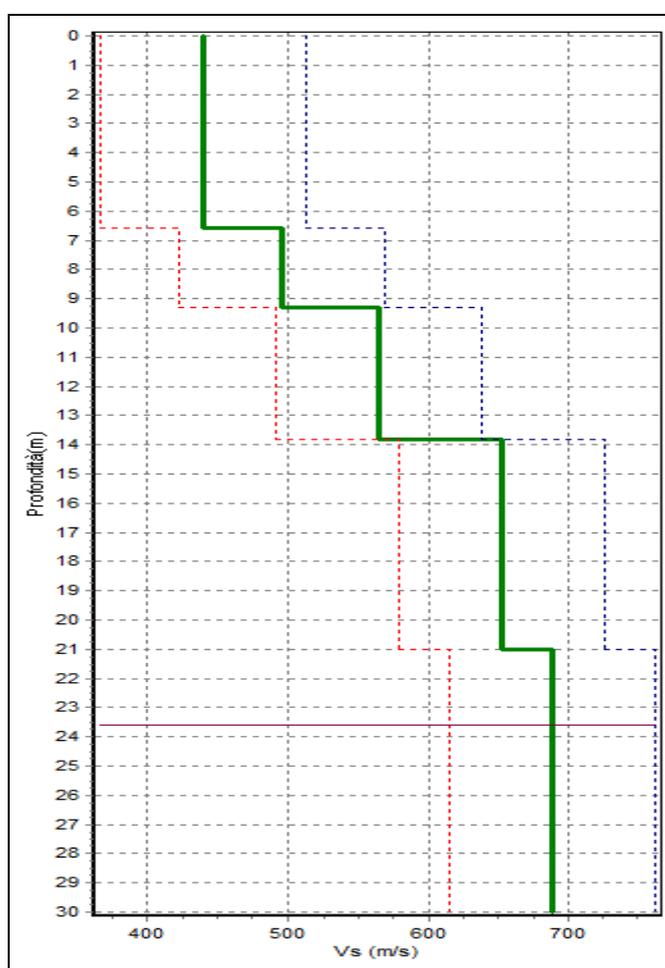


Figura 1.7: Profilo Vs numerico

La sezione stratigrafica risulta attendibile fino a circa 23-24 m di profondità; oltre tale valore il segnale risulta troppo disturbato anche se si può intuire un aumento dei valori di velocità con la profondità.

## Analisi ReMi 3

Numero di ricevitori ..... 24  
 Distanza tra i sensori: ..... 2 m  
 Numero di ricevitori usati per l'analisi.....24

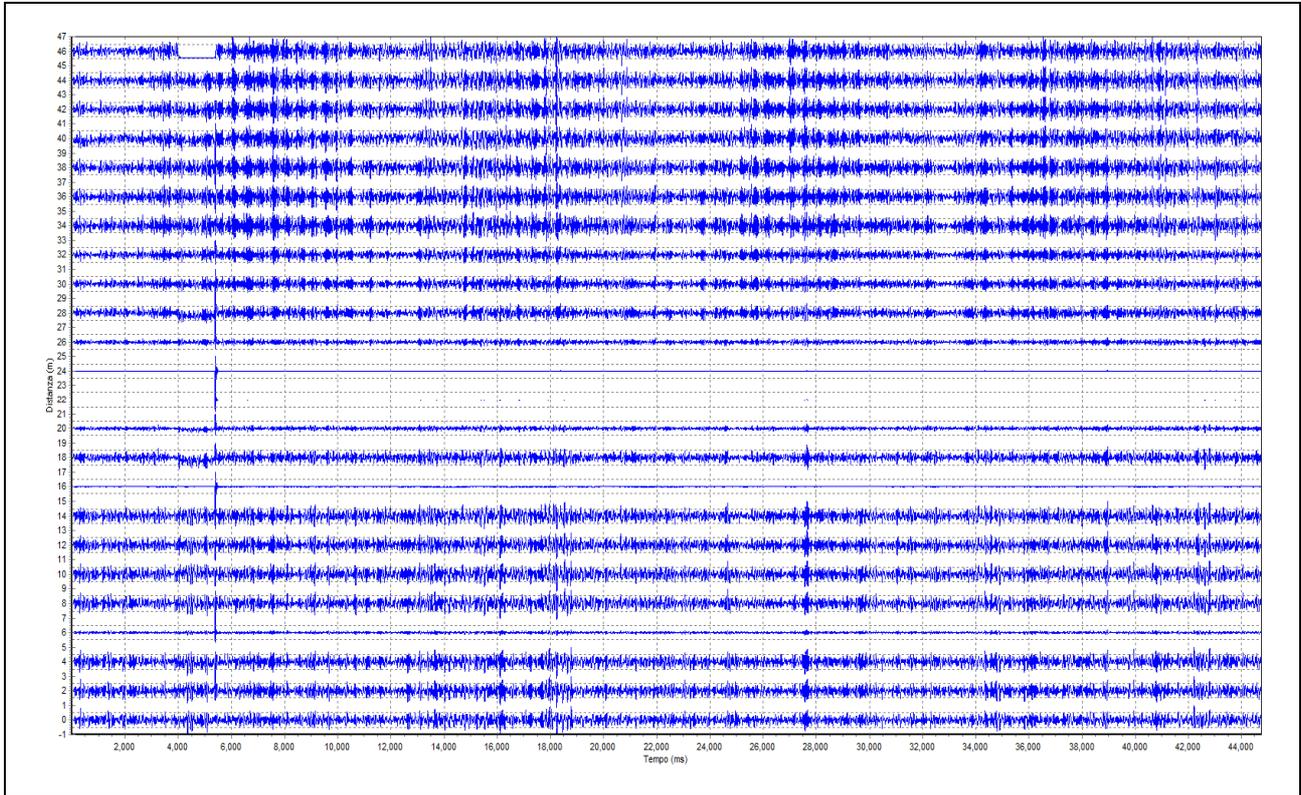


Figura 2.1: Tracce sperimentali

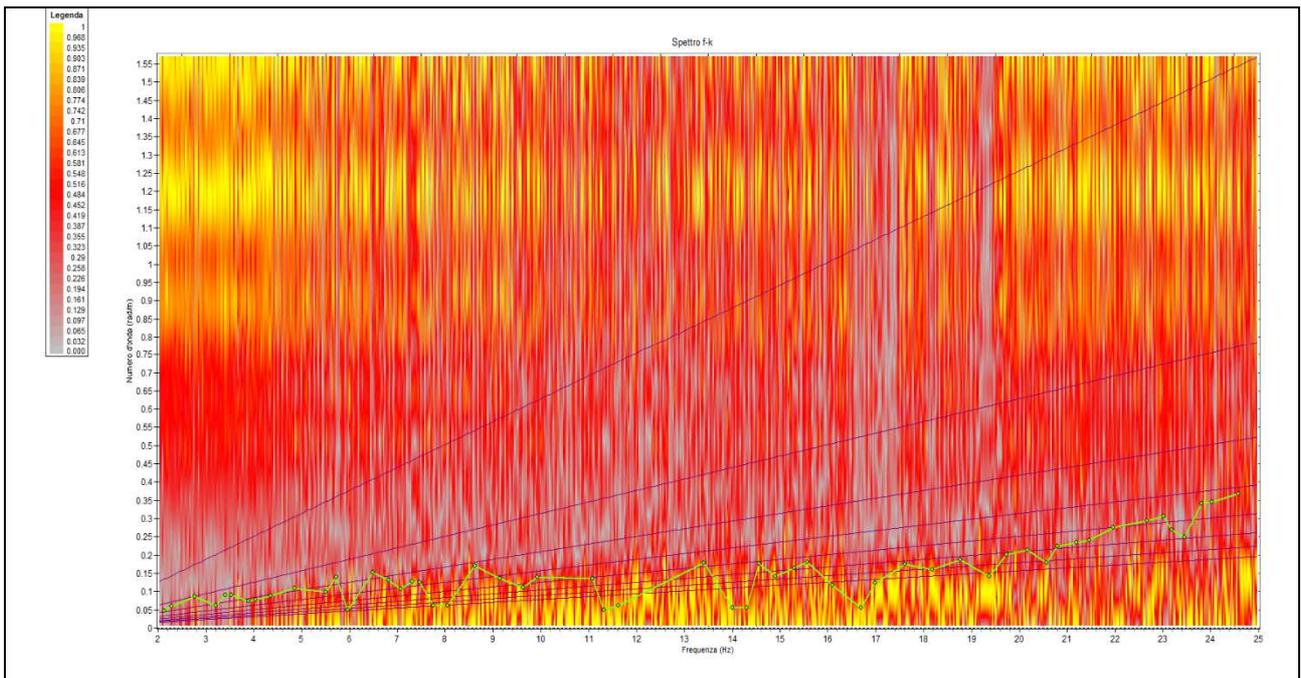


Figura 2.2: Spettro f - k

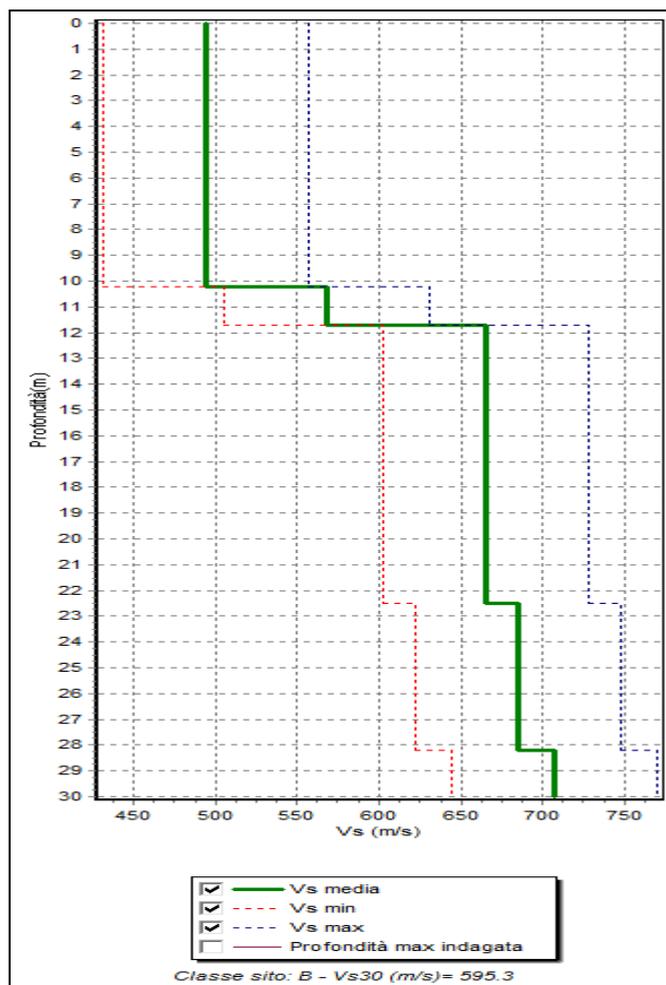


Figura 2.3: Profilo ReMi Vs numerico

### Conclusioni (St<sub>3</sub>)

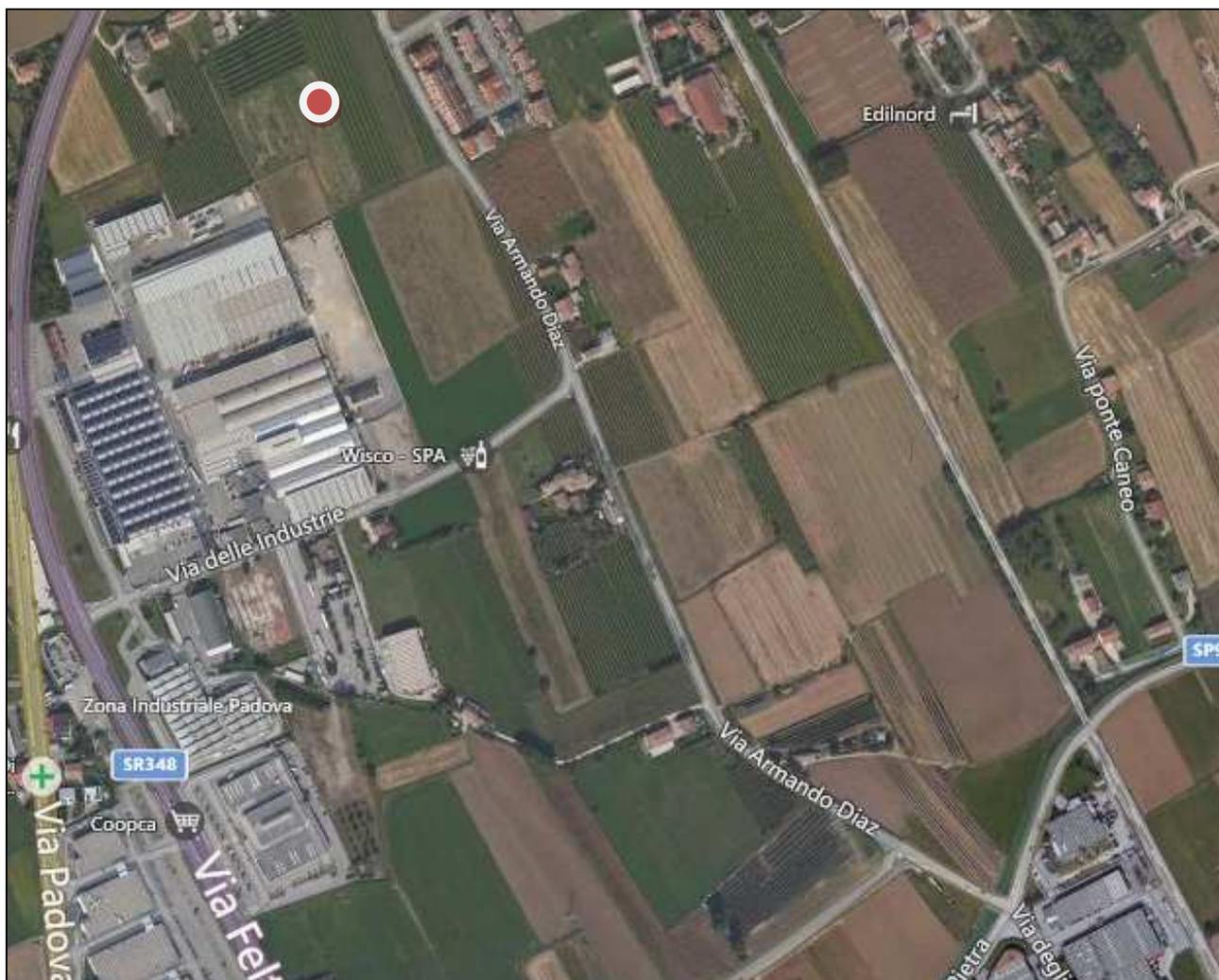
Secondo la misura sperimentale effettuata e la modellazione del sottosuolo elaborata dal trattamento dei dati con i tre metodi appena descritti, per lo stendimento sismico St<sub>1</sub> si individuano materiali sciolti di media consistenza caratterizzati da velocità delle onde sismiche di taglio tipiche di materiali granulari medio fini.

In sintesi viene riportata una stratigrafia sismica di massima del sito indagato:

| Profondità (m) | Vs (m/s) | Considerazioni  |
|----------------|----------|-----------------|
| 0 – 12 m       | 490      | Ghiaie          |
| 12 - 30 m      | 670      | Ghiaie compatte |

## Periodo proprio di risonanza del suolo (HV<sub>3</sub>)

La foto aerea mostra l'ubicazione della indagine denominata HV<sub>3</sub> (  ) indicante il punto di acquisizione di rumore sismico ambientale finalizzata alla definizione del periodo proprio del suolo.



Nello studio specifico degli effetti di sito, la frequenza di campionamento utilizzata è di 128 Hz, con tempi di misura dell'ordine di 26 minuti.

Per la misura, oltre allo spettro H/V, è palesata la trasformata delle singole componenti, l'analisi direzionale e temporale del rumore sismico acquisito.

## Analisi HV<sub>3</sub>

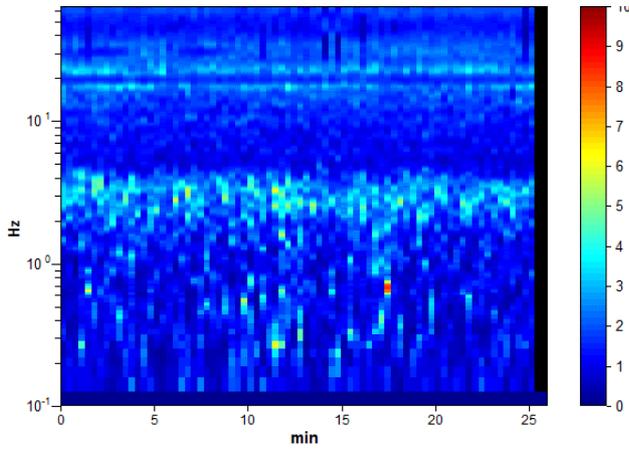


Figura 3.1: analisi temporale del rumore

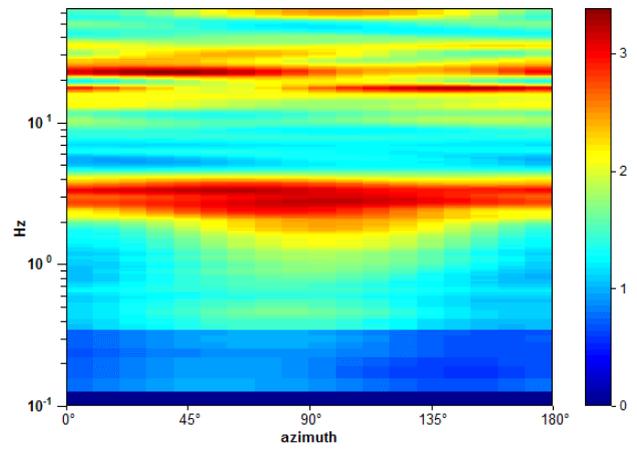


Figura 3.2: analisi direzionale del rumore

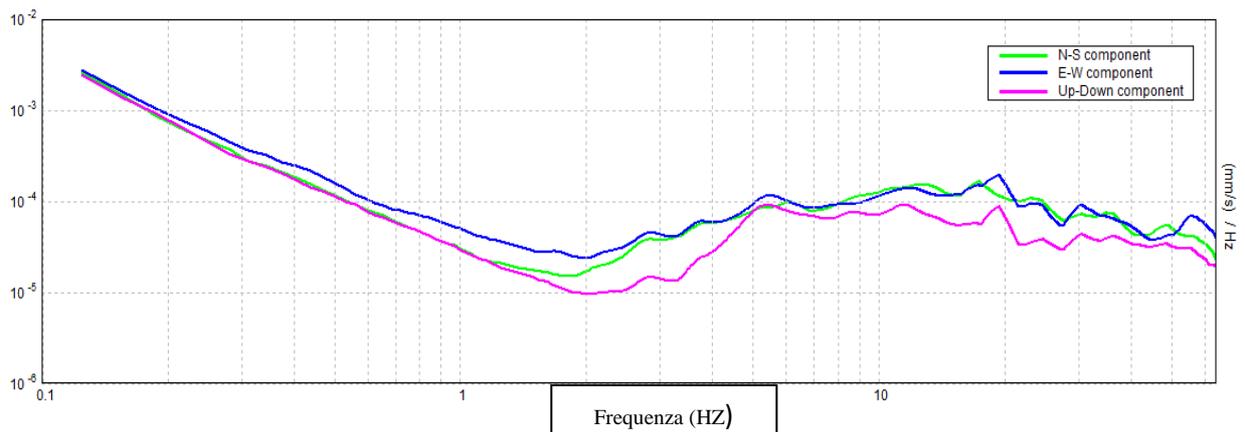


Figura 3.3: spettri delle 3 componenti

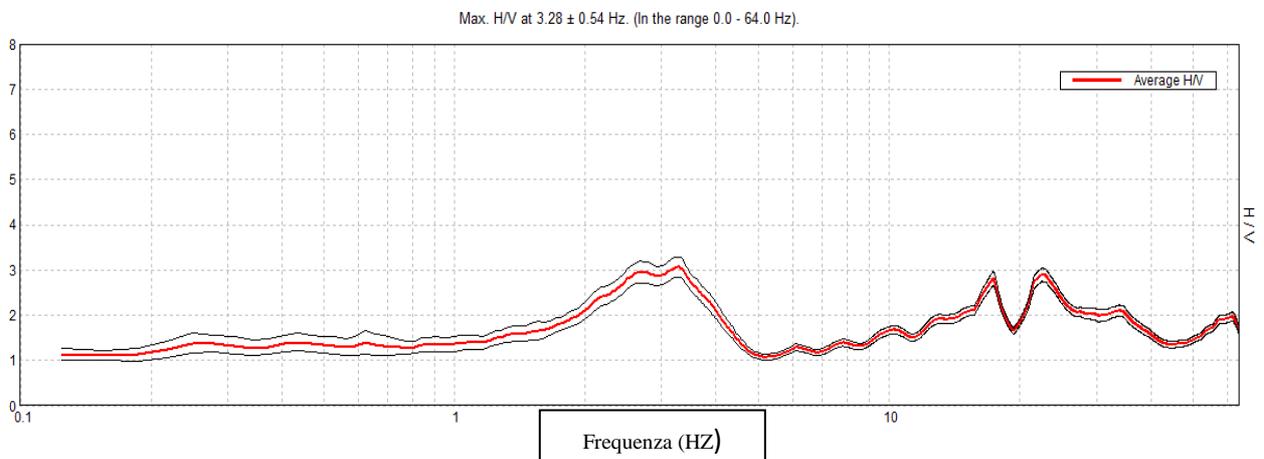


Figura 3.4: rapporto H/V

Una delle misure effettuate (HV) ha subito notevole influenza da rumore antropico. Tutte le tracce escludono la presenza di un netto contrasto di impedenza acustica nel sottosuolo. Non si individuano picchi di risonanza.

In termini di interpretazione del contrasto di impedenza acustica responsabile, eventuali picchi riscontrati, adottando secondo l'ipotesi  $\lambda/4$  una funzione di trasferimento di tipo:

$$F(\omega) = 1/\cos(\omega H/V_s)$$

La frequenza naturale ( $F_n$ ) di vibrazione dello strato di terreno corrisponde ai massimi della funzione di amplificazione:

$$F_n = \omega_n / 2\pi (V_s/4H)$$

con  $H$  profondità del rifrattore e  $V_s$  velocità delle onde sismiche di taglio, si può imporre la risonanza del sistema secondo la seguente relazione con  $T$  periodo proprio del suolo:

$$T = 2\pi/\omega = 4H/V_s$$

La situazione più pericolosa in termini di fenomeni di amplificazione si verifica quando la frequenza dell'eccitazione armonica ( $\omega$ ) è pari ad una delle frequenze fondamentali dello strato ( $\omega_n$ ). Quando si verifica tale condizione ( $\omega = \omega_n$ ) si ha la risonanza dello strato, ed il fattore di amplificazione è teoricamente infinito. E' quindi di fondamentale importanza porre attenzione ai fenomeni di "doppia risonanza", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei fabbricati.

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

#### **Freq. Naturale edificio \_ 10 Hz / numero piani**

E' la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

#### **Freq. naturale edificio - Freq. fondamentale di risonanza del sito**

ad essere particolarmente pericolosa, poiché dà luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.

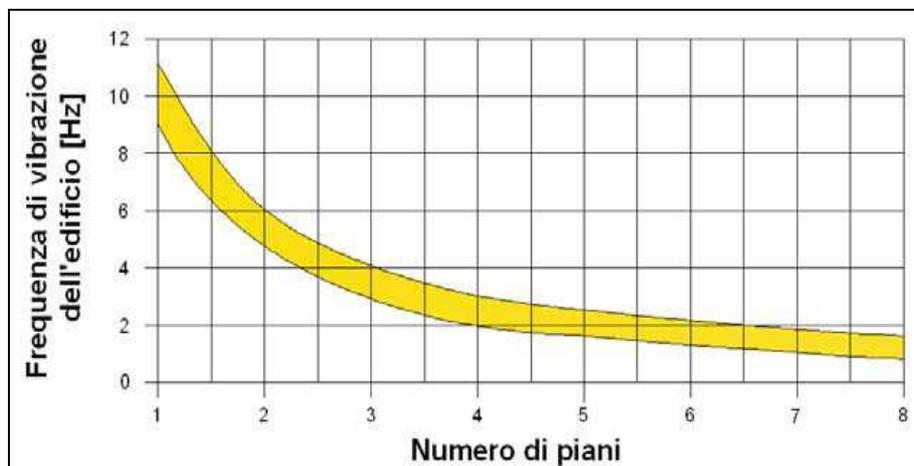


Tabella riassuntiva delle frequenze registrate in un range da 0,0 a 64,0 Hz:

| Sito di indagine | Frequenza max H/V | Considerazioni                                                                     |
|------------------|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| HV               | 3,28 Hz           | Dato registrato in condizioni di basso rumore antropico (traffico automobilistico) |

### Conclusioni HV<sub>3</sub>

Tutte le misurazioni sono state testate per validarne l'efficacia tramite i parametri suggeriti dal Progetto Europeo SESAME:

| Max. H/V at 3.28 ± 0.54 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).                                                                                                                                                          |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |           |            |            |            |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|------------|------------|------------|
| <b>Criteria for a reliable H/V curve</b><br>[All 3 should be fulfilled]                                                                                                                                           |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |           |            |            |            |
| $f_0 > 10 / L_w$                                                                                                                                                                                                  | 3.28 > 0.50                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | OK        |            |            |            |
| $\Omega_c(f_0) > 200$                                                                                                                                                                                             | 5118.8 > 200                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                | OK        |            |            |            |
| $\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$<br>$\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$                                                                            | Exceeded 0 out of 158 times                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 | OK        |            |            |            |
| <b>Criteria for a clear H/V peak</b><br>[At least 5 out of 6 should be fulfilled]                                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |           |            |            |            |
| Exists $f^-$ in $[f_0/4, f_0]$   $A_{HV}(f^-) < A_0 / 2$                                                                                                                                                          | 1.281 Hz                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | OK        |            |            |            |
| Exists $f^+$ in $[f_0, 4f_0]$   $A_{HV}(f^+) < A_0 / 2$                                                                                                                                                           | 4.438 Hz                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | OK        |            |            |            |
| $A_0 > 2$                                                                                                                                                                                                         | 3.07 > 2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | OK        |            |            |            |
| $f_{\text{peak}}[A_{HV}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$                                                                                                                                                        | 0.16493  < 0.05                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |           | NO         |            |            |
| $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$                                                                                                                                                                                     | 0.54118 < 0.16406                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |           | NO         |            |            |
| $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$                                                                                                                                                                                     | 0.2244 < 1.58                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | OK        |            |            |            |
| $L_w$<br>$\Omega_c$<br>$\Omega_c = L_w \Omega_w f_0$<br>$f$<br>$f_0$<br>$\sigma_f$<br>$\varepsilon(f_0)$<br>$A_0$<br>$A_{HV}(f)$<br>$f^-$<br>$f^+$<br>$\sigma_A(f)$<br>$\sigma_{\log A_{HV}(f)}$<br>$\theta(f_0)$ | window length<br>number of windows used in the analysis<br>number of significant cycles<br>current frequency<br>H/V peak frequency<br>standard deviation of H/V peak frequency<br>threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$<br>H/V peak amplitude at frequency $f_0$<br>H/V curve amplitude at frequency $f$<br>frequency between $f_0/4$ and $f_0$ for which $A_{HV}(f^-) < A_0/2$<br>frequency between $f_0$ and $4f_0$ for which $A_{HV}(f^+) < A_0/2$<br>standard deviation of $A_{HV}(f)$ , $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{HV}(f)$ curve should be multiplied or divided<br>standard deviation of $\log A_{HV}(f)$ curve<br>threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$ |           |            |            |            |
| Threshold values for $\sigma_f$ and $\sigma_A(f_0)$                                                                                                                                                               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |           |            |            |            |
| Freq. range [Hz]                                                                                                                                                                                                  | < 0.2                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 0.2 – 0.5 | 0.5 – 1.0  | 1.0 – 2.0  | > 2.0      |
| $\varepsilon(f_0)$ [Hz]                                                                                                                                                                                           | 0.25 $f_0$                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 0.2 $f_0$ | 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 $\sigma_{\log A_{HV}(f_0)}$                                                                                                                                                                | 0.48                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 0.40      | 0.30       | 0.25       | 0.20       |

Sulla base di queste considerazioni, il sito in esame presenta un picco massimo di risonanza riscontrabile di 3,28 Hz; i dati appaiono propri di un graduale e progressivo miglioramento delle condizioni meccaniche del sottosuolo sino a rilevanti profondità.

## Risultati finali

L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) e sismica passiva (ReMI) ha consentito di determinare il profilo verticale della VS (e del modulo di taglio) e, di conseguenza, del parametro Vs30 (considerando come riferimento il piano campagna  $z = 0$  m).

Questi trovano peraltro riscontro nel modello sismostratigrafico ricavato dalla sismica a rifrazione.

In sintesi:

|                                                            | BEDROCK                          |    |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------|----|
|                                                            | NO                               | SI |
| <b>COPERTURA</b>                                           | Sciolta                          |    |
| <b>SPESSORE</b>                                            | 23 m (spessore certo registrato) |    |
| <b>PARAMETRO Vs da MASW</b><br><b>PARAMETRO Vs da ReMi</b> | <b>Vs 30 = 595 m/s</b>           |    |
| <b>CATEGORIA DEL SOTTOSUOLO</b>                            | <b>B</b>                         |    |
| <b>PICCHI DI FREQUENZE da H/V</b>                          | <b>Picco massimo 3,28 Hz</b>     |    |

Rispetto le norme tecniche per le costruzioni (DM 14 gennaio 2008, ex DM 14/09/2005) il sito in esame rientra quindi nella **categoria B**

### **Suolo di tipo B**

Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, con spessori superiori a 30m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs30, compresi fra 360 m/s e 800 m/s ( $N_{spt,30} > 50$  nei terreni a grana grossa o  $cu_{30} > 250$  kPa nei terreni a grana fina).

Naturalmente il vero dato di velocità va considerato in un ragionevole intorno del dato proveniente dalle elaborazioni sperimentali ( $\pm 10\%$ ), per cui i terreni con velocità borderline vengono cautelativamente attribuiti alla categoria inferiore.

**Una elaborazione più spinta dei dati con l'introduzione di filtraggi particolari avrebbe portato a risultati opinabili. Le conclusioni riguardano quindi solo le elaborazioni dei dati ritenuti attendibili.**

Cison di Valmarino, 10/04/2015

il Geologo  
dott. Simone Bortolini

**STUDIO TECNICO DI GEOLOGIA APPLICATA ALL'INGEGNERIA**  
dott. geol. SIMONE BORTOLINI via San Vito, 9/A Cison di Valmarino (TV)  
tel. 338-1977870  
e-mail simonebortolini@libero.it

---

# **Relazione**

## **Sismica a Rifrazione - MASW – ReMi - HVSr**

per la definizione del profilo verticale Vs e parametro Vs30

---

# **CDM\_SMC 4**

## **CROCETTA DEL MONTELLO (TV)**

### **Via Sant'Andrea**

Coordinate WGS84

Lat. N 45,823431 Long. E 12,028358

Coordinate ED50

Lat. N 45,824331 Long. E 12,029358

---



il Geologo

dott. Simone Bortolini

# Introduzione

Al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame è stata effettuata una serie di acquisizioni MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves, analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva – e.g. Park et al., 1999) e ReMi (Refraction Microtremor -Louie, 2001) utili a definire il profilo verticale della  $V_s$  (velocità di propagazione delle onde di taglio) oltre alla tradizionale sismica a rifrazione.

## 1. Interpretazione di stendimenti di sismica a rifrazione

Questo metodo, di semplice applicazione, è utilizzabile nel caso di strati orizzontali o con inclinazione uniforme e in presenza di una superficie topografica, almeno lungo lo stendimento, orizzontale. Si parte inoltre dal presupposto che la velocità dei rifrattori aumenti con la profondità. In pratica si dovrà verificare che la velocità delle onde P nel primo strato sia minore della velocità delle onde P nel secondo, a sua volta inferiore a quella del terzo, ecc. ( $V_1 < V_2 < V_3$ ).

## 2. Tecnica di misurazione e interpretazione MASW

La tecnica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves - Park et al., 1999) è un metodo d'indagine geofisica, sviluppato e diffuso negli ultimi dieci anni circa, che sfrutta le modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare delle onde di Rayleigh, generate da sorgenti artificiali (mazza battente o scoppio). Le onde di Rayleigh si muovono lungo l'interfaccia terra-aria e sono generate dalla rifrazione e riflessione multipla di onde di compressione (P) e onde di taglio che si propagano in direzione verticale (SV).

## 3. Tecnica di misurazione e interpretazione ReMi

La tecnica ReMi (Refraction Microtremor) è un metodo d'indagine geofisica che sfrutta invece le modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare delle onde di Rayleigh, generate però da sorgenti ambientali.

A differenza di quanto avviene nell'indagine eseguita con la tecnica MASW, dove la posizione delle sorgenti è nota ed è allineata allo stendimento, nel caso del ReMi i punti di origine dei microtremori sono spesso non identificabili. Quindi la registrazione viene protratta per tempi più lunghi. Essendo la potenza associata al segnale utile comparabile con quella del rumore di fondo è necessario rilevare un numero di tremori molto elevato, questo sarà ottenibile semplicemente andando a allungare i tempi di registrazione del segnale. A differenza dei pochi secondi necessari per acquisizioni MASW sono qui necessari da alcuni a molti minuti di acquisizione (in genere 10 - 20 minuti sono sufficienti).

I principi teorici e gli aspetti di acquisizione ed elaborazione dei dati sono sostanzialmente gli stessi della tecnica MASW con la differenza che con ReMi si ha una maggior definizione degli strati profondi.

## 4. Tecnica di misure ed interpretazione HVSR (tramite TROMINO)

Tale prospezione sismica si basa sull'acquisizione e sull'analisi del Rumore Sismico Ambientale (Seismic Noise) ovvero la continua vibrazione del suolo dovuta sia a cause antropiche che naturali. Questa tipologia di tecniche (definite metodi sismici passivi), dunque, non ha bisogno

di alcuna energizzazione esterna poiché utilizza come sorgente il traffico veicolare, la produzione industriale, il vento, la pioggia e tutto ciò che è in grado di produrre una minima vibrazione sulla superficie del suolo.

In particolar modo con la tecnica a “ Stazione Singola” viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero “Horizontal to Vertical Spectral Ratios) (Nakamura, Y. [1989]). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno e individuare la frequenza fondamentale ( $f$ ) di questa vibrazione. Sapendo che in generale esiste una relazione semplice fra  $f$ , lo spessore della parte più soffice del terreno (ovvero la parte di materiali sovrastante il bed-rock) e la velocità media ( $V_s$ ) delle onde sismiche nel sottosuolo, attraverso le misure HVSR è possibile risalire allo spessore di questo strato. Si possono inoltre effettuare delle considerazioni di tipo “qualitativo” molto utili in merito a possibili interferenze tra le frequenze risonanti del suolo e degli edifici sovrastanti.

Per la valutazione del periodo proprio di risonanza del sottosuolo è stata utilizzata la tecnica a stazione singola Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Kanai, 1957; Igarashi 1970; Nakamura 1989) che permette di estrarre informazioni relative alla frequenza di vibrazione del suolo a partire dagli spettri di rumore sismico registrati in sito. La tecnica prevede di calcolare il rapporto, in funzione della frequenza, tra gli spettri di risposta della componente orizzontale e verticale del moto dovuto ai microtremori ambientali. La misura di rumore sismico della durata di 26 minuti per ogni punto di misura è stata eseguita con una frequenza di campionamento a 128 Hz.

## 5. Strumentazione impiegata

### Hardware

L’acquisizione dati per l’elaborazione MASW, ReMI e sismica a rifrazione è avvenuta tramite sismografo a 24 canali (mod. Dolang Geophysical DBS280 24 bit 24 canali) collegato a geofoni verticali a frequenza propria di 4.5Hz.

È stato utilizzato un tromografo digitale modello “Tromino” (Micromed srl) avente un intervallo di acquisizione sulle frequenze da 0.1 a 256 Hz, dotato di sistema di acquisizione digitale ad alta risoluzione (24 bit) e primo-processing interno. La livellazione micrometrica dello strumento è stata assicurata per ogni misura tramite bolla di precisione agendo sui tre punti di appoggio (punte) ed orientando uno dei 3 sensori di acquisizione (ortogonali tra loro) verso il N magnetico.

### Software

Per le analisi dei dati acquisiti si sono adottati i software GeoMASW , GeoReMi, SismaCon di ProgramGeo (Brescia) e il software Grilla.

## Sito Stendimento Sismico St<sub>4</sub>

L'immagine a seguire mostra l'ubicazione dell'indagine denominata 'St<sub>4</sub>' ( ..... ) per lo stendimento sismico effettuato ai fini della classificazione sismica del suolo.



Lo stendimento sismico geofonico lineare multicanale con geofoni verticali (4.5 Hz) è stato posizionato e utilizzato per le prospezioni sismiche tipo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), ReMI (Refraction Microtremor) e Sismica a Rifrazione, analizzano le onde di superficie.

## Dati sperimentali (St4)

|                                               |        |
|-----------------------------------------------|--------|
| Numero di ricevitori .....                    | 24     |
| Distanza tra i sensori: .....                 | 2 m    |
| Numero di campioni temporali.....             | 2048   |
| Passo temporale di acquisizione.....          | 0.6 ms |
| Numero di ricevitori usati per l'analisi..... | ...24  |

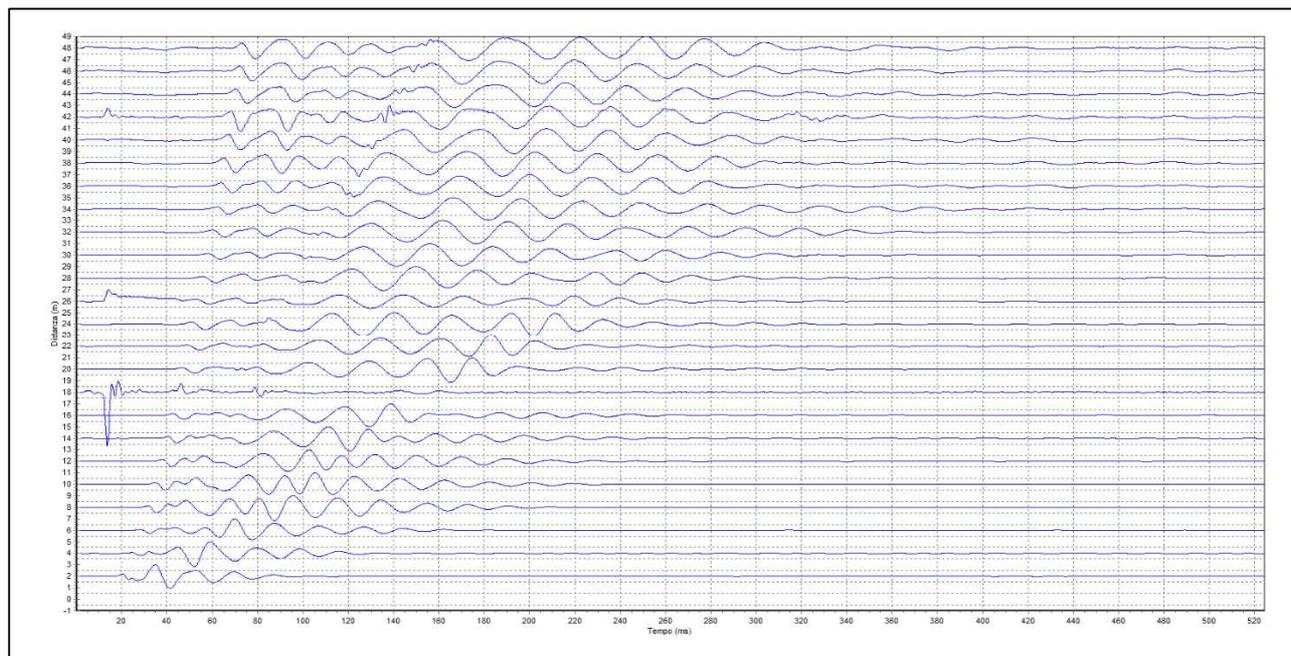


Figura 1.1: Tracce sperimentali tiro diretto

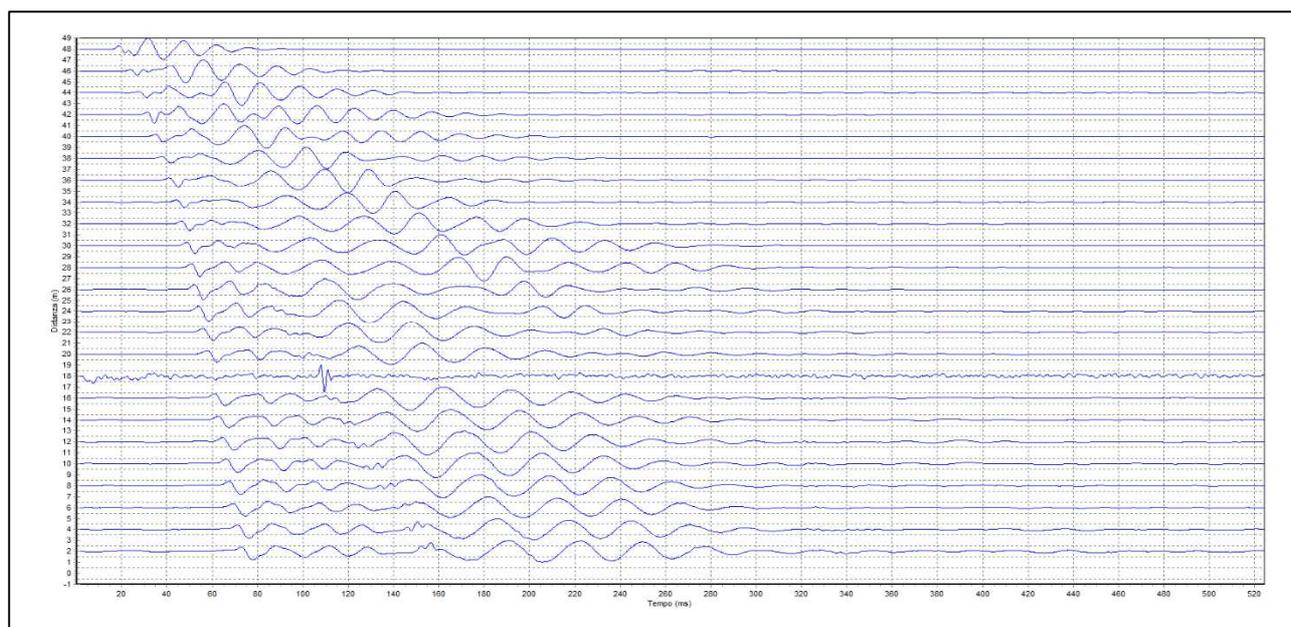


Figura 1.2: Tracce sperimentali tiro coniugato

## Sismica a rifrazione 4

L'interpretazione è stata effettuata sulla base di due sorgenti (mazza su piattello di battuta) poste rispettivamente 2 metri prima del primo geofono e 2 m oltre l'ultimo geofono.

Il metodo utilizzato è il Metodo convenzionale (metodo del tempo di ritardo - delay time); tale metodo è utilizzabile nel caso di strati orizzontali o con inclinazione uniforme e in presenza di una superficie topografica, almeno lungo lo stendimento, orizzontale. Si parte inoltre dal presupposto che la velocità dei rifrattori aumenti con la profondità. In pratica si dovrà verificare che la velocità delle onde P nel primo strato sia minore della velocità delle onde P nel secondo, a sua volta inferiore a quella del terzo, ecc. ( $V_1 < V_2 < V_3$ ), così come nel caso in esame.

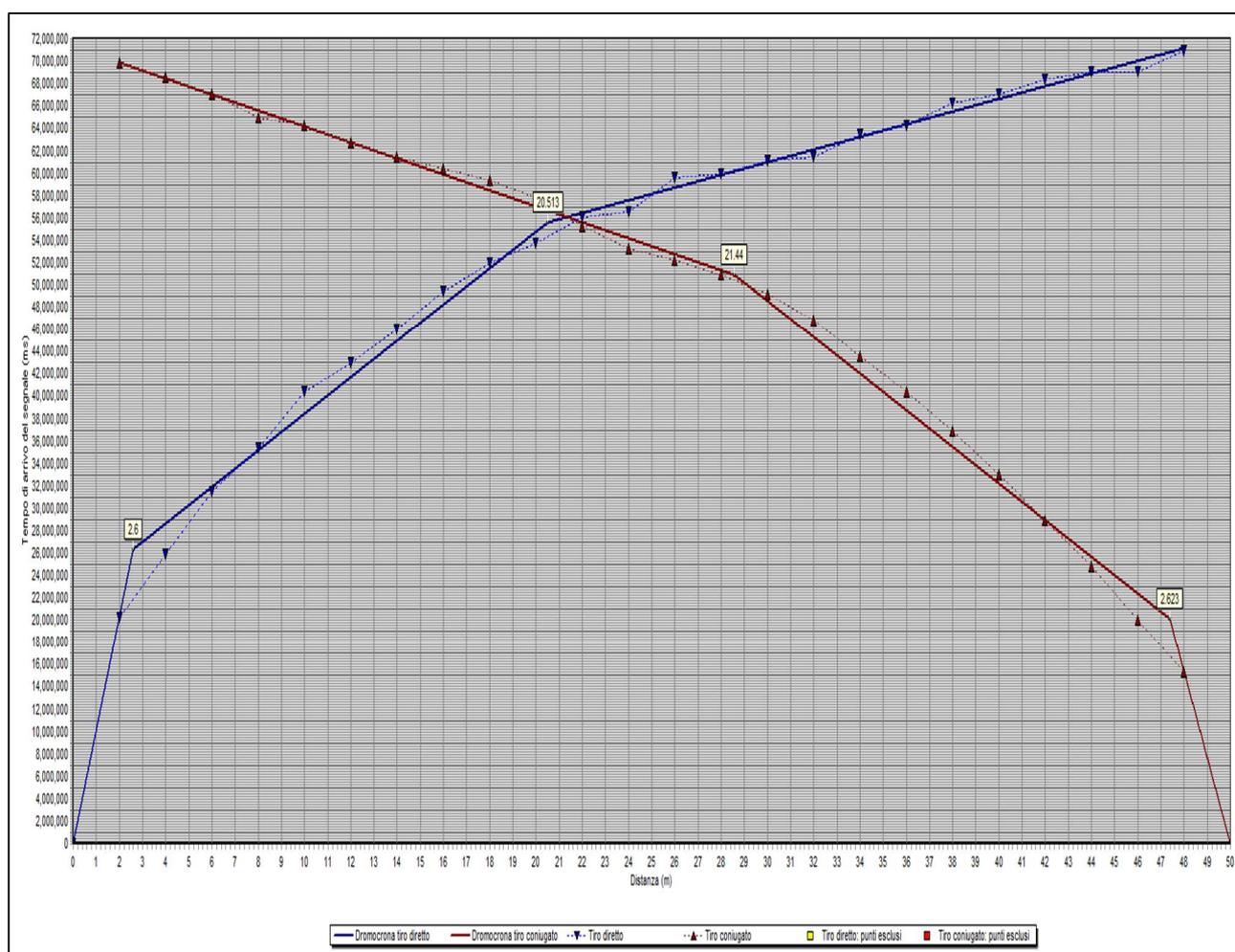


Figura 1.3: gráfico general curva distancia-tempo

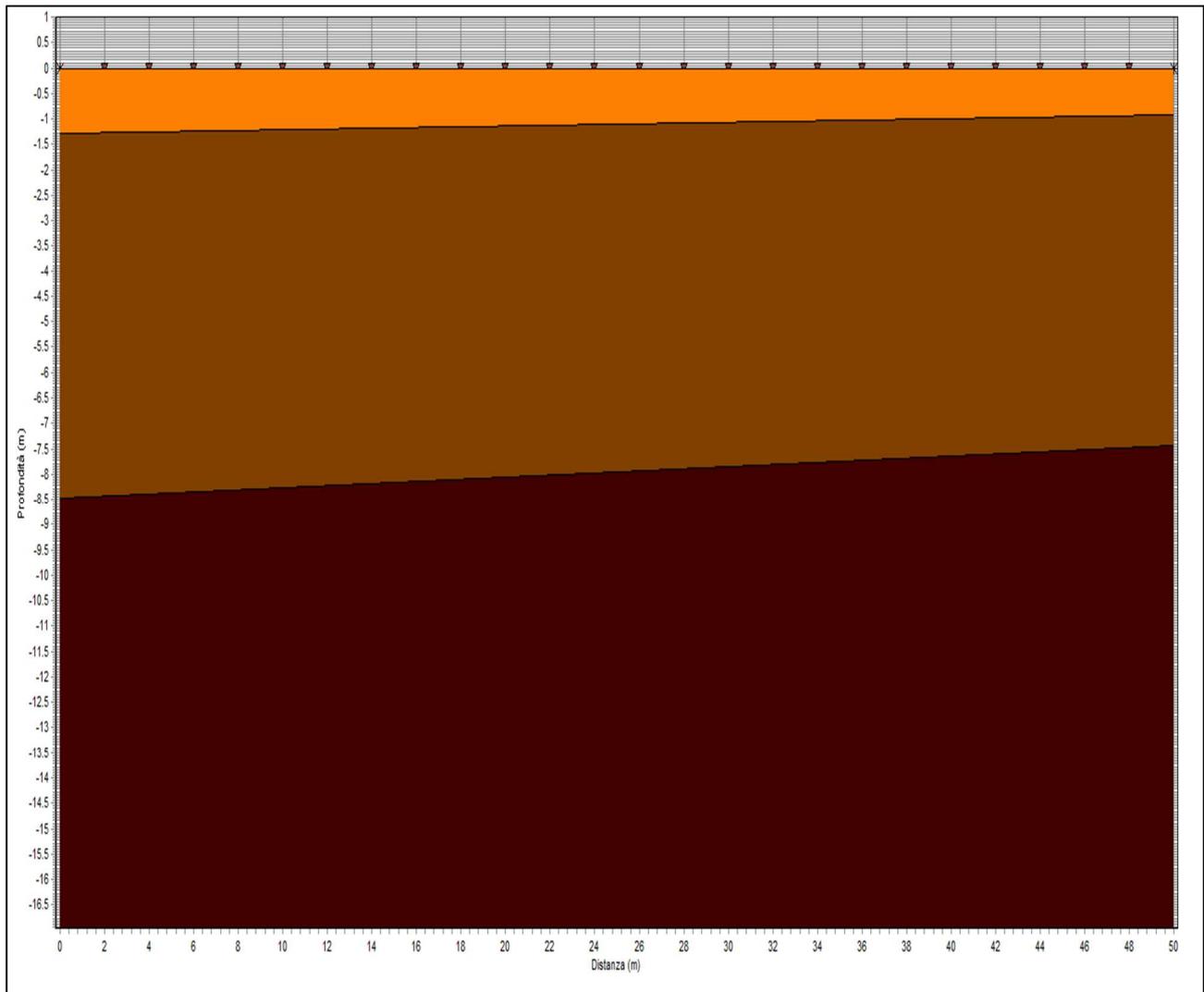


Figura 1.4: Sezione stratigrafica interpretata

La sezione stratigrafica è stata interpretata sulla base dei valori delle velocità delle onde P considerando il profilo topografico orizzontale e gli strati inclinati in maniera pseudo-uniforme.

| Strato n. | Vp (m/s) | Hs(m) | Hd(m) | rd    | ri    |
|-----------|----------|-------|-------|-------|-------|
| 1         | 424      | 0.987 | 1.006 | 1     | 1     |
| 2         | 799      | 7.554 | 7.386 | 0.993 | 0.986 |
| 3         | 916      |       |       | 0.981 | 0.973 |

**LEGENDA:**

Hs = spessore strato lato sinistro;

Hd = spessore strato lato destro;

Vp = velocità delle onde P.

Vs = velocità delle onde S.

rd = coefficiente correlazione tiro diretto

ri = coefficiente correlazione tiro inverso

## Analisi MASW 4

Frequenza minima ..... 15 Hz

Frequenza massima ..... 50 Hz

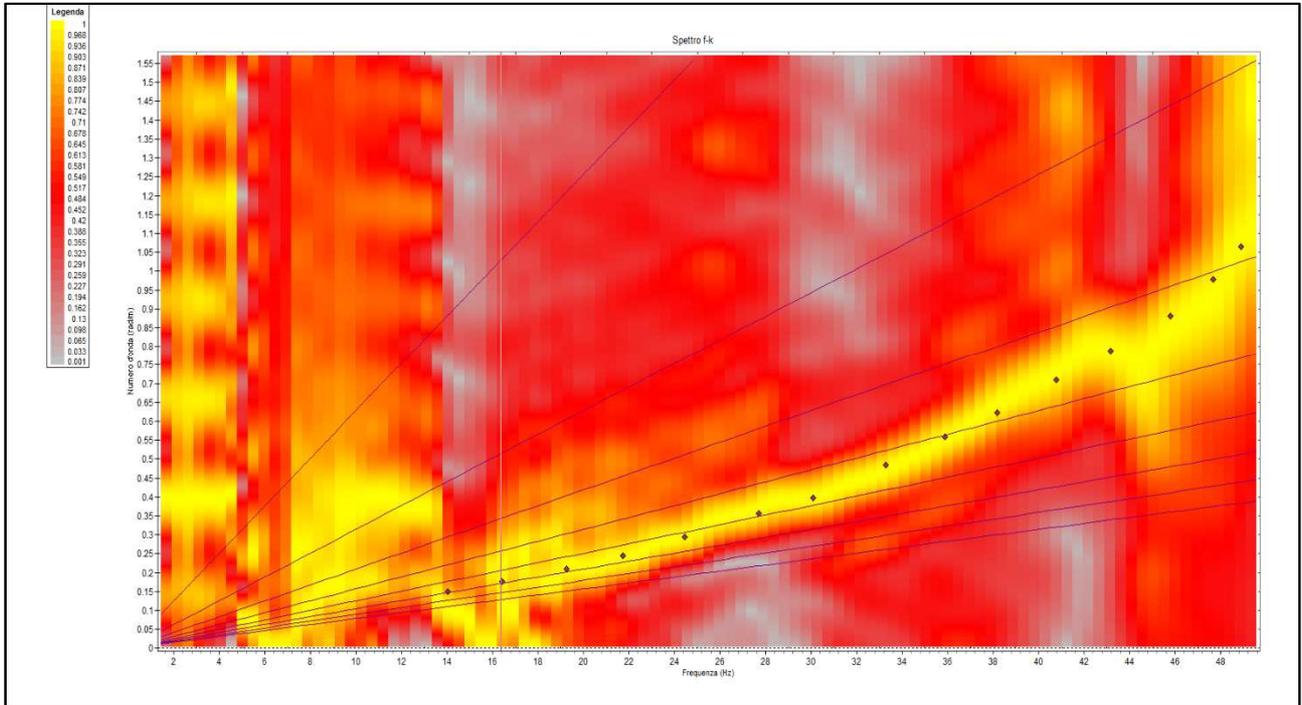


Figura 1.5: Spettro f – k

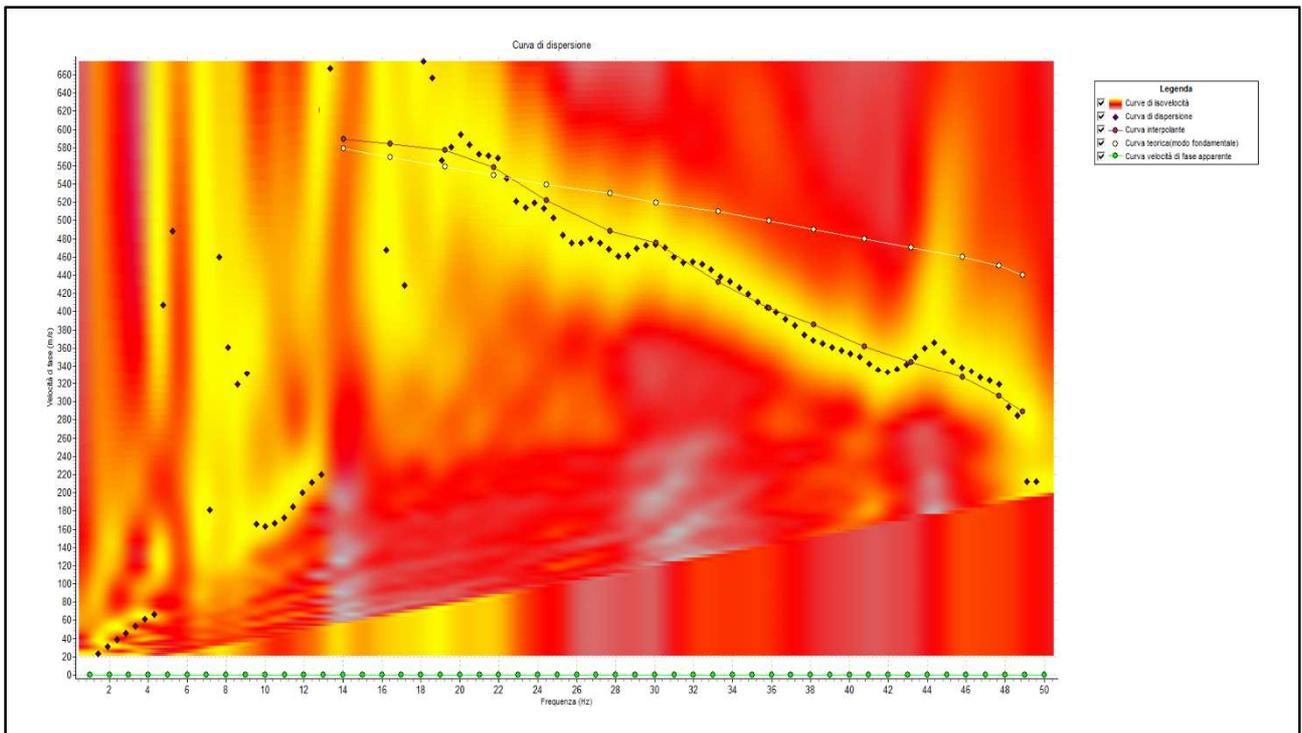


Figura 1.6: Curva di dispersione

L'interpretazione utilizza un algoritmo di inversione che consente di generare una curva di dispersione teorica una volta inserito un modello stratigrafico iniziale del terreno fino alla profondità desiderata e le caratteristiche del semispazio elastico di riferimento.

Procedendo per tentativi, secondo la procedura di Dunkin (1965) modificata da Watson (1970), il programma modifica in automatico il modello iniziale fino a quando lo scarto quadratico medio calcolato fra curva sperimentale e teorica non scende sotto un valore di soglia impostato e modificabile dall'operatore.

Poiché generalmente il metodo empirico genera in automatico un numero elevato di strati, si semplifica il modello iniziale mediando i livelli con valori di Vs simili.

|                                            |     |
|--------------------------------------------|-----|
| Numero di strati (escluso semispazio)..... | 4   |
| Spaziatura ricevitori [m].....             | 2 m |
| Numero ricevitori .....                    | 24  |

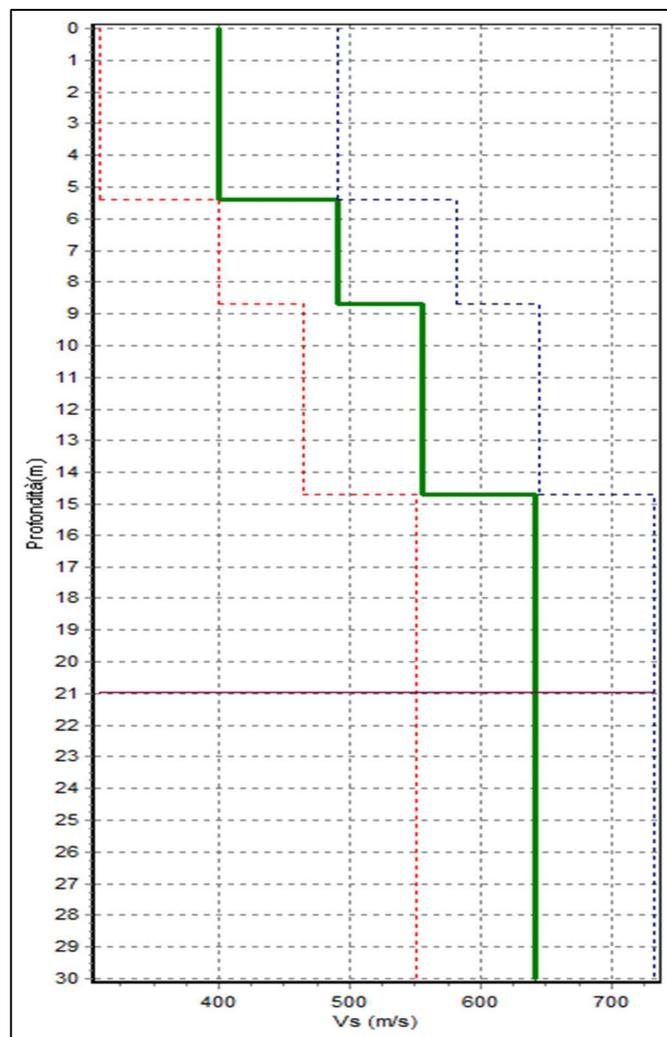


Figura 1.7: Profilo Vs numerico

La sezione stratigrafica risulta attendibile fino a circa 21 m di profondità; oltre tale valore il segnale risulta troppo disturbato anche se si può intuire un aumento dei valori di velocità con la profondità.

## Analisi ReMi 4

Numero di ricevitori ..... 24  
 Distanza tra i sensori: ..... 2 m  
 Numero di ricevitori usati per l'analisi.....24

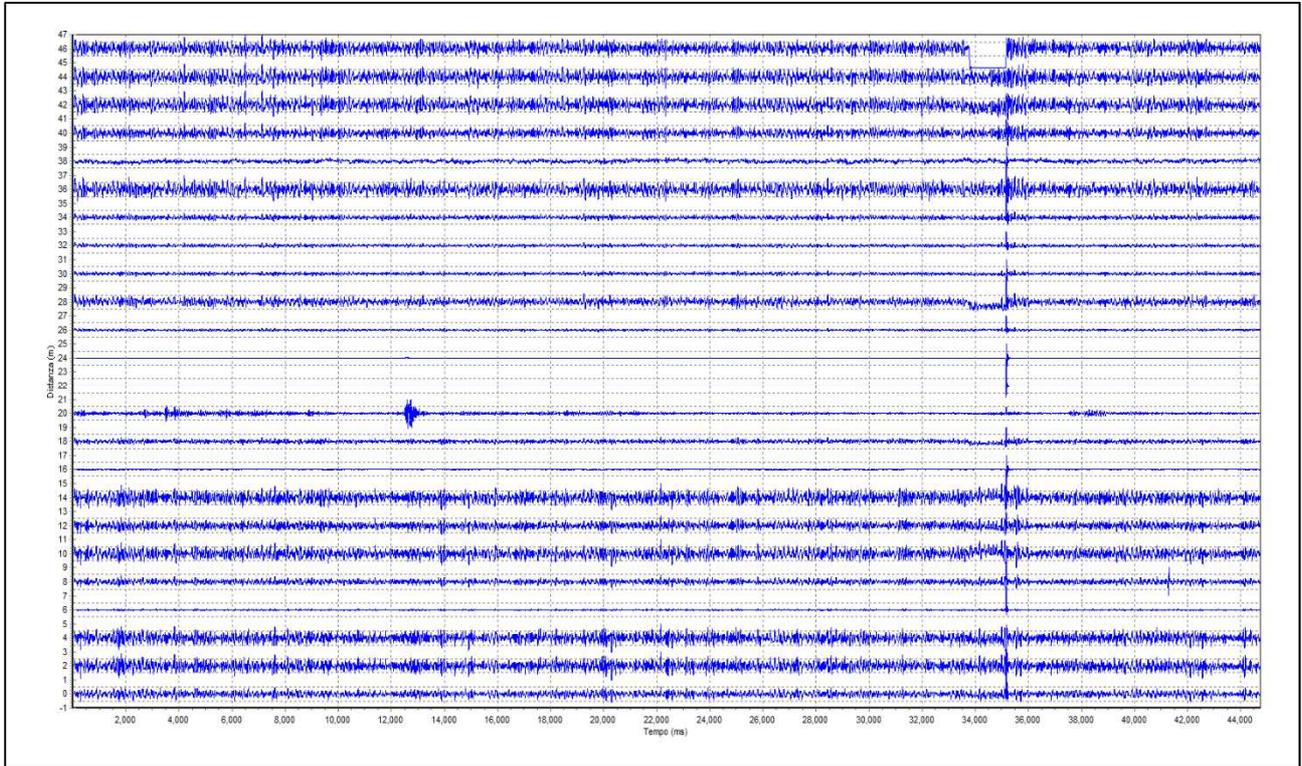


Figura 2.1: Tracce sperimentali

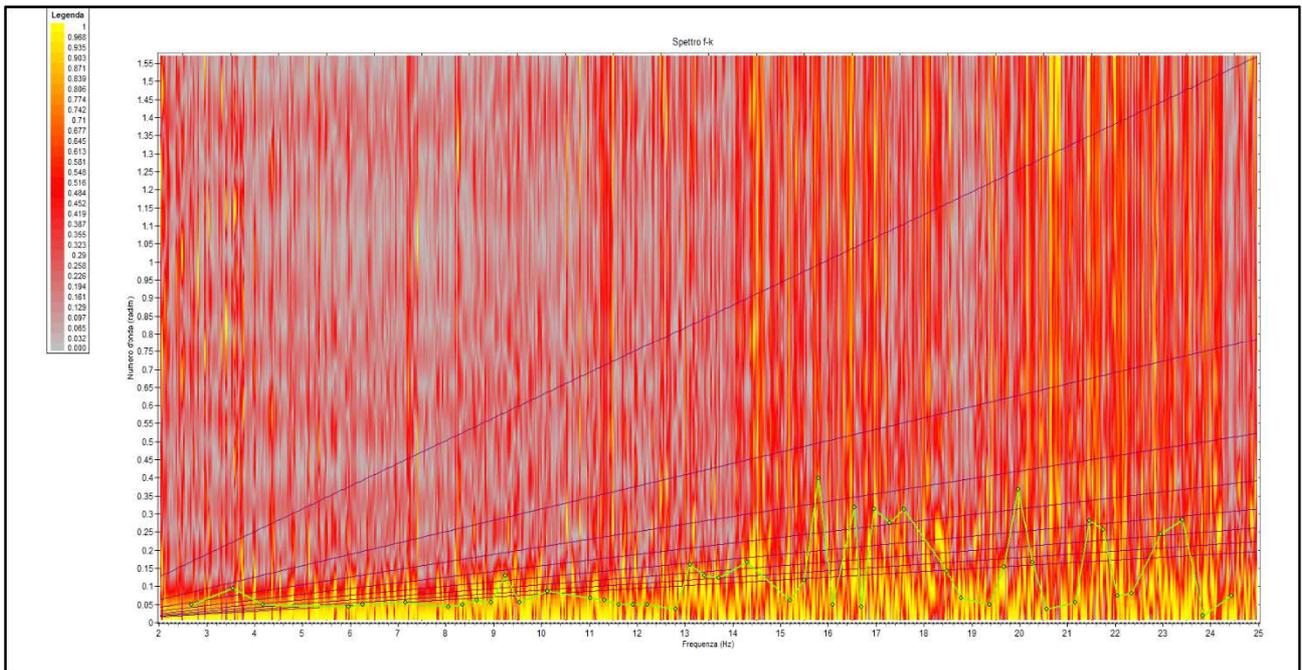


Figura 2.2: Spettro f - k

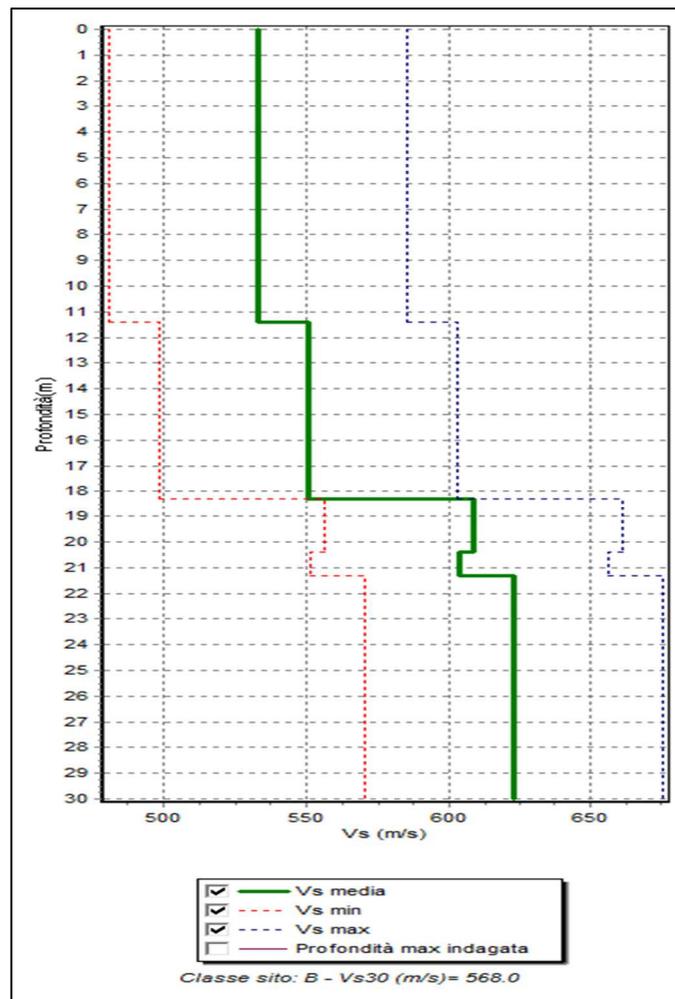


Figura 2.3: Profilo ReMi Vs numerico

## Conclusioni (St<sub>4</sub>)

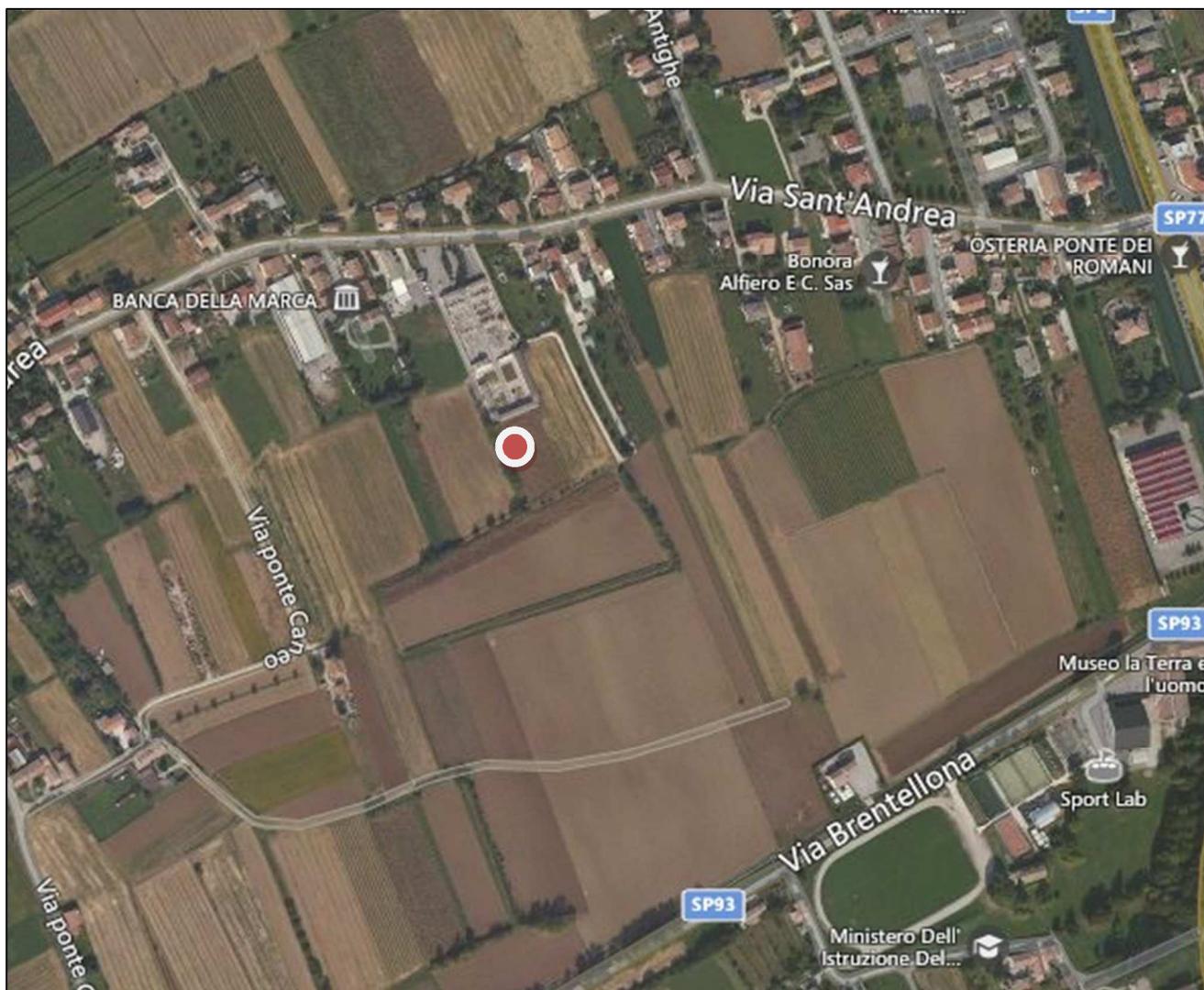
Secondo la misura sperimentale effettuata e la modellazione del sottosuolo elaborata dal trattamento dei dati con i tre metodi appena descritti, per lo stendimento sismico St<sub>1</sub> si individuano materiali sciolti di media consistenza caratterizzati da velocità delle onde sismiche di taglio tipiche di materiali granulari medio fini.

In sintesi viene riportata una stratigrafia sismica di massima del sito indagato:

| Profondità (m) | Vs (m/s) | Considerazioni  |
|----------------|----------|-----------------|
| 0 – 19 m       | 550      | Ghiaie          |
| 19 - 30 m      | 620      | Ghiaie compatte |

## Periodo proprio di risonanza del suolo (HV<sub>4</sub>)

La foto aerea mostra l'ubicazione della indagine denominata HV<sub>4</sub> (  ) indicante il punto di acquisizione di rumore sismico ambientale finalizzata alla definizione del periodo proprio del suolo.



Nello studio specifico degli effetti di sito, la frequenza di campionamento utilizzata è di 128 Hz, con tempi di misura dell'ordine di 26 minuti.

Per la misura, oltre allo spettro H/V, è palesata la trasformata delle singole componenti, l'analisi direzionale e temporale del rumore sismico acquisito.

## Analisi HV<sub>4</sub>

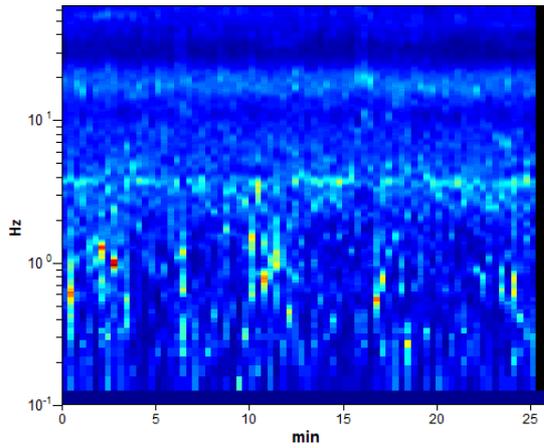


Figura 3.1: analisi temporale del rumore

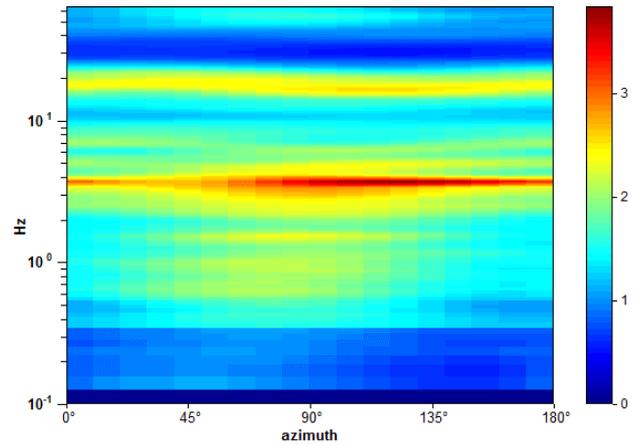


Figura 3.2: analisi direzionale del rumore

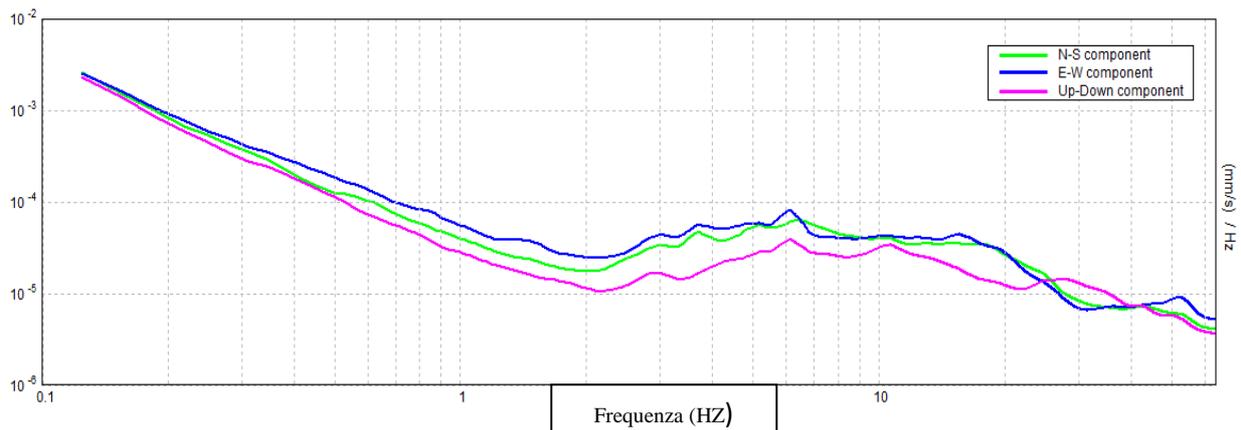


Figura 3.3: spettri delle 3 componenti

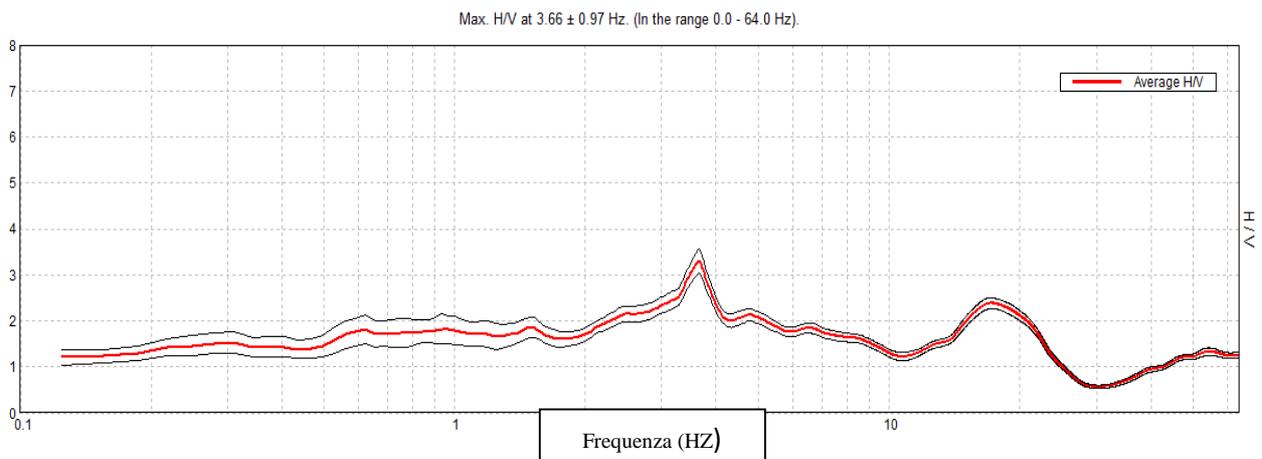


Figura 3.4: rapporto H/V

Una delle misure effettuate (HV) ha subito notevole influenza da rumore antropico. Tutte le tracce escludono la presenza di un netto contrasto di impedenza acustica nel sottosuolo. Non si individuano picchi di risonanza.

In termini di interpretazione del contrasto di impedenza acustica responsabile, eventuali picchi riscontrati, adottando secondo l'ipotesi  $\lambda/4$  una funzione di trasferimento di tipo:

$$F(\omega) = 1/\cos(\omega H/V_s)$$

La frequenza naturale ( $F_n$ ) di vibrazione dello strato di terreno corrisponde ai massimi della funzione di amplificazione:

$$F_n = \omega_n / 2\pi (V_s/4H)$$

con H profondità del rifrattore e  $V_s$  velocità delle onde sismiche di taglio, si può imporre la risonanza del sistema secondo la seguente relazione con T periodo proprio del suolo:

$$T = 2\pi/\omega = 4H/V_s$$

La situazione più pericolosa in termini di fenomeni di amplificazione si verifica quando la frequenza dell'eccitazione armonica ( $\omega$ ) è pari ad una delle frequenze fondamentali dello strato ( $\omega_n$ ). Quando si verifica tale condizione ( $\omega = \omega_n$ ) si ha la risonanza dello strato, ed il fattore di amplificazione è teoricamente infinito. E' quindi di fondamentale importanza porre attenzione ai fenomeni di "doppia risonanza", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei fabbricati.

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

#### **Freq. Naturale edificio \_ 10 Hz / numero piani**

E' la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

#### **Freq. naturale edificio - Freq. fondamentale di risonanza del sito**

ad essere particolarmente pericolosa, poiché dà luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.

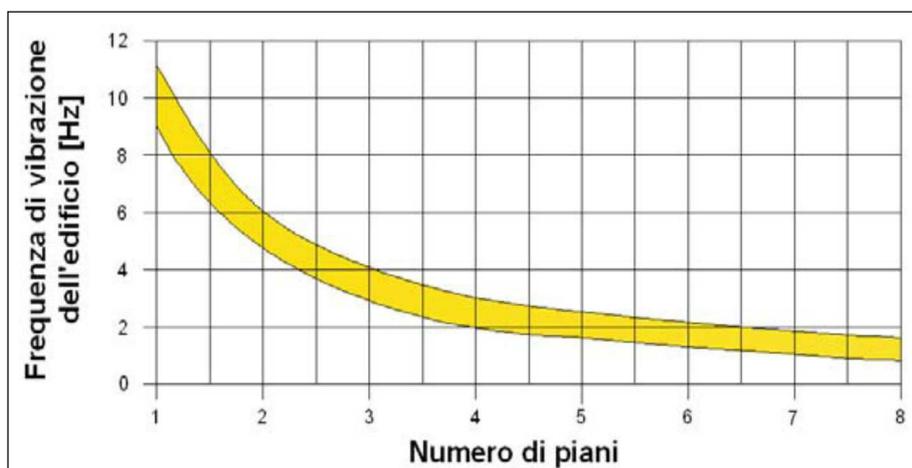


Tabella riassuntiva delle frequenze registrate in un range da 0,0 a 64,0 Hz:

| Sito di indagine | Frequenza max H/V | Considerazioni                                                                     |
|------------------|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| HV               | 3,66 Hz           | Dato registrato in condizioni di basso rumore antropico (traffico automobilistico) |

## Conclusioni HV<sub>4</sub>

Tutte le misurazioni sono state testate per validarne l'efficacia tramite i parametri suggeriti dal Progetto Europeo SESAME:

| Max. H/V at 3.66 ± 0.97 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).                                                                               |                                                                                                                                                      |                    |                     |                     |                     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| <b>Criteria for a reliable H/V curve</b><br>[All 3 should be fulfilled]                                                                |                                                                                                                                                      |                    |                     |                     |                     |
| $f_0 > 10 / L_w$                                                                                                                       | 3.66 > 0.50                                                                                                                                          | OK                 |                     |                     |                     |
| $n_c(f_0) > 200$                                                                                                                       | 5703.8 > 200                                                                                                                                         | OK                 |                     |                     |                     |
| $\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$<br>$\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$ | Exceeded 0 out of 176 times                                                                                                                          | OK                 |                     |                     |                     |
| <b>Criteria for a clear H/V peak</b><br>[At least 5 out of 6 should be fulfilled]                                                      |                                                                                                                                                      |                    |                     |                     |                     |
| Exists f <sup>-</sup> in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$                                                                    | 1.938 Hz                                                                                                                                             | OK                 |                     |                     |                     |
| Exists f <sup>+</sup> in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$                                                                     | 7.813 Hz                                                                                                                                             | OK                 |                     |                     |                     |
| $A_0 > 2$                                                                                                                              | 3.30 > 2                                                                                                                                             | OK                 |                     |                     |                     |
| $f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$                                                                            | $ 0.26589  < 0.05$                                                                                                                                   |                    | NO                  |                     |                     |
| $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$                                                                                                          | $0.97216 < 0.18281$                                                                                                                                  |                    | NO                  |                     |                     |
| $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$                                                                                                          | $0.2534 < 1.58$                                                                                                                                      | OK                 |                     |                     |                     |
| $L_w$                                                                                                                                  | window length                                                                                                                                        |                    |                     |                     |                     |
| $n_w$                                                                                                                                  | number of windows used in the analysis                                                                                                               |                    |                     |                     |                     |
| $n_c = L_w n_w f_0$                                                                                                                    | number of significant cycles                                                                                                                         |                    |                     |                     |                     |
| f                                                                                                                                      | current frequency                                                                                                                                    |                    |                     |                     |                     |
| f <sub>0</sub>                                                                                                                         | H/V peak frequency                                                                                                                                   |                    |                     |                     |                     |
| $\sigma_f$                                                                                                                             | standard deviation of H/V peak frequency                                                                                                             |                    |                     |                     |                     |
| $\varepsilon(f_0)$                                                                                                                     | threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$                                                                            |                    |                     |                     |                     |
| A <sub>0</sub>                                                                                                                         | H/V peak amplitude at frequency f <sub>0</sub>                                                                                                       |                    |                     |                     |                     |
| A <sub>H/V</sub> (f)                                                                                                                   | H/V curve amplitude at frequency f                                                                                                                   |                    |                     |                     |                     |
| f <sup>-</sup>                                                                                                                         | frequency between f <sub>0</sub> /4 and f <sub>0</sub> for which A <sub>H/V</sub> (f <sup>-</sup> ) < A <sub>0</sub> /2                              |                    |                     |                     |                     |
| f <sup>+</sup>                                                                                                                         | frequency between f <sub>0</sub> and 4f <sub>0</sub> for which A <sub>H/V</sub> (f <sup>+</sup> ) < A <sub>0</sub> /2                                |                    |                     |                     |                     |
| $\sigma_A(f)$                                                                                                                          | standard deviation of A <sub>H/V</sub> (f), $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean A <sub>H/V</sub> (f) curve should be multiplied or divided |                    |                     |                     |                     |
| $\sigma_{\log A_{H/V}}(f)$                                                                                                             | standard deviation of log A <sub>H/V</sub> (f) curve                                                                                                 |                    |                     |                     |                     |
| $\theta(f_0)$                                                                                                                          | threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$                                                                              |                    |                     |                     |                     |
| Threshold values for $\sigma_f$ and $\sigma_A(f_0)$                                                                                    |                                                                                                                                                      |                    |                     |                     |                     |
| <u>Freq. range [Hz]</u>                                                                                                                | < 0.2                                                                                                                                                | 0.2 – 0.5          | 0.5 – 1.0           | 1.0 – 2.0           | > 2.0               |
| $\varepsilon(f_0)$ [Hz]                                                                                                                | 0.25 f <sub>0</sub>                                                                                                                                  | 0.2 f <sub>0</sub> | 0.15 f <sub>0</sub> | 0.10 f <sub>0</sub> | 0.05 f <sub>0</sub> |
| $\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$                                                                                                      | 3.0                                                                                                                                                  | 2.5                | 2.0                 | 1.78                | 1.58                |
| log $\theta(f_0)$ for $\sigma_{\log A_{H/V}}(f_0)$                                                                                     | 0.48                                                                                                                                                 | 0.40               | 0.30                | 0.25                | 0.20                |

Sulla base di queste considerazioni, il sito in esame presenta un picco massimo di risonanza riscontrabile di 3,66 Hz; i dati appaiono propri di un graduale e progressivo miglioramento delle condizioni meccaniche del sottosuolo sino a rilevanti profondità.

## Risultati finali

L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) e sismica passiva (ReMI) ha consentito di determinare il profilo verticale della VS (e del modulo di taglio) e, di conseguenza, del parametro Vs30 (considerando come riferimento il piano campagna  $z = 0$  m).

Questi trovano peraltro riscontro nel modello sismostratigrafico ricavato dalla sismica a rifrazione.

In sintesi:

|                                                            | <b>BEDROCK</b>                   |           |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------|
|                                                            | <b>NO</b>                        | <b>SI</b> |
| <b>COPERTURA</b>                                           | Sciolta                          |           |
| <b>SPESSORE</b>                                            | 21 m (spessore certo registrato) |           |
| <b>PARAMETRO Vs da MASW</b><br><b>PARAMETRO Vs da ReMi</b> | <b>Vs 30 = 568 m/s</b>           |           |
| <b>CATEGORIA DEL SOTTOSUOLO</b>                            | <b>B</b>                         |           |
| <b>PICCHI DI FREQUENZE da H/V</b>                          | <b>Picco massimo 3,66 Hz</b>     |           |

Rispetto le norme tecniche per le costruzioni (DM 14 gennaio 2008, ex DM 14/09/2005) il sito in esame rientra quindi nella **categoria B**

### **Suolo di tipo B**

Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, con spessori superiori a 30m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs30, compresi fra 360 m/s e 800 m/s (Nspt,30>50 nei terreni a grana grossa o cu30 >250 kPa nei terreni a grana fina).

Naturalmente il vero dato di velocità va considerato in un ragionevole intorno del dato proveniente dalle elaborazioni sperimentali ( $\pm 10\%$ ), per cui i terreni con velocità borderline vengono cautelativamente attribuiti alla categoria inferiore.

**Una elaborazione più spinta dei dati con l'introduzione di filtraggi particolari avrebbe portato a risultati opinabili. Le conclusioni riguardano quindi solo le elaborazioni dei dati ritenuti attendibili.**

Cison di Valmarino, 10/04/2015

il Geologo  
dott. Simone Bortolini

**STUDIO TECNICO DI GEOLOGIA APPLICATA ALL'INGEGNERIA**  
dott. geol. SIMONE BORTOLINI via San Vito, 9/A Cison di Valmarino (TV)  
tel. 338-1977870  
e-mail simonebortolini@libero.it

---

# Relazione

## Sismica a Rifrazione - MASW – ReMi - HVSr

per la definizione del profilo verticale Vs e parametro Vs30

---

# CDM\_SMC 5

## CROCETTA DEL MONTELLO (TV)

### Via Don Antonio Carlo Massara

Coordinate WGS84

Lat. N 45,82375 Long. E 12,049128

Coordinate ED50

Lat. N 45,824649 Long. E 12,050128

---



il Geologo

dott. Simone Bortolini

# Introduzione

Al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame è stata effettuata una serie di acquisizioni MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves, analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva – e.g. Park et al., 1999) e ReMi (Refraction Microtremor -Louie, 2001) utili a definire il profilo verticale della  $V_s$  (velocità di propagazione delle onde di taglio) oltre alla tradizionale sismica a rifrazione.

## 1. Interpretazione di stendimenti di sismica a rifrazione

Questo metodo, di semplice applicazione, è utilizzabile nel caso di strati orizzontali o con inclinazione uniforme e in presenza di una superficie topografica, almeno lungo lo stendimento, orizzontale. Si parte inoltre dal presupposto che la velocità dei rifrattori aumenti con la profondità. In pratica si dovrà verificare che la velocità delle onde P nel primo strato sia minore della velocità delle onde P nel secondo, a sua volta inferiore a quella del terzo, ecc. ( $V_1 < V_2 < V_3$ ).

## 2. Tecnica di misurazione e interpretazione MASW

La tecnica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves - Park et al., 1999) è un metodo d'indagine geofisica, sviluppato e diffuso negli ultimi dieci anni circa, che sfrutta le modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare delle onde di Rayleigh, generate da sorgenti artificiali (mazza battente o scoppio). Le onde di Rayleigh si muovono lungo l'interfaccia terra-aria e sono generate dalla rifrazione e riflessione multipla di onde di compressione (P) e onde di taglio che si propagano in direzione verticale (SV).

## 3. Tecnica di misurazione e interpretazione ReMi

La tecnica ReMi (Refraction Microtremor) è un metodo d'indagine geofisica che sfrutta invece le modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare delle onde di Rayleigh, generate però da sorgenti ambientali.

A differenza di quanto avviene nell'indagine eseguita con la tecnica MASW, dove la posizione delle sorgenti è nota ed è allineata allo stendimento, nel caso del ReMi i punti di origine dei microtremori sono spesso non identificabili. Quindi la registrazione viene protratta per tempi più lunghi. Essendo la potenza associata al segnale utile comparabile con quella del rumore di fondo è necessario rilevare un numero di tremori molto elevato, questo sarà ottenibile semplicemente andando a allungare i tempi di registrazione del segnale. A differenza dei pochi secondi necessari per acquisizioni MASW sono qui necessari da alcuni a molti minuti di acquisizione (in genere 10 - 20 minuti sono sufficienti).

I principi teorici e gli aspetti di acquisizione ed elaborazione dei dati sono sostanzialmente gli stessi della tecnica MASW con la differenza che con ReMi si ha una maggior definizione degli strati profondi.

## 4. Tecnica di misure ed interpretazione HVSR (tramite TROMINO)

Tale prospezione sismica si basa sull'acquisizione e sull'analisi del Rumore Sismico Ambientale (Seismic Noise) ovvero la continua vibrazione del suolo dovuta sia a cause antropiche che naturali. Questa tipologia di tecniche (definite metodi sismici passivi), dunque, non ha bisogno

di alcuna energizzazione esterna poiché utilizza come sorgente il traffico veicolare, la produzione industriale, il vento, la pioggia e tutto ciò che è in grado di produrre una minima vibrazione sulla superficie del suolo.

In particolar modo con la tecnica a “ Stazione Singola” viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero “Horizontal to Vertical Spectral Ratios) (Nakamura, Y. [1989]). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno e individuare la frequenza fondamentale ( $f$ ) di questa vibrazione. Sapendo che in generale esiste una relazione semplice fra  $f$ , lo spessore della parte più soffice del terreno (ovvero la parte di materiali sovrastante il bed-rock) e la velocità media ( $V_s$ ) delle onde sismiche nel sottosuolo, attraverso le misure HVSR è possibile risalire allo spessore di questo strato. Si possono inoltre effettuare delle considerazioni di tipo “qualitativo” molto utili in merito a possibili interferenze tra le frequenze risonanti del suolo e degli edifici sovrastanti.

Per la valutazione del periodo proprio di risonanza del sottosuolo è stata utilizzata la tecnica a stazione singola Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Kanai, 1957; Igarashi 1970; Nakamura 1989) che permette di estrarre informazioni relative alla frequenza di vibrazione del suolo a partire dagli spettri di rumore sismico registrati in sito. La tecnica prevede di calcolare il rapporto, in funzione della frequenza, tra gli spettri di risposta della componente orizzontale e verticale del moto dovuto ai microtremori ambientali. La misura di rumore sismico della durata di 26 minuti per ogni punto di misura è stata eseguita con una frequenza di campionamento a 128 Hz.

## 5. Strumentazione impiegata

### Hardware

L’acquisizione dati per l’elaborazione MASW, ReMI e sismica a rifrazione è avvenuta tramite sismografo a 24 canali (mod. Dolang Geophysical DBS280 24 bit 24 canali) collegato a geofoni verticali a frequenza propria di 4.5Hz.

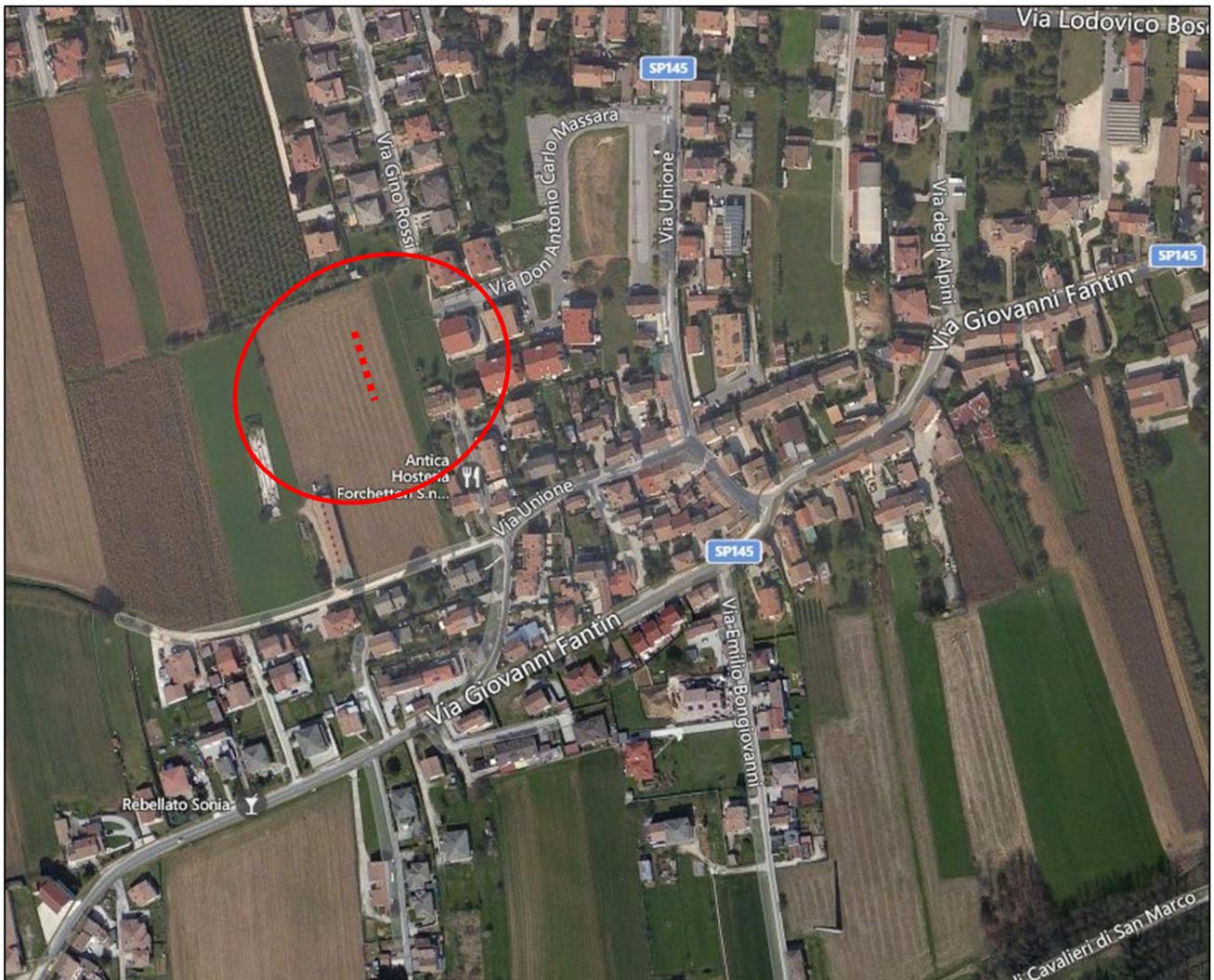
È stato utilizzato un tromografo digitale modello “Tromino” (Micromed srl) avente un intervallo di acquisizione sulle frequenze da 0.1 a 256 Hz, dotato di sistema di acquisizione digitale ad alta risoluzione (24 bit) e primo-processing interno. La livellazione micrometrica dello strumento è stata assicurata per ogni misura tramite bolla di precisione agendo sui tre punti di appoggio (punte) ed orientando uno dei 3 sensori di acquisizione (ortogonali tra loro) verso il N magnetico.

### Software

Per le analisi dei dati acquisiti si sono adottati i software GeoMASW , GeoReMi, SismaCon di ProgramGeo (Brescia) e il software Grilla.

## Sito Stendimento Sismico St<sub>5</sub>

L'immagine a seguire mostra l'ubicazione dell'indagine denominata 'St<sub>5</sub>' ( ..... ) per lo stendimento sismico effettuato ai fini della classificazione sismica del suolo.



Lo stendimento sismico geofonico lineare multicanale con geofoni verticali (4.5 Hz) è stato posizionato e utilizzato per le prospezioni sismiche tipo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), ReMI (Refraction Microtremor) e Sismica a Rifrazione, analizzano le onde di superficie.

## Dati sperimentali (St<sub>5</sub>)

|                                               |        |
|-----------------------------------------------|--------|
| Numero di ricevitori .....                    | 24     |
| Distanza tra i sensori: .....                 | 2 m    |
| Numero di campioni temporali.....             | 2048   |
| Passo temporale di acquisizione.....          | 0.6 ms |
| Numero di ricevitori usati per l'analisi..... | ...24  |

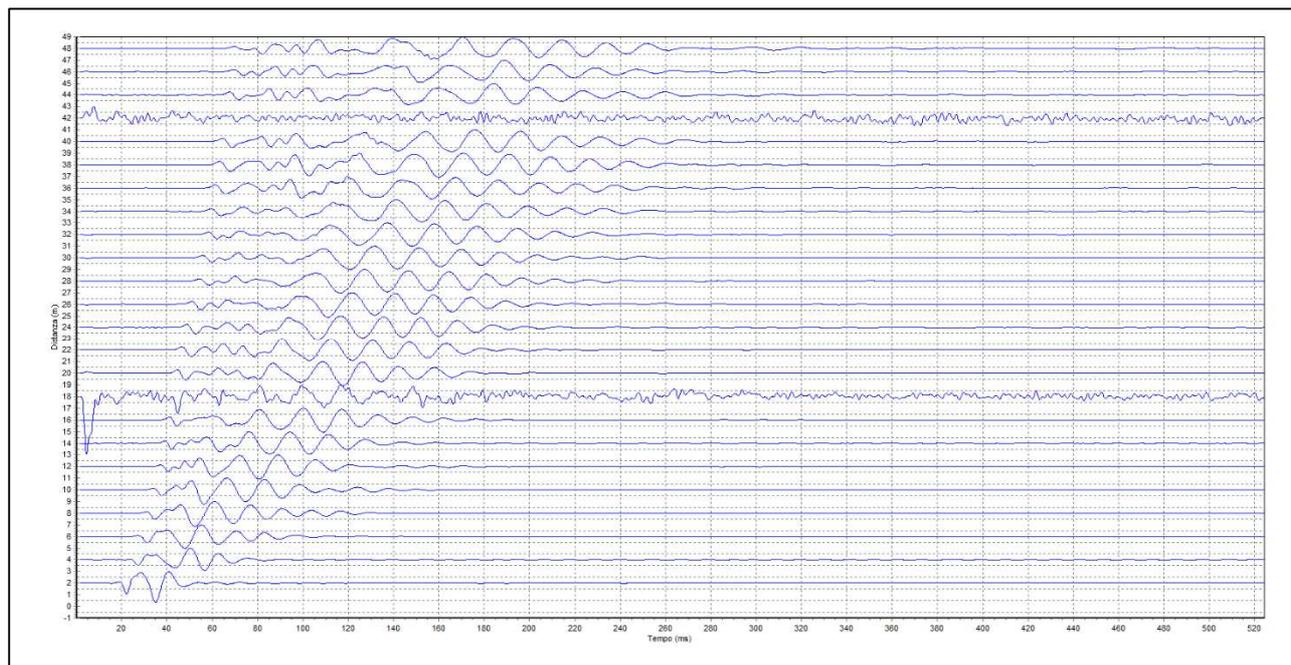


Figura 1.1: Tracce sperimentali tiro diretto

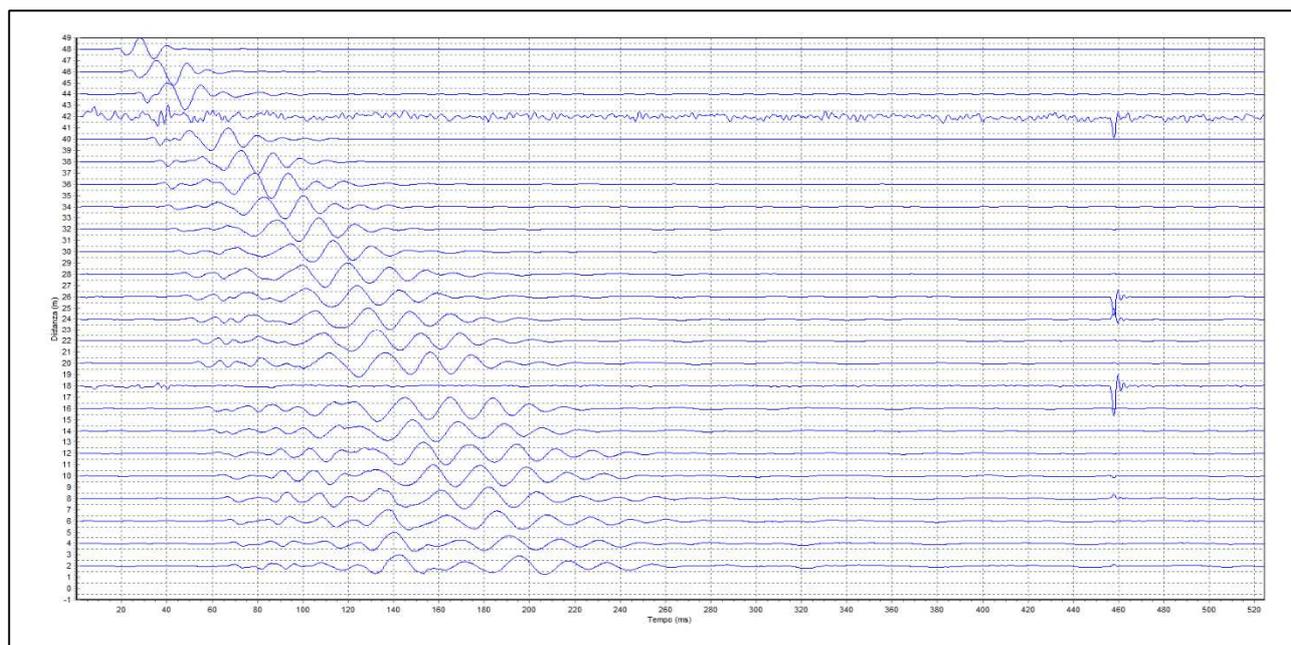


Figura 1.2: Tracce sperimentali tiro coniugato

## Sismica a rifrazione 5

L'interpretazione è stata effettuata sulla base di due sorgenti (mazza su piattello di battuta) poste rispettivamente 2 metri prima del primo geofono e 2 m oltre l'ultimo geofono.

Il metodo utilizzato è il Metodo convenzionale (metodo del tempo di ritardo - delay time); tale metodo è utilizzabile nel caso di strati orizzontali o con inclinazione uniforme e in presenza di una superficie topografica, almeno lungo lo stendimento, orizzontale. Si parte inoltre dal presupposto che la velocità dei rifrattori aumenti con la profondità. In pratica si dovrà verificare che la velocità delle onde P nel primo strato sia minore della velocità delle onde P nel secondo, a sua volta inferiore a quella del terzo, ecc. ( $V_1 < V_2 < V_3$ ), così come nel caso in esame.

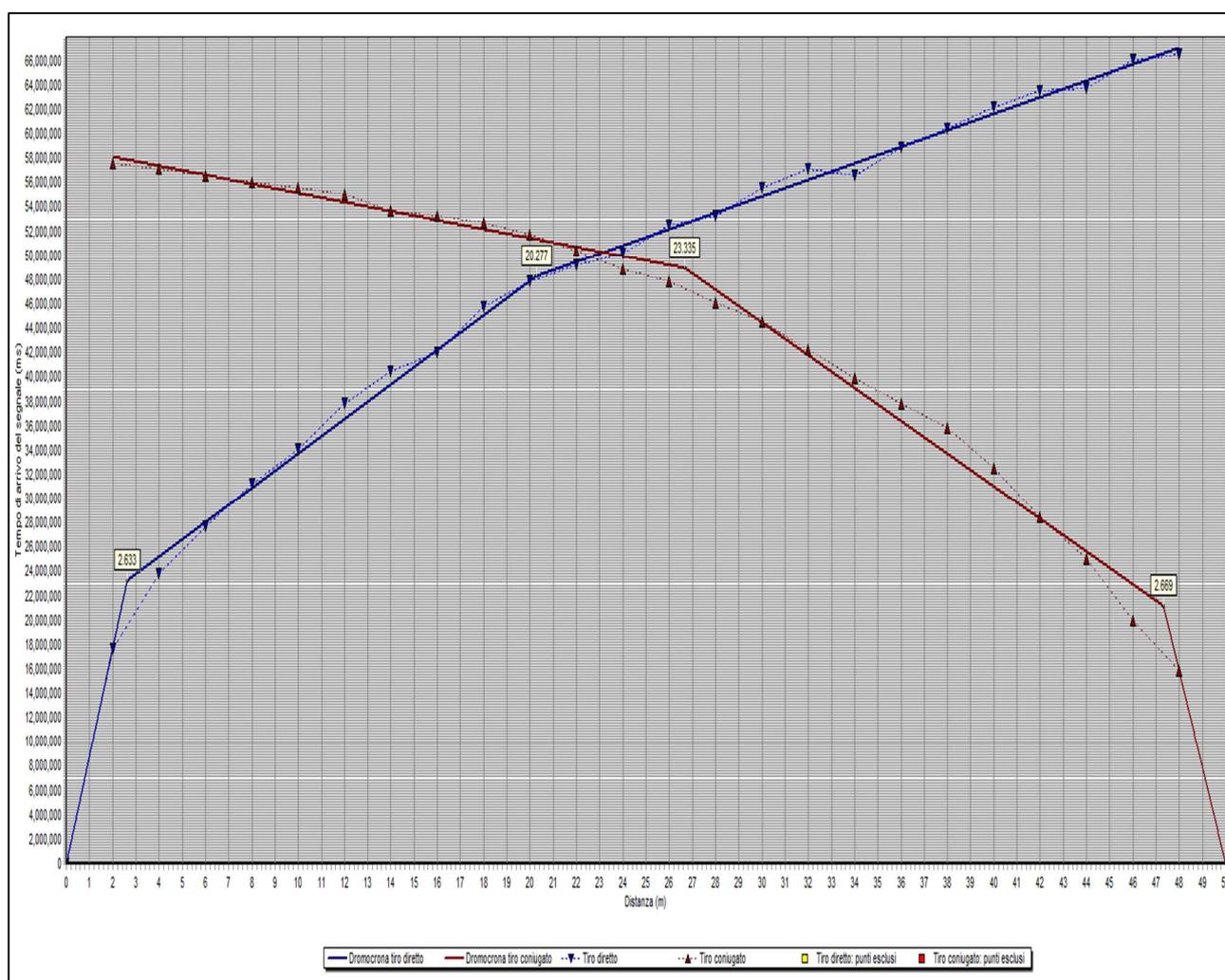


Figura 1.3: grafico generale curva distanza-tempo

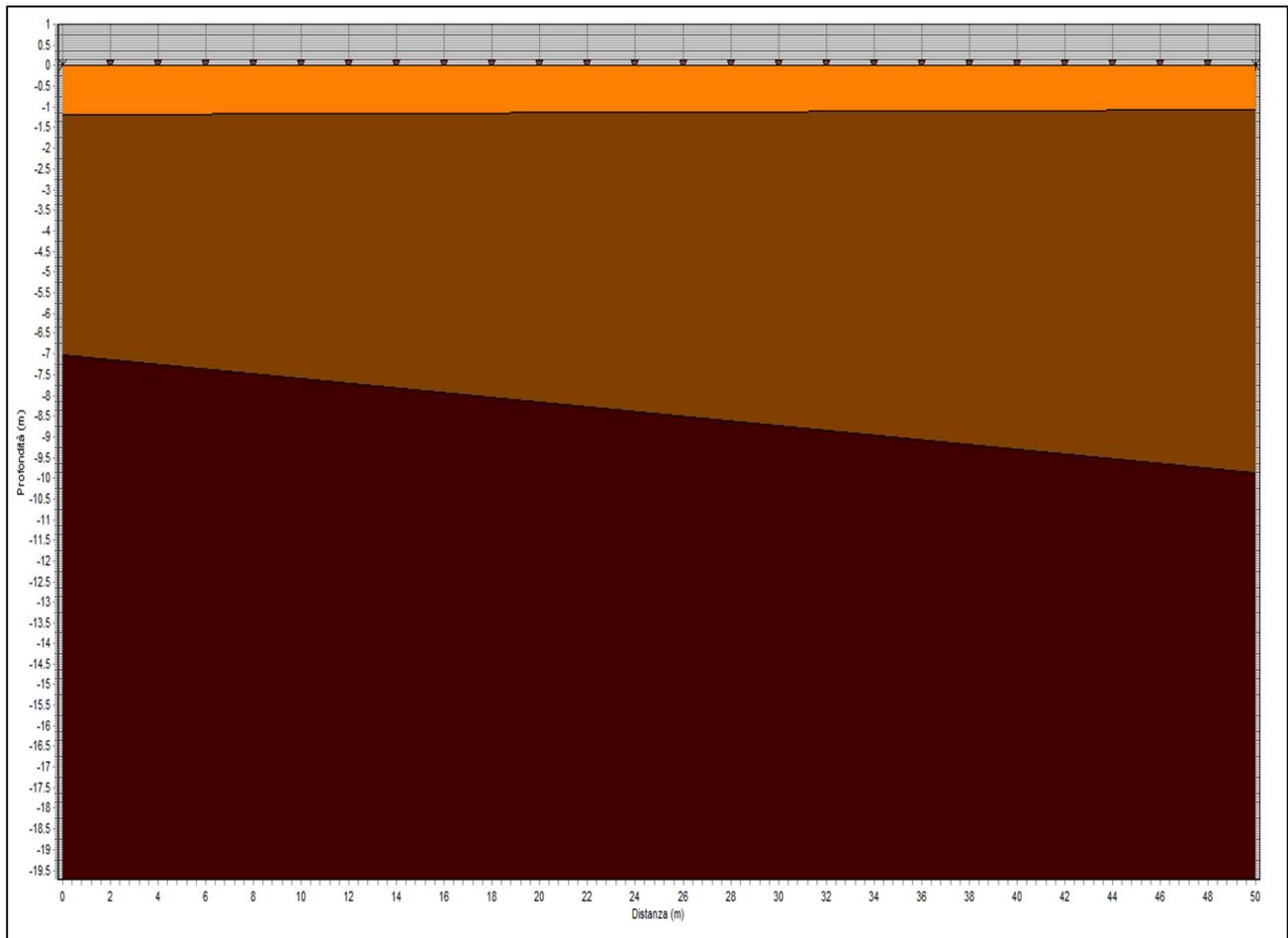


Figura 1.4: Sezione stratigrafica interpretata

La sezione stratigrafica è stata interpretata sulla base dei valori delle velocità delle onde P considerando il profilo topografico orizzontale e gli strati inclinati in maniera pseudo-uniforme.

| Strato n. | Vp (m/s) | Hs(m) | Hd(m) | rd    | ri    |
|-----------|----------|-------|-------|-------|-------|
| 1         | 504      | 1.183 | 1.067 | 1     | 1     |
| 2         | 996      | 7.033 | 9.862 | 0.994 | 0.985 |
| 3         | 1016     |       |       | 0.994 | 0.984 |

**LEGENDA:**

Hs = spessore strato lato sinistro;

Hd = spessore strato lato destro;

Vp = velocità delle onde P.

Vs = velocità delle onde S.

rd = coefficiente correlazione tiro diretto

ri = coefficiente correlazione tiro inverso

## Analisi MASW 5

Frequenza minima .....15 Hz

Frequenza massima .....50 Hz

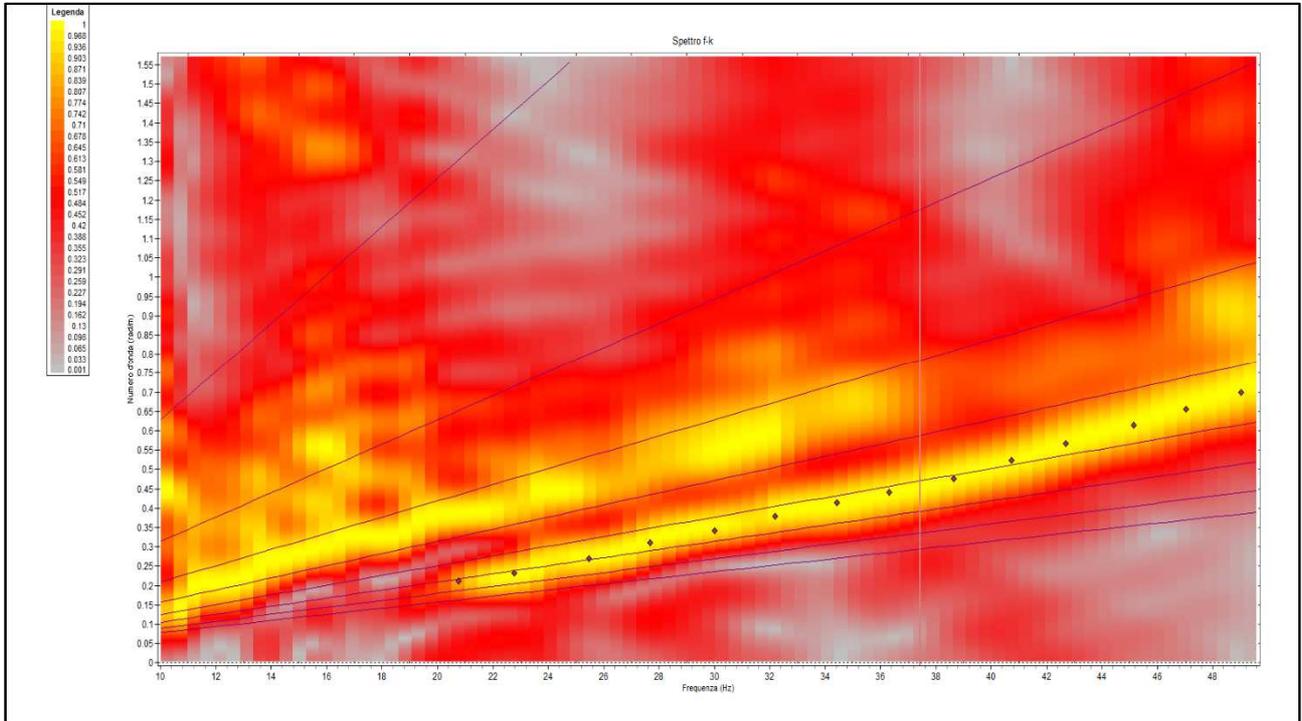


Figura 1.5: Spettro f – k

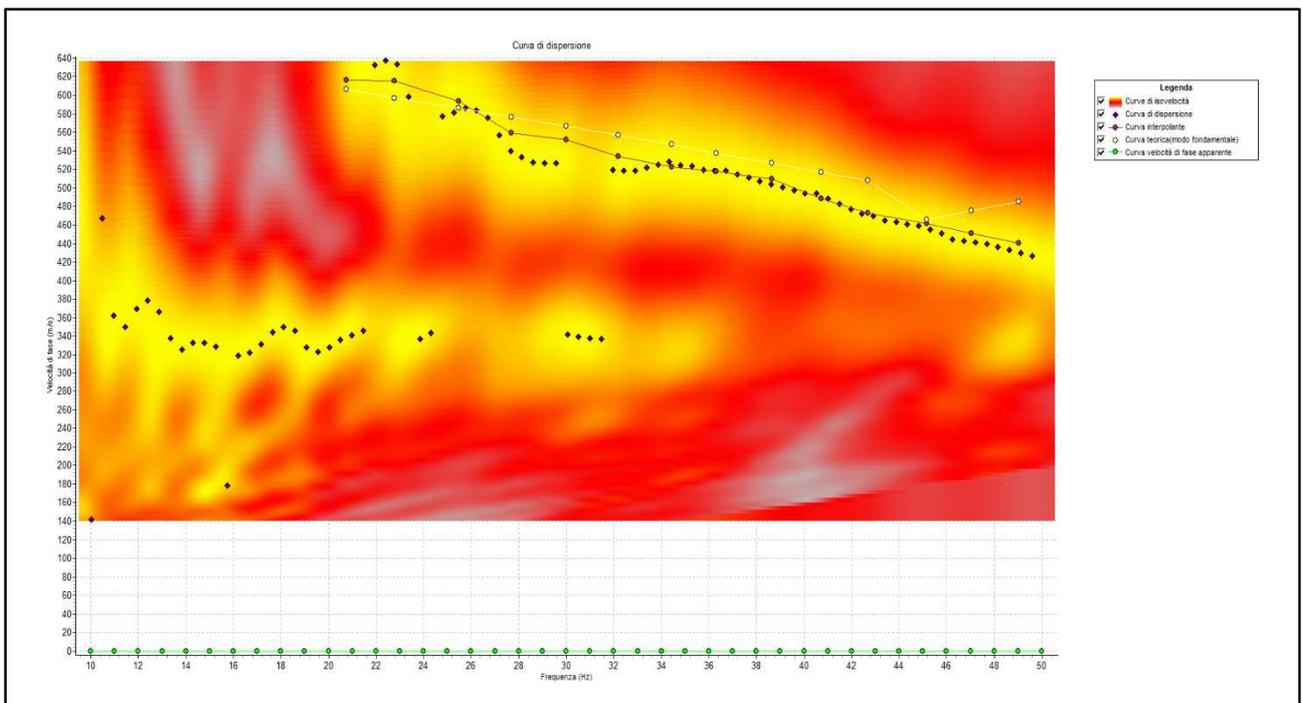


Figura 1.6: Curva di dispersione

L'interpretazione utilizza un algoritmo di inversione che consente di generare una curva di dispersione teorica una volta inserito un modello stratigrafico iniziale del terreno fino alla profondità desiderata e le caratteristiche del semispazio elastico di riferimento.

Procedendo per tentativi, secondo la procedura di Dunkin (1965) modificata da Watson (1970), il programma modifica in automatico il modello iniziale fino a quando lo scarto quadratico medio calcolato fra curva sperimentale e teorica non scende sotto un valore di soglia impostato e modificabile dall'operatore.

Poiché generalmente il metodo empirico genera in automatico un numero elevato di strati, si semplifica il modello iniziale generando mediando i livelli con valori di  $V_s$  simili.

|                                            |     |
|--------------------------------------------|-----|
| Numero di strati (escluso semispazio)..... | 4   |
| Spaziatura ricevitori [m].....             | 2 m |
| Numero ricevitori .....                    | 24  |

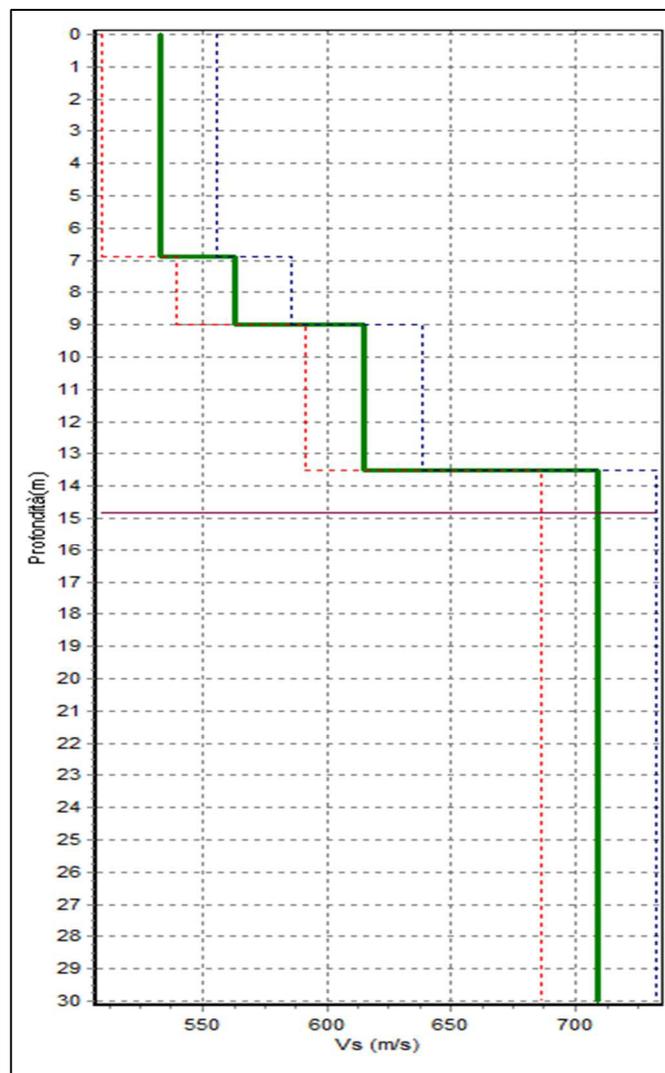


Figura 1.7: Profilo  $V_s$  numerico

La sezione stratigrafica risulta attendibile fino a circa 15 m di profondità; oltre tale valore il segnale risulta troppo disturbato anche se si può intuire un aumento dei valori di velocità con la profondità.

## Analisi ReMi 5

Numero di ricevitori ..... 24  
 Distanza tra i sensori: ..... 2 m  
 Numero di ricevitori usati per l'analisi.....24

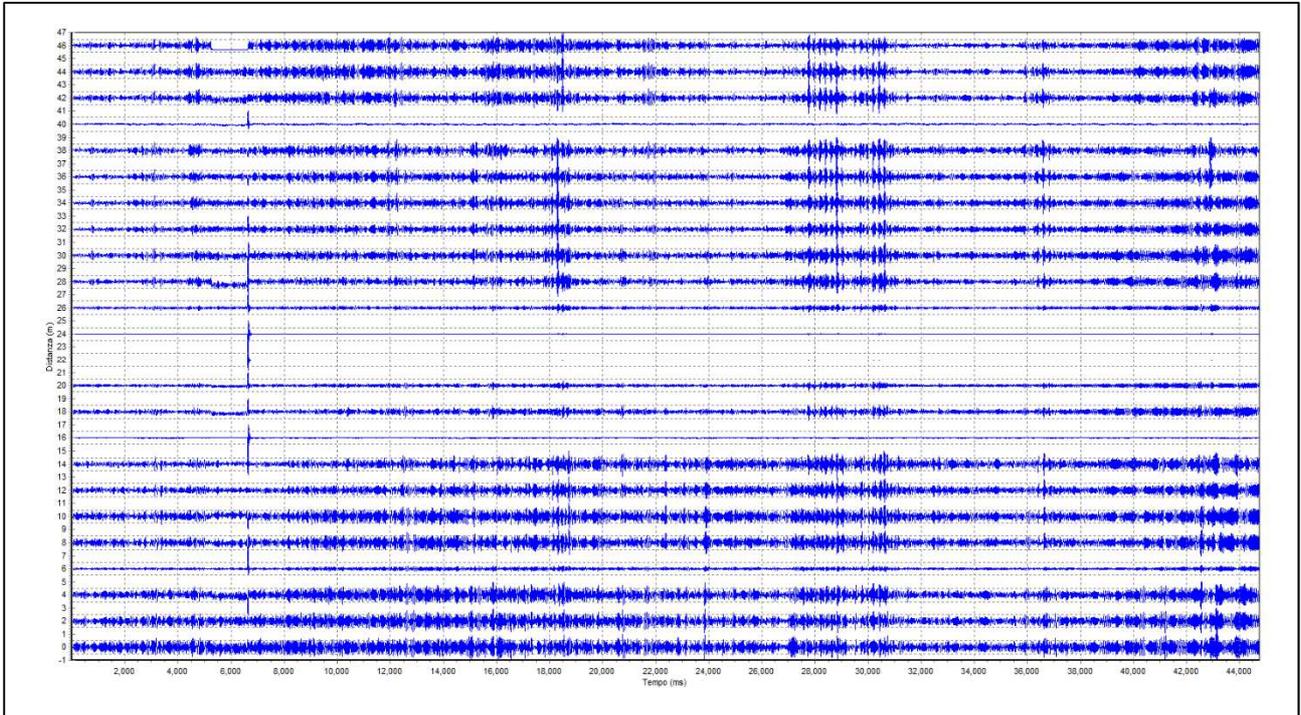


Figura 2.1: Tracce sperimentali

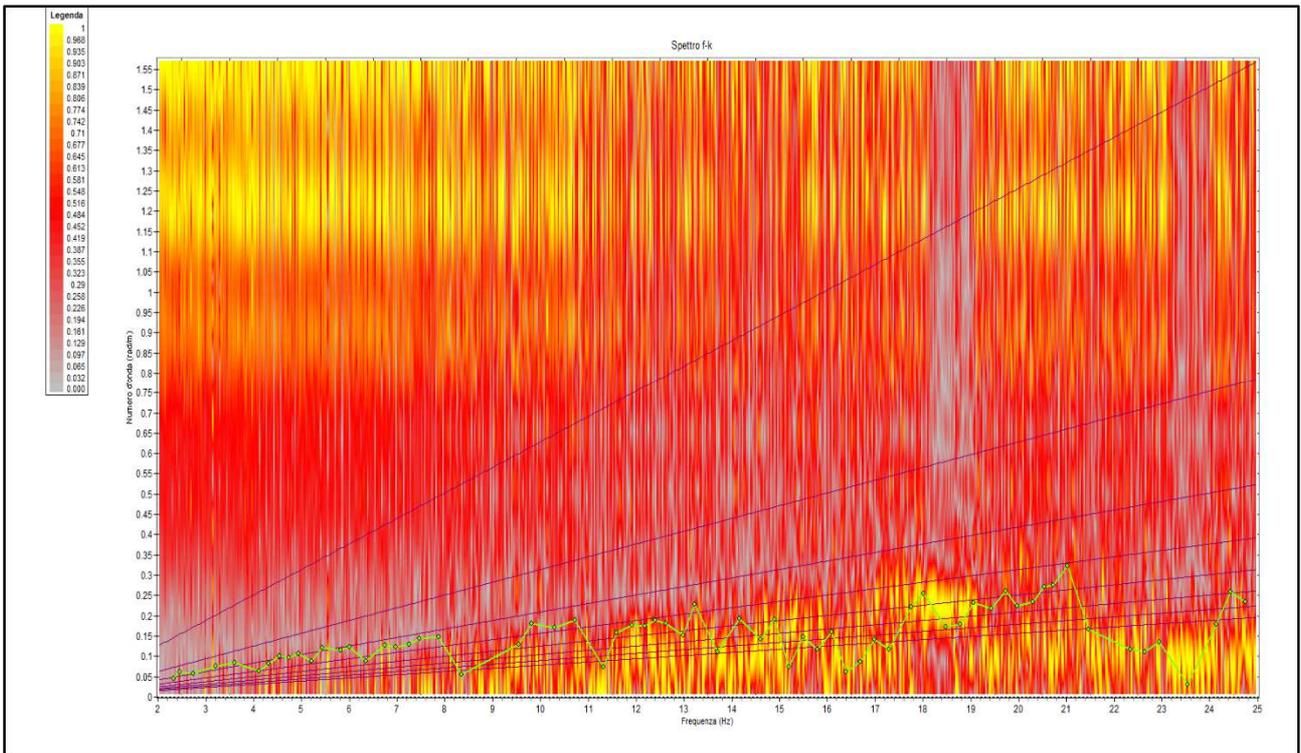


Figura 2.2: Spettro f - k

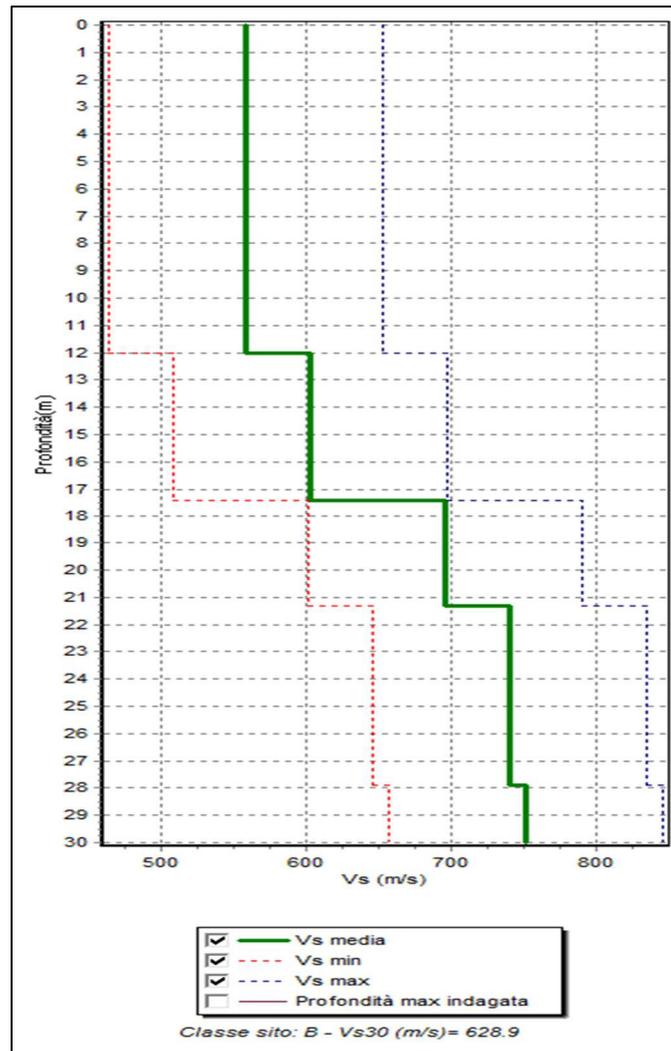


Figura 2.3: Profilo ReMi Vs numerico

## Conclusioni (St<sub>5</sub>)

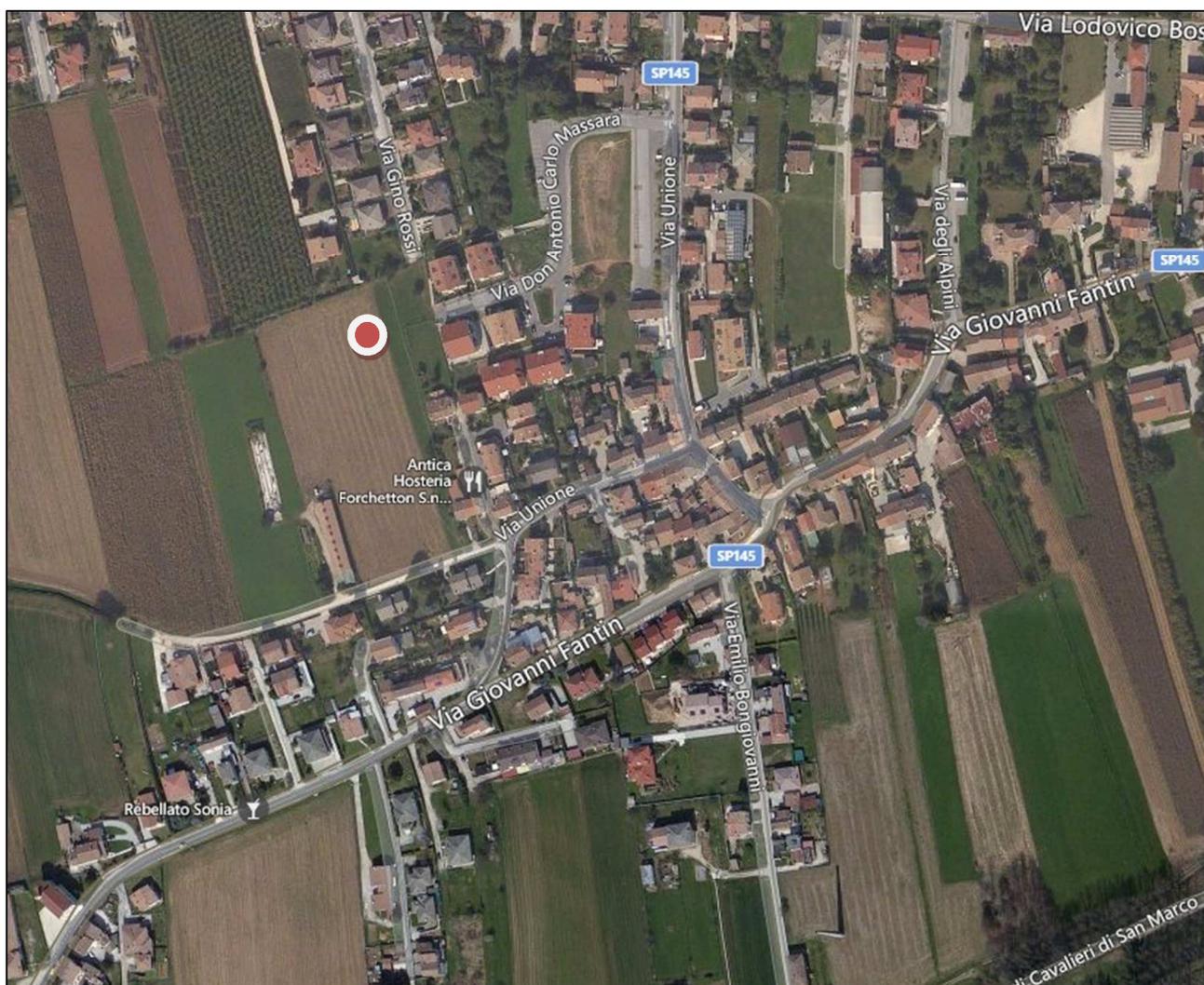
Secondo la misura sperimentale effettuata e la modellazione del sottosuolo elaborata dal trattamento dei dati con i tre metodi appena descritti, per lo stendimento sismico St<sub>1</sub> si individuano materiali sciolti di media consistenza caratterizzati da velocità delle onde sismiche di taglio tipiche di materiali granulari medio fini.

In sintesi viene riportata una stratigrafia sismica di massima del sito indagato:

| Profondità (m) | Vs (m/s) | Considerazioni  |
|----------------|----------|-----------------|
| 0 – 17 m       | 590      | Ghiaie          |
| 17 - 30 m      | 720      | Ghiaie compatte |

## Periodo proprio di risonanza del suolo (HV<sub>5</sub>)

La foto aerea mostra l'ubicazione della indagine denominata HV<sub>5</sub> (  ) indicante il punto di acquisizione di rumore sismico ambientale finalizzata alla definizione del periodo proprio del suolo.



Nello studio specifico degli effetti di sito, la frequenza di campionamento utilizzata è di 128 Hz, con tempi di misura dell'ordine di 26 minuti.

Per la misura, oltre allo spettro H/V, è palesata la trasformata delle singole componenti, l'analisi direzionale e temporale del rumore sismico acquisito.

## Analisi HV<sub>5</sub>

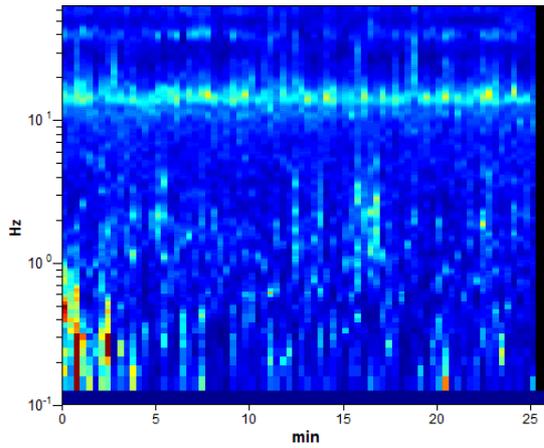


Figura 3.1: analisi temporale del rumore

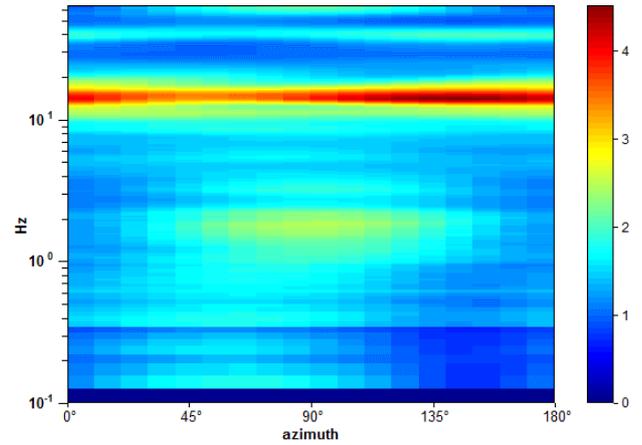


Figura 3.2: analisi direzionale del rumore

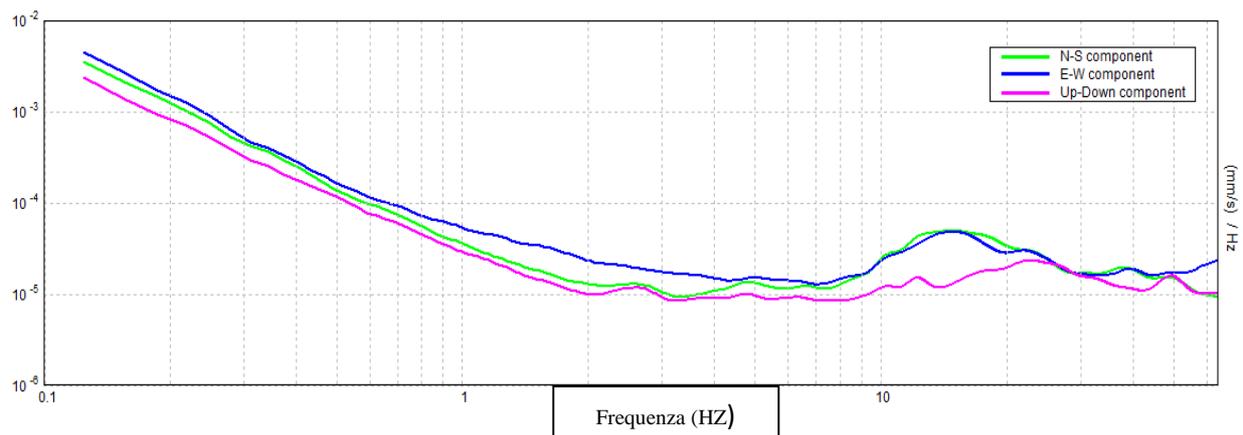


Figura 3.3: spettri delle 3 componenti

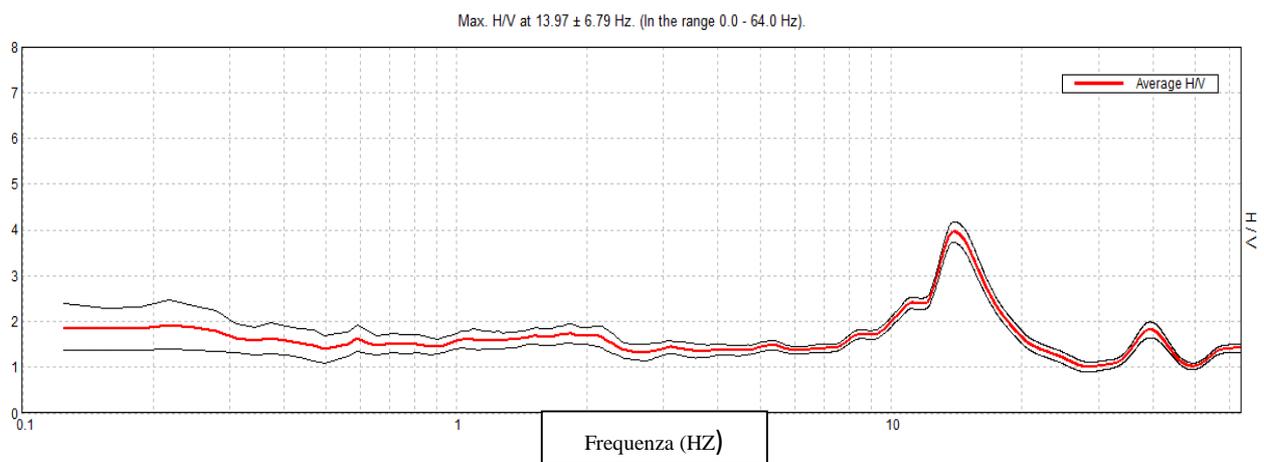


Figura 3.4: rapporto H/V

Una delle misure effettuate (HV) ha subito notevole influenza da rumore antropico. Tutte le tracce escludono la presenza di un netto contrasto di impedenza acustica nel sottosuolo. Non si individuano picchi di risonanza.

In termini di interpretazione del contrasto di impedenza acustica responsabile, eventuali picchi riscontrati, adottando secondo l'ipotesi  $\lambda/4$  una funzione di trasferimento di tipo:

$$F(\omega) = 1/\cos(\omega H/V_s)$$

La frequenza naturale ( $F_n$ ) di vibrazione dello strato di terreno corrisponde ai massimi della funzione di amplificazione:

$$F_n = \omega_n / 2\pi (V_s/4H)$$

con H profondità del rifrattore e  $V_s$  velocità delle onde sismiche di taglio, si può imporre la risonanza del sistema secondo la seguente relazione con T periodo proprio del suolo:

$$T = 2\pi/\omega = 4H/V_s$$

La situazione più pericolosa in termini di fenomeni di amplificazione si verifica quando la frequenza dell'eccitazione armonica ( $\omega$ ) è pari ad una delle frequenze fondamentali dello strato ( $\omega_n$ ). Quando si verifica tale condizione ( $\omega = \omega_n$ ) si ha la risonanza dello strato, ed il fattore di amplificazione è teoricamente infinito. E' quindi di fondamentale importanza porre attenzione ai fenomeni di "doppia risonanza", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei fabbricati.

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

#### **Freq. Naturale edificio \_ 10 Hz / numero piani**

E' la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

#### **Freq. naturale edificio - Freq. fondamentale di risonanza del sito**

ad essere particolarmente pericolosa, poiché dà luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.

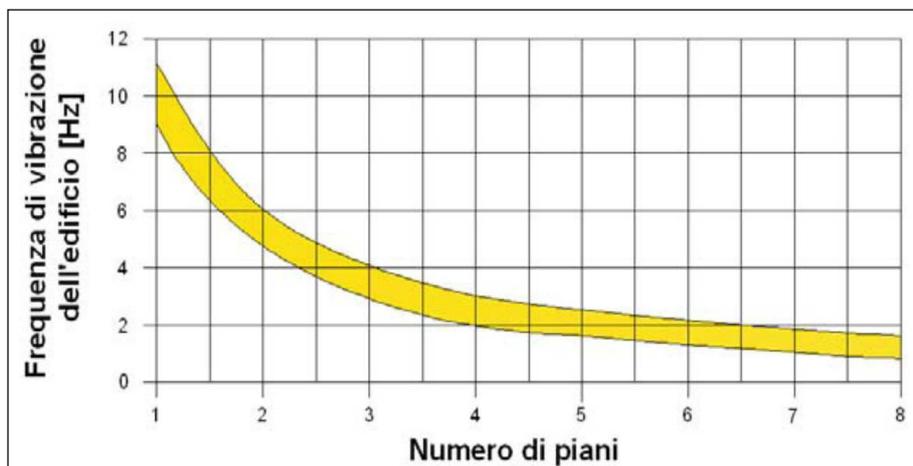


Tabella riassuntiva delle frequenze registrate in un range da 0,0 a 64,0 Hz:

| Sito di indagine | Frequenza max H/V | Considerazioni                                                                     |
|------------------|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| HV               | 13,97 Hz          | Dato registrato in condizioni di basso rumore antropico (traffico automobilistico) |

## Conclusioni HV<sub>5</sub>

Tutte le misurazioni sono state testate per validarne l'efficacia tramite i parametri suggeriti dal Progetto Europeo SESAME:

| Max. H/V at 13.97 ± 6.79 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).                                                                              |                                                                                                                                     |           |            |            |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|------------|------------|------------|
| <b>Criteria for a reliable H/V curve</b><br>[All 3 should be fulfilled]                                                                |                                                                                                                                     |           |            |            |            |
| $f_0 > 10 / L_w$                                                                                                                       | 13.97 > 0.50                                                                                                                        | OK        |            |            |            |
| $\Omega_c(f_0) > 200$                                                                                                                  | 21791.3 > 200                                                                                                                       | OK        |            |            |            |
| $\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$<br>$\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$ | Exceeded 0 out of 672 times                                                                                                         | OK        |            |            |            |
| <b>Criteria for a clear H/V peak</b><br>[At least 5 out of 6 should be fulfilled]                                                      |                                                                                                                                     |           |            |            |            |
| Exists $f^-$ in $[f_0/4, f_0]$   $A_{HV}(f^-) < A_0 / 2$                                                                               | 9.969 Hz                                                                                                                            | OK        |            |            |            |
| Exists $f^+$ in $[f_0, 4f_0]$   $A_{HV}(f^+) < A_0 / 2$                                                                                | 18.688 Hz                                                                                                                           | OK        |            |            |            |
| $A_0 > 2$                                                                                                                              | 3.96 > 2                                                                                                                            | OK        |            |            |            |
| $f_{\text{peak}}[A_{HV}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$                                                                             | 0.48584  < 0.05                                                                                                                     |           |            |            | NO         |
| $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$                                                                                                          | 6.78661 < 0.69844                                                                                                                   |           |            |            | NO         |
| $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$                                                                                                          | 0.2219 < 1.58                                                                                                                       | OK        |            |            |            |
| $L_w$                                                                                                                                  | window length                                                                                                                       |           |            |            |            |
| $\Omega_w$                                                                                                                             | number of windows used in the analysis                                                                                              |           |            |            |            |
| $\Omega_c = L_w \Omega_w f_0$                                                                                                          | number of significant cycles                                                                                                        |           |            |            |            |
| $f$                                                                                                                                    | current frequency                                                                                                                   |           |            |            |            |
| $f_0$                                                                                                                                  | H/V peak frequency                                                                                                                  |           |            |            |            |
| $\sigma_f$                                                                                                                             | standard deviation of H/V peak frequency                                                                                            |           |            |            |            |
| $\varepsilon(f_0)$                                                                                                                     | threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$                                                           |           |            |            |            |
| $A_0$                                                                                                                                  | H/V peak amplitude at frequency $f_0$                                                                                               |           |            |            |            |
| $A_{HV}(f)$                                                                                                                            | H/V curve amplitude at frequency $f$                                                                                                |           |            |            |            |
| $f^-$                                                                                                                                  | frequency between $f_0/4$ and $f_0$ for which $A_{HV}(f^-) < A_0/2$                                                                 |           |            |            |            |
| $f^+$                                                                                                                                  | frequency between $f_0$ and $4f_0$ for which $A_{HV}(f^+) < A_0/2$                                                                  |           |            |            |            |
| $\sigma_A(f)$                                                                                                                          | standard deviation of $A_{HV}(f)$ , $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{HV}(f)$ curve should be multiplied or divided |           |            |            |            |
| $\sigma_{\log A_{HV}}(f)$                                                                                                              | standard deviation of $\log A_{HV}(f)$ curve                                                                                        |           |            |            |            |
| $\theta(f_0)$                                                                                                                          | threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$                                                             |           |            |            |            |
| Threshold values for $\sigma_f$ and $\sigma_A(f_0)$                                                                                    |                                                                                                                                     |           |            |            |            |
| Freq. range [Hz]                                                                                                                       | < 0.2                                                                                                                               | 0.2 – 0.5 | 0.5 – 1.0  | 1.0 – 2.0  | > 2.0      |
| $\varepsilon(f_0)$ [Hz]                                                                                                                | 0.25 $f_0$                                                                                                                          | 0.2 $f_0$ | 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 $\sigma_{\log A_{HV}}(f_0)$                                                                                     | 0.48                                                                                                                                | 0.40      | 0.30       | 0.25       | 0.20       |

Sulla base di queste considerazioni, il sito in esame presenta un picco massimo di risonanza riscontrabile di 13,97 Hz; i dati appaiono propri di un graduale e progressivo miglioramento delle condizioni meccaniche del sottosuolo sino a rilevanti profondità.

## Risultati finali

L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) e sismica passiva (ReMI) ha consentito di determinare il profilo verticale della VS (e del modulo di taglio) e, di conseguenza, del parametro Vs30 (considerando come riferimento il piano campagna  $z = 0$  m).

Questi trovano peraltro riscontro nel modello sismostratigrafico ricavato dalla sismica a rifrazione.

In sintesi:

|                                                            | BEDROCK                          |    |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------|----|
|                                                            | NO                               | SI |
| <b>COPERTURA</b>                                           | Sciolta                          |    |
| <b>SPESSORE</b>                                            | 15 m (spessore certo registrato) |    |
| <b>PARAMETRO Vs da MASW</b><br><b>PARAMETRO Vs da ReMi</b> | Vs 30 = 629 m/s                  |    |
| <b>CATEGORIA DEL SOTTOSUOLO</b>                            | <b>B</b>                         |    |
| <b>PICCHI DI FREQUENZA da H/V</b>                          | 13,97 Hz                         |    |

Rispetto le norme tecniche per le costruzioni (DM 14 gennaio 2008, ex DM 14/09/2005) il sito in esame rientra quindi nella **categoria B**

### Suolo di tipo B

Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, con spessori superiori a 30m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs30, compresi fra 360 m/s e 800 m/s (Nspt,30>50 nei terreni a grana grossa o cu30 >250 kPa nei terreni a grana fina).

Naturalmente il vero dato di velocità va considerato in un ragionevole intorno del dato proveniente dalle elaborazioni sperimentali ( $\pm 10\%$ ), per cui i terreni con velocità borderline vengono cautelativamente attribuiti alla categoria inferiore.

**Una elaborazione più spinta dei dati con l'introduzione di filtraggi particolari avrebbe portato a risultati opinabili. Le conclusioni riguardano quindi solo le elaborazioni dei dati ritenuti attendibili.**

Cison di Valmarino, 10/04/2015

il Geologo  
dott. Simone Bortolini

**STUDIO TECNICO DI GEOLOGIA APPLICATA ALL'INGEGNERIA**  
dott. geol. SIMONE BORTOLINI via San Vito, 9/A Cison di Valmarino (TV)  
tel. 338-1977870  
e-mail simonebortolini@libero.it

---

# **Relazione**

## **Sismica a Rifrazione - MASW – ReMi - HVSr**

per la definizione del profilo verticale Vs e parametro Vs30

---

# **CDM\_SMC 6**

## **CROCETTA DEL MONTELLO (TV)**

### **Via Francesco Baracca**

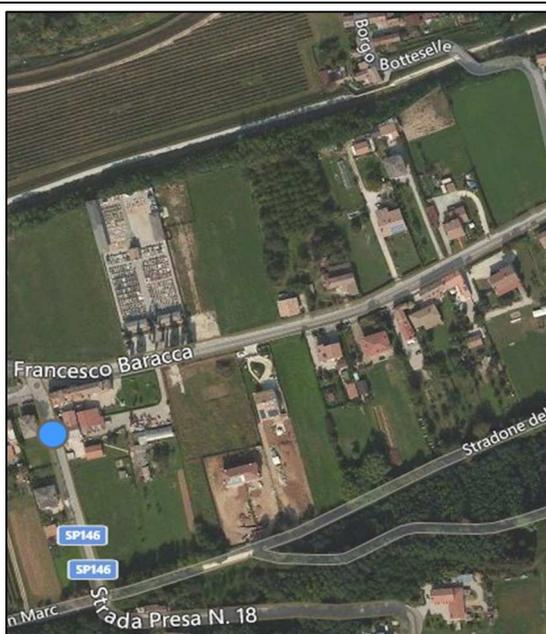
Coordinate WGS84

Lat. N 45,827322 Long. E 12,070441

Coordinate ED50

Lat. N 45,828221 Long. E 12,071440

---



il Geologo

dott. Simone Bortolini

# Introduzione

Al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame è stata effettuata una serie di acquisizioni MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves, analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva – e.g. Park et al., 1999) e ReMi (Refraction Microtremor -Louie, 2001) utili a definire il profilo verticale della  $V_s$  (velocità di propagazione delle onde di taglio) oltre alla tradizionale sismica a rifrazione.

## 1. Interpretazione di stendimenti di sismica a rifrazione

Questo metodo, di semplice applicazione, è utilizzabile nel caso di strati orizzontali o con inclinazione uniforme e in presenza di una superficie topografica, almeno lungo lo stendimento, orizzontale. Si parte inoltre dal presupposto che la velocità dei rifrattori aumenti con la profondità. In pratica si dovrà verificare che la velocità delle onde P nel primo strato sia minore della velocità delle onde P nel secondo, a sua volta inferiore a quella del terzo, ecc. ( $V_1 < V_2 < V_3$ ).

## 2. Tecnica di misurazione e interpretazione MASW

La tecnica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves - Park et al., 1999) è un metodo d'indagine geofisica, sviluppato e diffuso negli ultimi dieci anni circa, che sfrutta le modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare delle onde di Rayleigh, generate da sorgenti artificiali (mazza battente o scoppio). Le onde di Rayleigh si muovono lungo l'interfaccia terra-aria e sono generate dalla rifrazione e riflessione multipla di onde di compressione (P) e onde di taglio che si propagano in direzione verticale (SV).

## 3. Tecnica di misurazione e interpretazione ReMi

La tecnica ReMi (Refraction Microtremor) è un metodo d'indagine geofisica che sfrutta invece le modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare delle onde di Rayleigh, generate però da sorgenti ambientali.

A differenza di quanto avviene nell'indagine eseguita con la tecnica MASW, dove la posizione delle sorgenti è nota ed è allineata allo stendimento, nel caso del ReMi i punti di origine dei microtremori sono spesso non identificabili. Quindi la registrazione viene protratta per tempi più lunghi. Essendo la potenza associata al segnale utile comparabile con quella del rumore di fondo è necessario rilevare un numero di tremori molto elevato, questo sarà ottenibile semplicemente andando a allungare i tempi di registrazione del segnale. A differenza dei pochi secondi necessari per acquisizioni MASW sono qui necessari da alcuni a molti minuti di acquisizione (in genere 10 - 20 minuti sono sufficienti).

I principi teorici e gli aspetti di acquisizione ed elaborazione dei dati sono sostanzialmente gli stessi della tecnica MASW con la differenza che con ReMi si ha una maggior definizione degli strati profondi.

## 4. Tecnica di misure ed interpretazione HVSR (tramite TROMINO)

Tale prospezioni sismica si basa sull'acquisizione e sull'analisi del Rumore Sismico Ambientale (Seismic Noise) ovvero la continua vibrazione del suolo dovuta sia a cause antropiche che naturali. Questa tipologia di tecniche (definite metodi sismici passivi), dunque, non ha bisogno

di alcuna energizzazione esterna poiché utilizza come sorgente il traffico veicolare, la produzione industriale, il vento, la pioggia e tutto ciò che è in grado di produrre una minima vibrazione sulla superficie del suolo.

In particolar modo con la tecnica a “ Stazione Singola” viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero “Horizontal to Vertical Spectral Ratios) (Nakamura, Y. [1989]). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno e individuare la frequenza fondamentale ( $f$ ) di questa vibrazione. Sapendo che in generale esiste una relazione semplice fra  $f$ , lo spessore della parte più soffice del terreno (ovvero la parte di materiali sovrastante il bed-rock) e la velocità media ( $V_s$ ) delle onde sismiche nel sottosuolo, attraverso le misure HVSR è possibile risalire allo spessore di questo strato. Si possono inoltre effettuare delle considerazioni di tipo “qualitativo” molto utili in merito a possibili interferenze tra le frequenze risonanti del suolo e degli edifici sovrastanti.

Per la valutazione del periodo proprio di risonanza del sottosuolo è stata utilizzata la tecnica a stazione singola Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Kanai, 1957; Igarashi 1970; Nakamura 1989) che permette di estrarre informazioni relative alla frequenza di vibrazione del suolo a partire dagli spettri di rumore sismico registrati in sito. La tecnica prevede di calcolare il rapporto, in funzione della frequenza, tra gli spettri di risposta della componente orizzontale e verticale del moto dovuto ai microtremori ambientali. La misura di rumore sismico della durata di 26 minuti per ogni punto di misura è stata eseguita con una frequenza di campionamento a 128 Hz.

## 5. Strumentazione impiegata

### Hardware

L’acquisizione dati per l’elaborazione MASW, ReMI e sismica a rifrazione è avvenuta tramite sismografo a 24 canali (mod. Dolang Geophysical DBS280 24 bit 24 canali) collegato a geofoni verticali a frequenza propria di 4.5Hz.

È stato utilizzato un tromografo digitale modello “Tromino” (Micromed srl) avente un intervallo di acquisizione sulle frequenze da 0.1 a 256 Hz, dotato di sistema di acquisizione digitale ad alta risoluzione (24 bit) e primo-processing interno. La livellazione micrometrica dello strumento è stata assicurata per ogni misura tramite bolla di precisione agendo sui tre punti di appoggio (punte) ed orientando uno dei 3 sensori di acquisizione (ortogonali tra loro) verso il N magnetico.

### Software

Per le analisi dei dati acquisiti si sono adottati i software GeoMASW , GeoReMi, SismaCon di ProgramGeo (Brescia) e il software Grilla.

## Sito Stendimento Sismico St<sub>6</sub>

L'immagine a seguire mostra l'ubicazione dell'indagine denominata 'St<sub>6</sub>' ( ..... ) per lo stendimento sismico effettuato ai fini della classificazione sismica del suolo.



Lo stendimento sismico geofonico lineare multicanale con geofoni verticali (4.5 Hz) è stato posizionato e utilizzato per le prospezioni sismiche tipo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), ReMI (Refraction Microtremor) e Sismica a Rifrazione, analizzano le onde di superficie.

## Dati sperimentali (St<sub>6</sub>)

|                                               |        |
|-----------------------------------------------|--------|
| Numero di ricevitori .....                    | 24     |
| Distanza tra i sensori: .....                 | 2 m    |
| Numero di campioni temporali.....             | 2048   |
| Passo temporale di acquisizione.....          | 0.6 ms |
| Numero di ricevitori usati per l'analisi..... | ...24  |

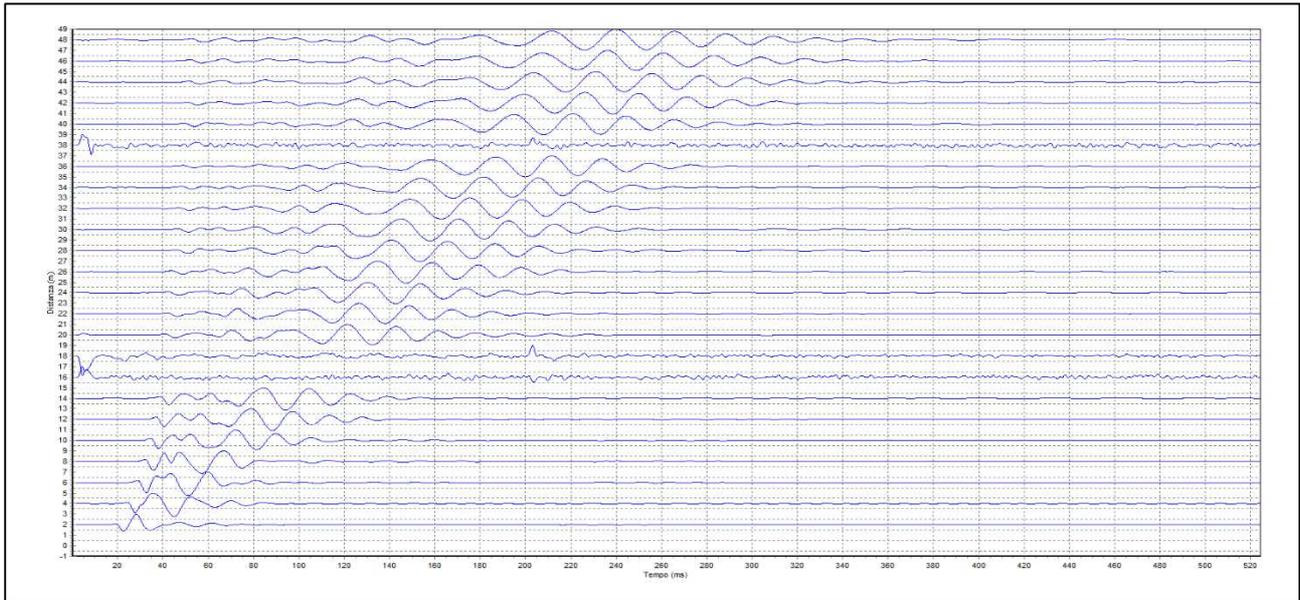


Figura 1.1: Tracce sperimentali tiro diretto

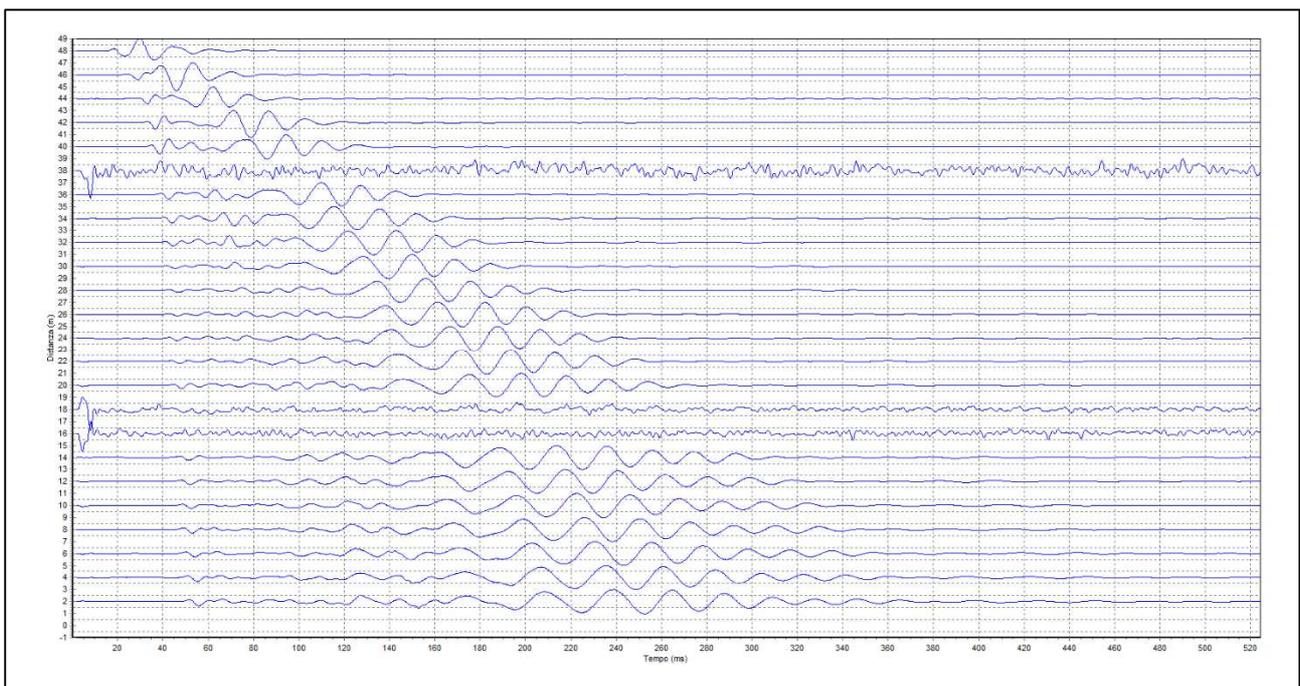


Figura 1.2: Tracce sperimentali tiro coniugato

## Sismica a rifrazione 6

L'interpretazione è stata effettuata sulla base di due sorgenti (mazza su piattello di battuta) poste rispettivamente 2 metri prima del primo geofono e 2 m oltre l'ultimo geofono.

Il metodo utilizzato è il Metodo convenzionale (metodo del tempo di ritardo - delay time); tale metodo è utilizzabile nel caso di strati orizzontali o con inclinazione uniforme e in presenza di una superficie topografica, almeno lungo lo stendimento, orizzontale. Si parte inoltre dal presupposto che la velocità dei rifrattori aumenti con la profondità. In pratica si dovrà verificare che la velocità delle onde P nel primo strato sia minore della velocità delle onde P nel secondo, a sua volta inferiore a quella del terzo, ecc. ( $V_1 < V_2 < V_3$ ), così come nel caso in esame.

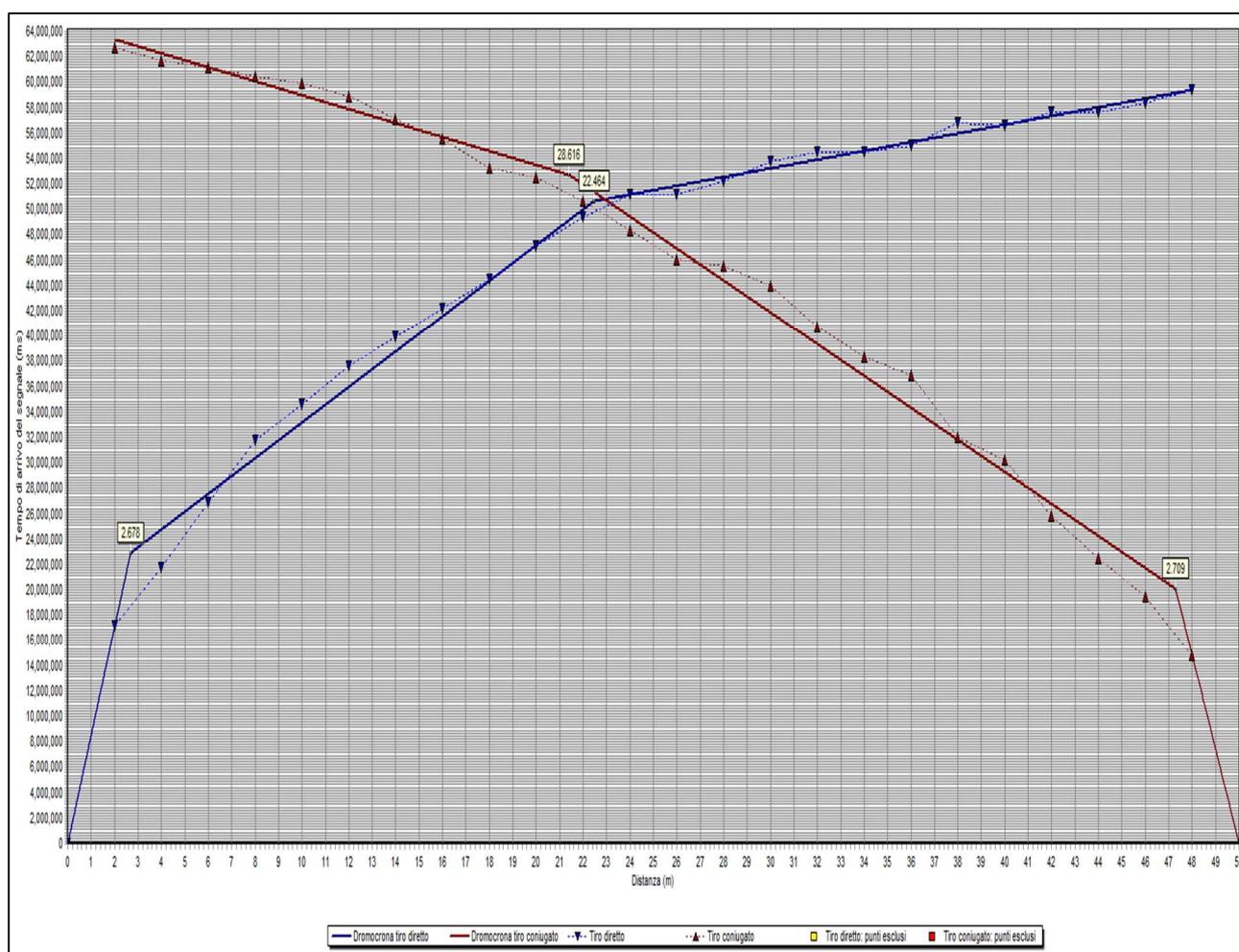


Figura 1.3: grafico generale curva distanza-tempo

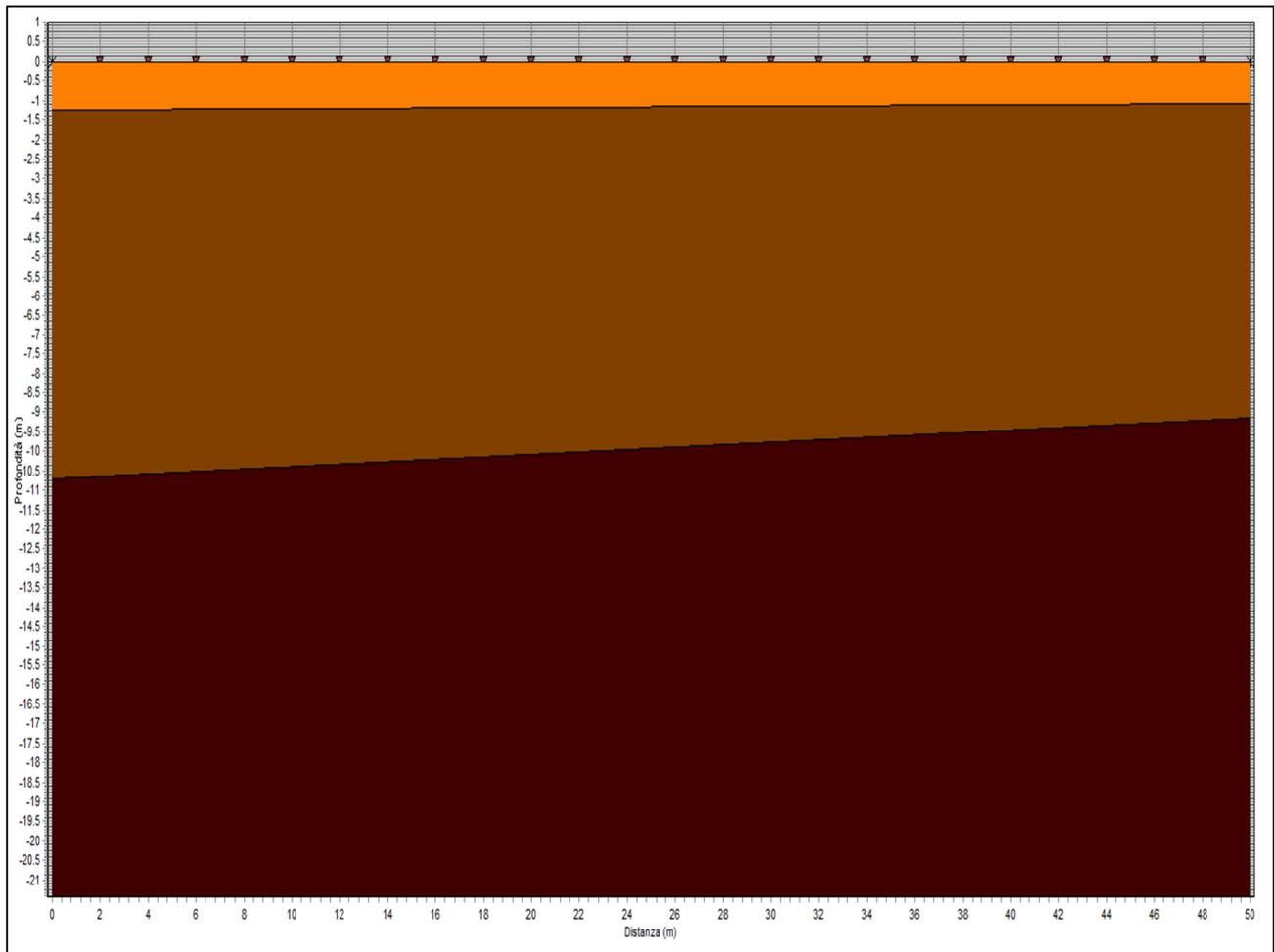


Figura 1.4: Sezione stratigrafica interpretata

La sezione stratigrafica è stata interpretata sulla base dei valori delle velocità delle onde P considerando il profilo topografico orizzontale e gli strati inclinati in maniera pseudo-uniforme.

| Strato n. | Vp (m/s) | Hs(m)  | Hd(m) | rd    | ri    |
|-----------|----------|--------|-------|-------|-------|
| 1         | 583      | 1.225  | 1.065 | 1     | 1     |
| 2         | 754      | 10.716 | 9.147 | 0.988 | 0.988 |
| 3         | 922      |        |       | 0.983 | 0.97  |

**LEGENDA:**  
Hs = spessore strato lato sinistro;  
Hd = spessore strato lato destro;  
Vp = velocità delle onde P.  
Vs = velocità delle onde S.  
rd = coefficiente correlazione tiro diretto  
ri = coefficiente correlazione tiro inverso

## Analisi MASW 6

Frequenza minima .....15 Hz

Frequenza massima .....50 Hz

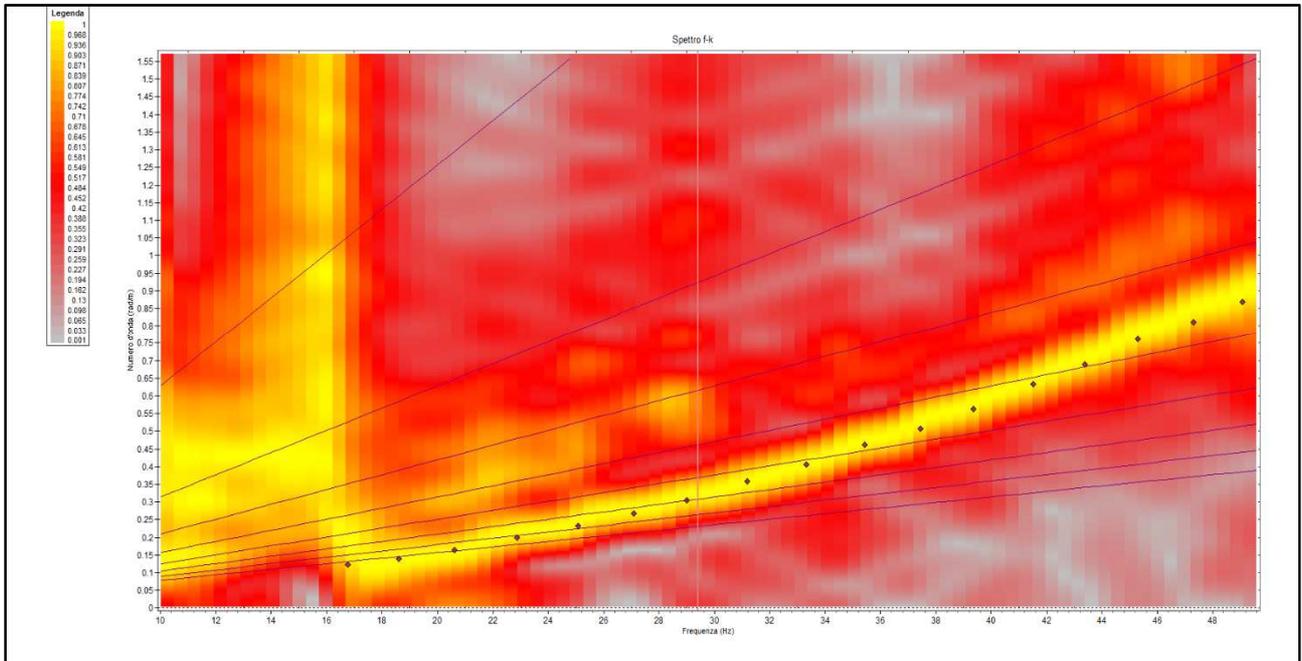


Figura 1.5: Spettro f – k

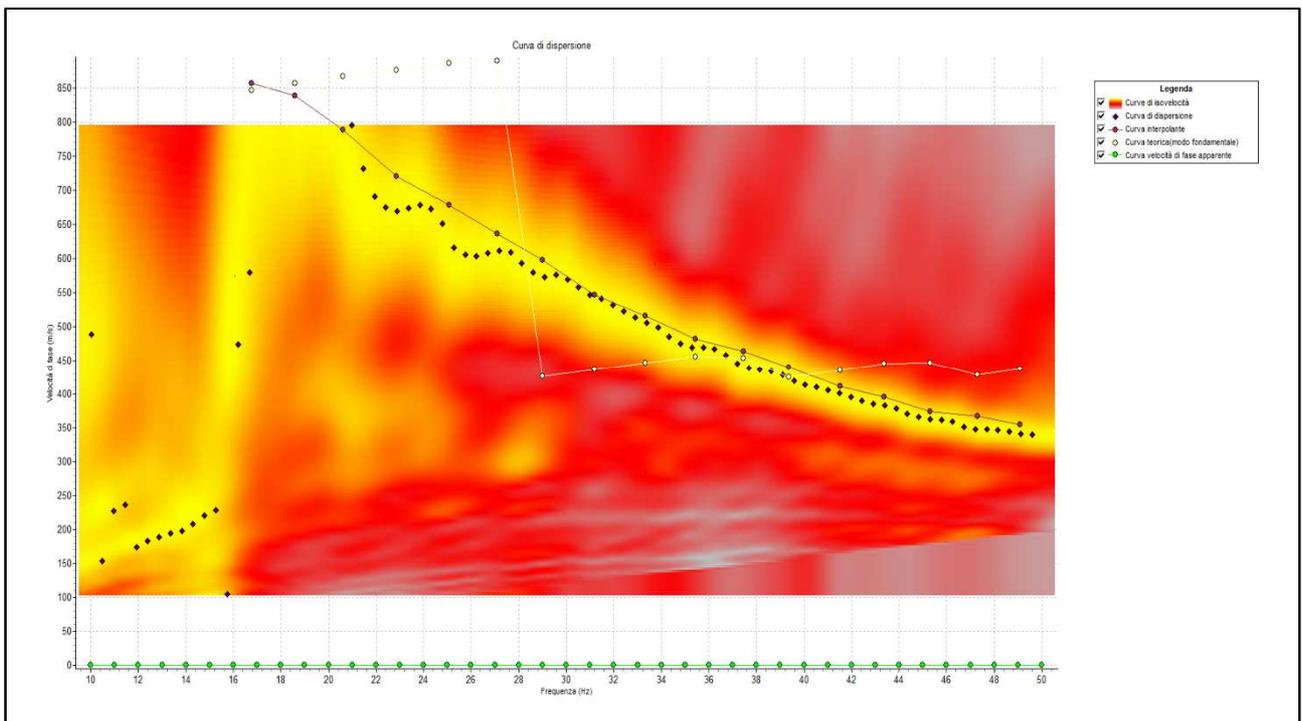


Figura 1.6: Curva di dispersione

L'interpretazione utilizza un algoritmo di inversione che consente di generare una curva di dispersione teorica una volta inserito un modello stratigrafico iniziale del terreno fino alla profondità desiderata e le caratteristiche del semispazio elastico di riferimento.

Procedendo per tentativi, secondo la procedura di Dunkin (1965) modificata da Watson (1970), il programma modifica in automatico il modello iniziale fino a quando lo scarto quadratico medio calcolato fra curva sperimentale e teorica non scende sotto un valore di soglia impostato e modificabile dall'operatore.

Poiché generalmente il metodo empirico genera in automatico un numero elevato di strati, si semplifica il modello iniziale generato mediando i livelli con valori di  $V_s$  simili.

|                                            |     |
|--------------------------------------------|-----|
| Numero di strati (escluso semispazio)..... | 4   |
| Spaziatura ricevitori [m].....             | 2 m |
| Numero ricevitori .....                    | 24  |

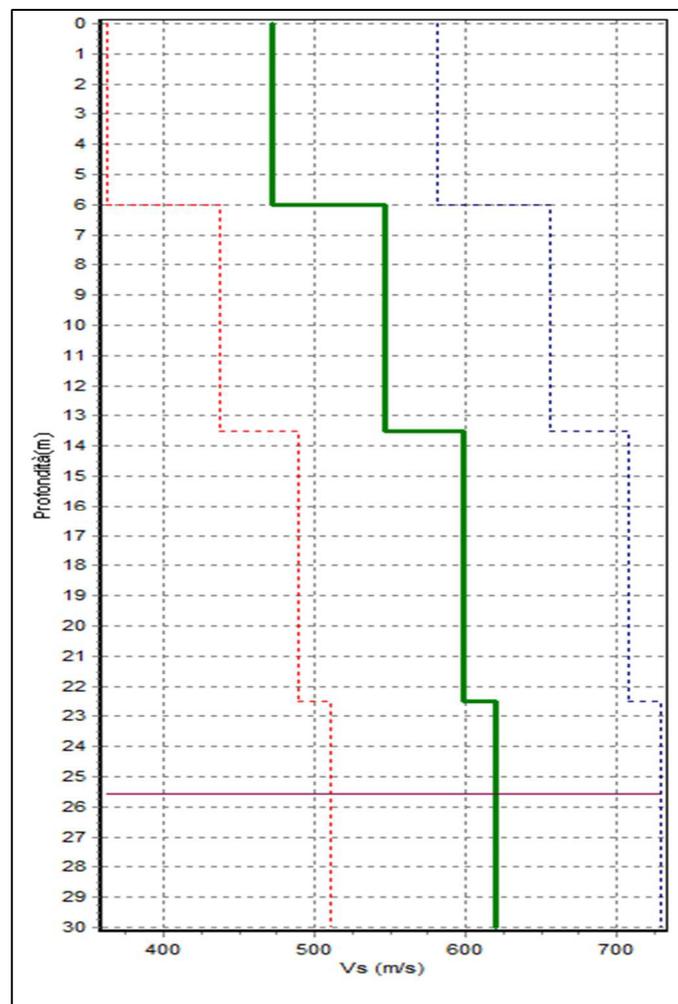


Figura 1.7: Profilo  $V_s$  numerico

La sezione stratigrafica risulta attendibile fino a circa 25-26 m di profondità; oltre tale valore il segnale risulta troppo disturbato anche se si può intuire un aumento dei valori di velocità con la profondità.

## Analisi ReMi 6

Numero di ricevitori ..... 24  
 Distanza tra i sensori: ..... 2 m  
 Numero di ricevitori usati per l'analisi.....24

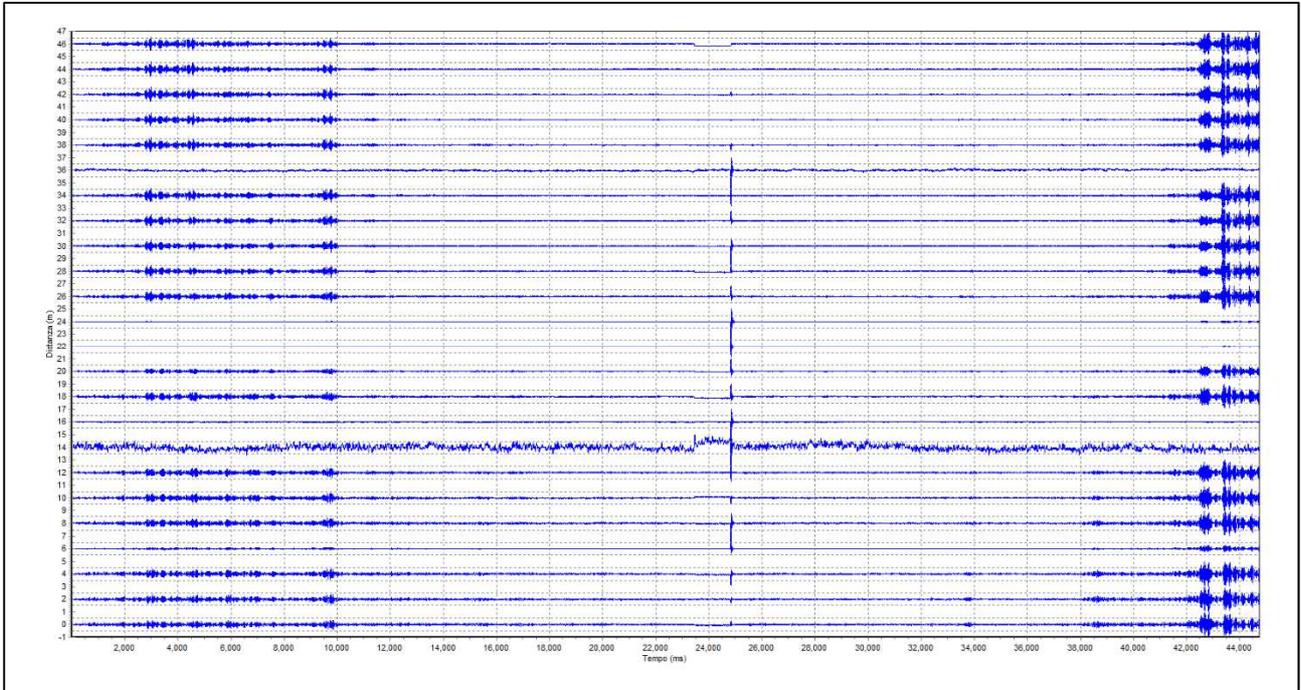


Figura 2.1: Tracce sperimentali

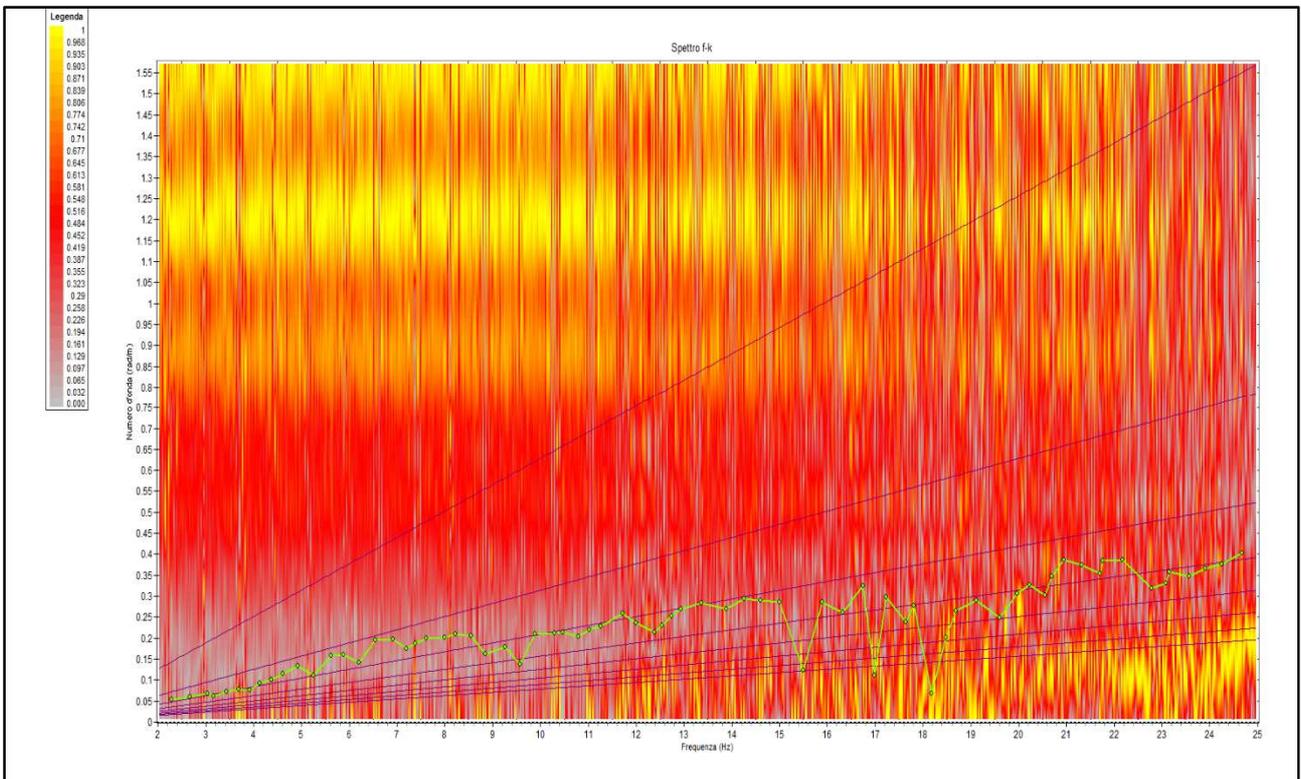


Figura 2.2: Spettro f - k

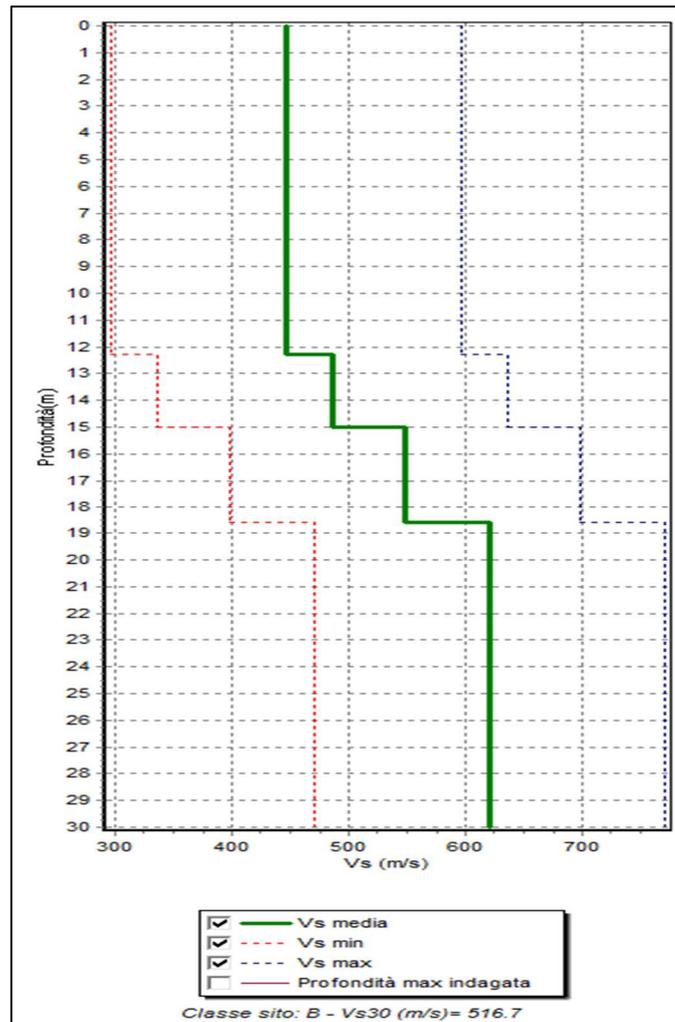


Figura 2.3: Profilo ReMi Vs numerico

## Conclusioni (St<sub>6</sub>)

Secondo la misura sperimentale effettuata e la modellazione del sottosuolo elaborata dal trattamento dei dati con i tre metodi appena descritti, per lo stendimento sismico St<sub>1</sub> si individuano materiali sciolti di media consistenza caratterizzati da velocità delle onde sismiche di taglio tipiche di materiali granulari medio fini.

In sintesi viene riportata una stratigrafia sismica di massima del sito indagato:

| Profondità (m) | Vs (m/s) | Considerazioni                             |
|----------------|----------|--------------------------------------------|
| 0 – 12 m       | 450      | Ghiaie frammiste a limi argilloso sabbiosi |
| 12 - 19 m      | 520      | Ghiaie                                     |
| 19 - 30 m      | 600      | Ghiaie compatte                            |

## Periodo proprio di risonanza del suolo (HV<sub>6</sub>)

La foto aerea mostra l'ubicazione della indagine denominata HV<sub>6</sub> (  ) indicante il punto di acquisizione di rumore sismico ambientale finalizzata alla definizione del periodo proprio del suolo.



Nello studio specifico degli effetti di sito, la frequenza di campionamento utilizzata è di 128 Hz, con tempi di misura dell'ordine di 26 minuti.

Per la misura, oltre allo spettro H/V, è palesata la trasformata delle singole componenti, l'analisi direzionale e temporale del rumore sismico acquisito.

## Analisi HV<sub>6</sub>

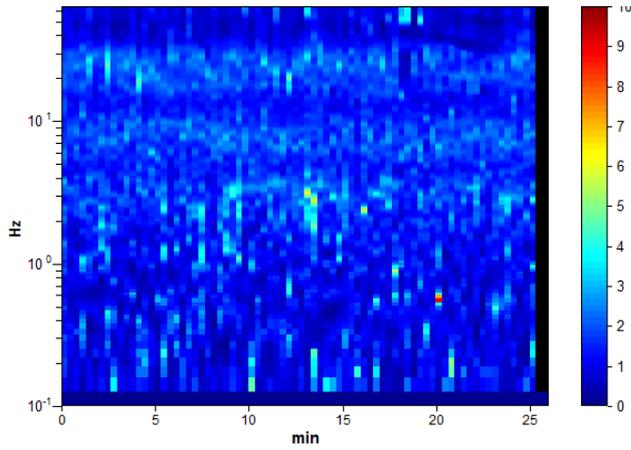


Figura 3.1: analisi temporale del rumore

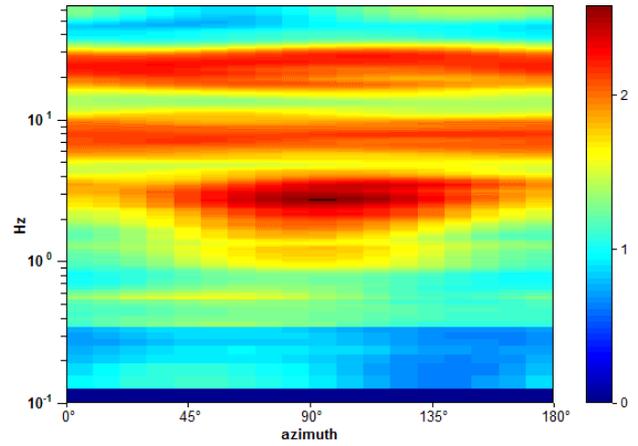


Figura 3.2: analisi direzionale del rumore

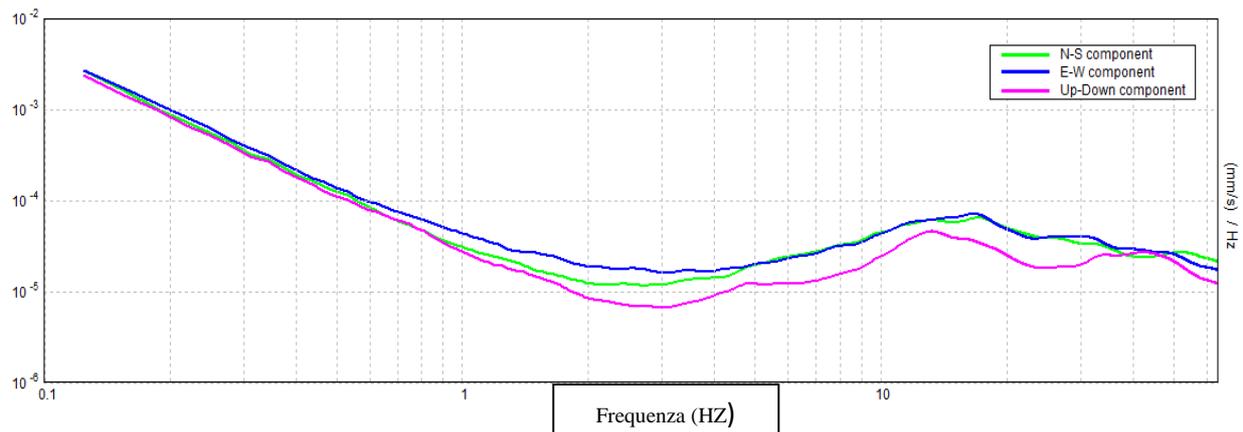


Figura 3.3: spettri delle 3 componenti

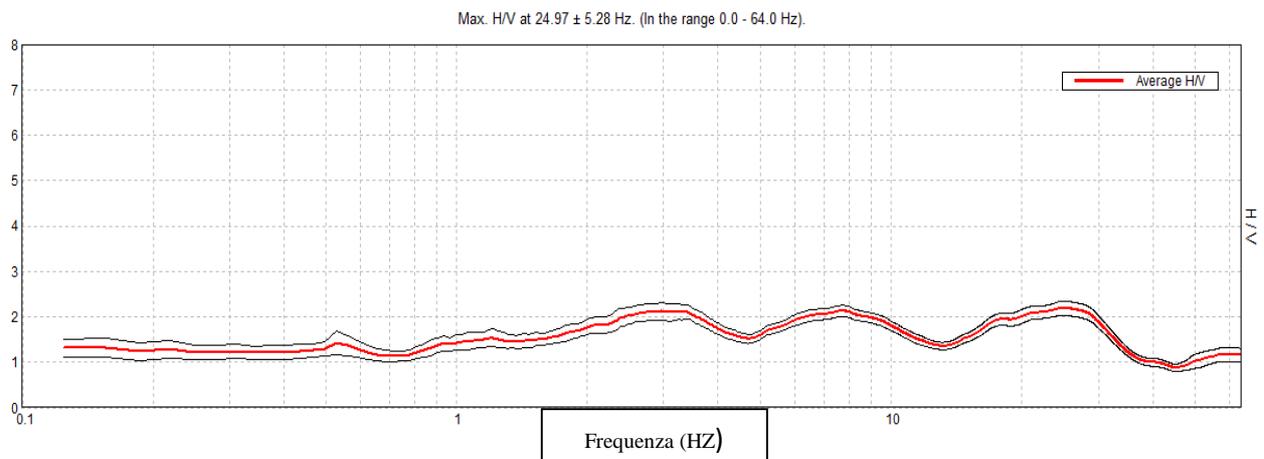


Figura 3.4: rapporto H/V

Una delle misure effettuate (HV) ha subito notevole influenza da rumore antropico. Tutte le tracce escludono la presenza di un netto contrasto di impedenza acustica nel sottosuolo. Non si individuano picchi di risonanza.

In termini di interpretazione del contrasto di impedenza acustica responsabile, eventuali picchi riscontrati, adottando secondo l'ipotesi  $\lambda/4$  una funzione di trasferimento di tipo:

$$F(\omega) = 1/\cos(\omega H/V_s)$$

La frequenza naturale ( $F_n$ ) di vibrazione dello strato di terreno corrisponde ai massimi della funzione di amplificazione:

$$F_n = \omega_n / 2\pi (V_s/4H)$$

con  $H$  profondità del rifrattore e  $V_s$  velocità delle onde sismiche di taglio, si può imporre la risonanza del sistema secondo la seguente relazione con  $T$  periodo proprio del suolo:

$$T = 2\pi/\omega = 4H/V_s$$

La situazione più pericolosa in termini di fenomeni di amplificazione si verifica quando la frequenza dell'eccitazione armonica ( $\omega$ ) è pari ad una delle frequenze fondamentali dello strato ( $\omega_n$ ). Quando si verifica tale condizione ( $\omega = \omega_n$ ) si ha la risonanza dello strato, ed il fattore di amplificazione è teoricamente infinito. E' quindi di fondamentale importanza porre attenzione ai fenomeni di "doppia risonanza", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei fabbricati.

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

$$\text{Freq. Naturale edificio} \approx 10 \text{ Hz} / \text{numero piani}$$

E' la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

$$\text{Freq. naturale edificio} = \text{Freq. fondamentale di risonanza del sito}$$

ad essere particolarmente pericolosa, poiché dà luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.

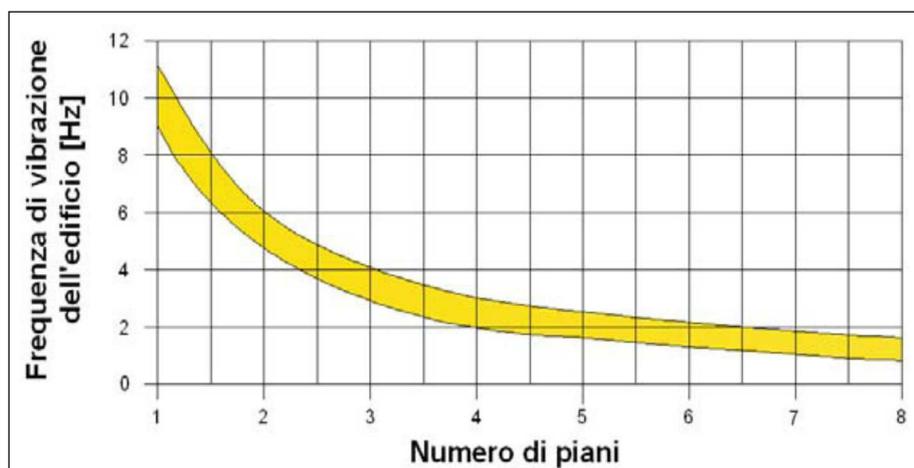


Tabella riassuntiva delle frequenze registrate in un range da 0,0 a 64,0 Hz:

| Sito di indagine | Frequenza max H/V       | Considerazioni                                                                     |
|------------------|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| HV               | 3 Hz; 7,5 Hz e 24,97 Hz | Dato registrato in condizioni di basso rumore antropico (traffico automobilistico) |

## Conclusioni HV<sub>6</sub>

Tutte le misurazioni sono state testate per validarne l'efficacia tramite i parametri suggeriti dal Progetto Europeo SESAME:

| Max. H/V at 24.97 ± 5.28 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).                                                                              |                                                                                                                                     |           |            |            |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|------------|------------|------------|
| <b>Criteria for a reliable H/V curve</b><br>[All 3 should be fulfilled]                                                                |                                                                                                                                     |           |            |            |            |
| $f_0 > 10 / L_w$                                                                                                                       | 24.97 > 0.50                                                                                                                        | OK        |            |            |            |
| $n_c(f_0) > 200$                                                                                                                       | 38951.3 > 200                                                                                                                       | OK        |            |            |            |
| $\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$<br>$\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$ | Exceeded 0 out of 1200 times                                                                                                        | OK        |            |            |            |
| <b>Criteria for a clear H/V peak</b><br>[At least 5 out of 6 should be fulfilled]                                                      |                                                                                                                                     |           |            |            |            |
| Exists $f^-$ in $[f_0/4, f_0]$   $A_{HV}(f^-) < A_0 / 2$                                                                               | 36.719 Hz                                                                                                                           | OK        | NO         |            |            |
| Exists $f^+$ in $[f_0, 4f_0]$   $A_{HV}(f^+) < A_0 / 2$                                                                                | 2.18 > 2                                                                                                                            | OK        |            |            |            |
| $A_0 > 2$                                                                                                                              | 0.211571 < 0.05                                                                                                                     |           | NO         |            |            |
| $f_{\text{peak}}[A_{HV}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$                                                                             | 5.28266 < 1.24844                                                                                                                   |           | NO         |            |            |
| $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$                                                                                                          | 0.1565 < 1.58                                                                                                                       | OK        |            |            |            |
| $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$                                                                                                          |                                                                                                                                     |           |            |            |            |
| $L_w$                                                                                                                                  | window length                                                                                                                       |           |            |            |            |
| $D_w$                                                                                                                                  | number of windows used in the analysis                                                                                              |           |            |            |            |
| $\Omega_0 = L_w D_w f_0$                                                                                                               | number of significant cycles                                                                                                        |           |            |            |            |
| $f$                                                                                                                                    | current frequency                                                                                                                   |           |            |            |            |
| $f_0$                                                                                                                                  | H/V peak frequency                                                                                                                  |           |            |            |            |
| $\sigma_f$                                                                                                                             | standard deviation of H/V peak frequency                                                                                            |           |            |            |            |
| $\varepsilon(f_0)$                                                                                                                     | threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$                                                           |           |            |            |            |
| $A_0$                                                                                                                                  | H/V peak amplitude at frequency $f_0$                                                                                               |           |            |            |            |
| $A_{HV}(f)$                                                                                                                            | H/V curve amplitude at frequency $f$                                                                                                |           |            |            |            |
| $f^-$                                                                                                                                  | frequency between $f_0/4$ and $f_0$ for which $A_{HV}(f^-) < A_0/2$                                                                 |           |            |            |            |
| $f^+$                                                                                                                                  | frequency between $f_0$ and $4f_0$ for which $A_{HV}(f^+) < A_0/2$                                                                  |           |            |            |            |
| $\sigma_A(f)$                                                                                                                          | standard deviation of $A_{HV}(f)$ , $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{HV}(f)$ curve should be multiplied or divided |           |            |            |            |
| $\sigma_{\log A_{HV}(f)}$                                                                                                              | standard deviation of $\log A_{HV}(f)$ curve                                                                                        |           |            |            |            |
| $\theta(f_0)$                                                                                                                          | threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$                                                             |           |            |            |            |
| Threshold values for $\sigma_f$ and $\sigma_A(f_0)$                                                                                    |                                                                                                                                     |           |            |            |            |
| Freq. range [Hz]                                                                                                                       | < 0.2                                                                                                                               | 0.2 – 0.5 | 0.5 – 1.0  | 1.0 – 2.0  | > 2.0      |
| $\varepsilon(f_0)$ [Hz]                                                                                                                | 0.25 $f_0$                                                                                                                          | 0.2 $f_0$ | 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 $\sigma_{\log A_{HV}(f_0)}$                                                                                     | 0.48                                                                                                                                | 0.40      | 0.30       | 0.25       | 0.20       |

Sulla base di queste considerazioni, il sito in esame presenta picchi di risonanza riscontrabili a **3 Hz; 7,5 Hz e 24,97 Hz**; i dati appaiono propri di un graduale e progressivo miglioramento delle condizioni meccaniche del sottosuolo sino a rilevanti profondità.

## Risultati finali

L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) e sismica passiva (ReMI) ha consentito di determinare il profilo verticale della VS (e del modulo di taglio) e, di conseguenza, del parametro Vs30 (considerando come riferimento il piano campagna  $z = 0$  m).

Questi trovano peraltro riscontro nel modello sismostratigrafico ricavato dalla sismica a rifrazione.

In sintesi:

|                                                            | <b>BEDROCK</b>                                    |           |
|------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-----------|
|                                                            | <b>NO</b>                                         | <b>SI</b> |
| <b>COPERTURA</b>                                           | Sciolta                                           |           |
| <b>SPESSORE</b>                                            | 25-26 m (spessore certo registrato)               |           |
| <b>PARAMETRO Vs da MASW</b><br><b>PARAMETRO Vs da ReMi</b> | <b>Vs 30 = 516 m/s</b>                            |           |
| <b>CATEGORIA DEL SOTTOSUOLO</b>                            | <b>B</b>                                          |           |
| <b>PICCHI DI FREQUENZE da H/V</b>                          | <b>3 Hz; 7,5 Hz</b><br><b>Picco massimo 25 Hz</b> |           |

Rispetto le norme tecniche per le costruzioni (DM 14 gennaio 2008, ex DM 14/09/2005) il sito in esame rientra quindi nella **categoria B**

### **Suolo di tipo B**

Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, con spessori superiori a 30m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs30, compresi fra 360 m/s e 800 m/s ( $N_{spt,30} > 50$  nei terreni a grana grossa o  $cu_{30} > 250$  kPa nei terreni a grana fina).

Naturalmente il vero dato di velocità va considerato in un ragionevole intorno del dato proveniente dalle elaborazioni sperimentali ( $\pm 10\%$ ), per cui i terreni con velocità borderline vengono cautelativamente attribuiti alla categoria inferiore.

**Una elaborazione più spinta dei dati con l'introduzione di filtraggi particolari avrebbe portato a risultati opinabili. Le conclusioni riguardano quindi solo le elaborazioni dei dati ritenuti attendibili.**

Cison di Valmarino, 10/04/2015

il Geologo  
dott. Simone Bortolini

**STUDIO TECNICO DI GEOLOGIA APPLICATA ALL'INGEGNERIA**  
dott. geol. SIMONE BORTOLINI via San Vito, 9/A Cison di Valmarino (TV)  
tel. 338-1977870  
e-mail simonebortolini@libero.it

---

# **Relazione**

## **Sismica a Rifrazione - MASW – ReMi - HVSr**

per la definizione del profilo verticale Vs e parametro Vs30

---

### **CDM\_SMC 7**

### **CROCETTA DEL MONTELLO (TV)**

#### **Via Ivo L. Lollini**

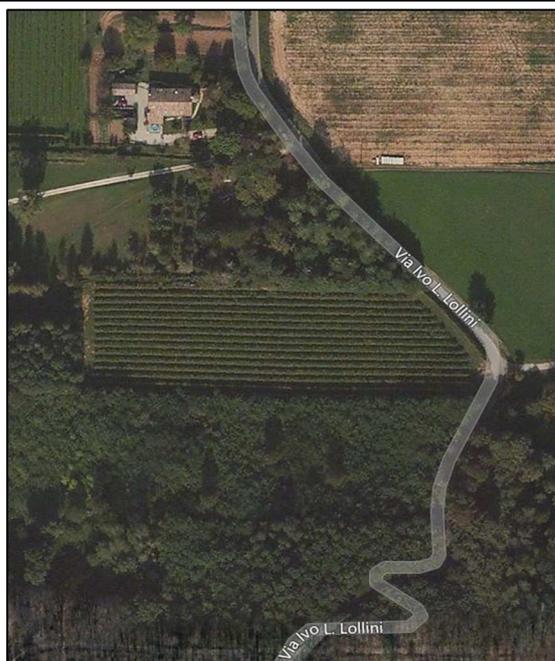
Coordinate WGS84

Lat. N 45,823731 Long. E 12,077659

Coordinate ED50

Lat. N 45,824630 Long. E 12,078658

---



il Geologo

dott. Simone Bortolini

# Introduzione

Al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame è stata effettuata una serie di acquisizioni MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves, analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva – e.g. Park et al., 1999) e ReMi (Refraction Microtremor -Louie, 2001) utili a definire il profilo verticale della  $V_s$  (velocità di propagazione delle onde di taglio) oltre alla tradizionale sismica a rifrazione.

## 1. Interpretazione di stendimenti di sismica a rifrazione

Questo metodo, di semplice applicazione, è utilizzabile nel caso di strati orizzontali o con inclinazione uniforme e in presenza di una superficie topografica, almeno lungo lo stendimento, orizzontale. Si parte inoltre dal presupposto che la velocità dei rifrattori aumenti con la profondità. In pratica si dovrà verificare che la velocità delle onde P nel primo strato sia minore della velocità delle onde P nel secondo, a sua volta inferiore a quella del terzo, ecc. ( $V_1 < V_2 < V_3$ ).

## 2. Tecnica di misurazione e interpretazione MASW

La tecnica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves - Park et al., 1999) è un metodo d'indagine geofisica, sviluppato e diffuso negli ultimi dieci anni circa, che sfrutta le modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare delle onde di Rayleigh, generate da sorgenti artificiali (mazza battente o scoppio). Le onde di Rayleigh si muovono lungo l'interfaccia terra-aria e sono generate dalla rifrazione e riflessione multipla di onde di compressione (P) e onde di taglio che si propagano in direzione verticale (SV).

## 3. Tecnica di misurazione e interpretazione ReMi

La tecnica ReMi (Refraction Microtremor) è un metodo d'indagine geofisica che sfrutta invece le modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare delle onde di Rayleigh, generate però da sorgenti ambientali.

A differenza di quanto avviene nell'indagine eseguita con la tecnica MASW, dove la posizione delle sorgenti è nota ed è allineata allo stendimento, nel caso del ReMi i punti di origine dei microtremori sono spesso non identificabili. Quindi la registrazione viene protratta per tempi più lunghi. Essendo la potenza associata al segnale utile comparabile con quella del rumore di fondo è necessario rilevare un numero di tremori molto elevato, questo sarà ottenibile semplicemente andando a allungare i tempi di registrazione del segnale. A differenza dei pochi secondi necessari per acquisizioni MASW sono qui necessari da alcuni a molti minuti di acquisizione (in genere 10 - 20 minuti sono sufficienti).

I principi teorici e gli aspetti di acquisizione ed elaborazione dei dati sono sostanzialmente gli stessi della tecnica MASW con la differenza che con ReMi si ha una maggior definizione degli strati profondi.

## 4. Tecnica di misure ed interpretazione HVSR (tramite TROMINO)

Tale prospezione sismica si basa sull'acquisizione e sull'analisi del Rumore Sismico Ambientale (Seismic Noise) ovvero la continua vibrazione del suolo dovuta sia a cause antropiche che naturali. Questa tipologia di tecniche (definite metodi sismici passivi), dunque, non ha bisogno

di alcuna energizzazione esterna poiché utilizza come sorgente il traffico veicolare, la produzione industriale, il vento, la pioggia e tutto ciò che è in grado di produrre una minima vibrazione sulla superficie del suolo.

In particolar modo con la tecnica a “ Stazione Singola” viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero “Horizontal to Vertical Spectral Ratios) (Nakamura, Y. [1989]). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno e individuare la frequenza fondamentale ( $f$ ) di questa vibrazione. Sapendo che in generale esiste una relazione semplice fra  $f$ , lo spessore della parte più soffice del terreno (ovvero la parte di materiali sovrastante il bed-rock) e la velocità media ( $V_s$ ) delle onde sismiche nel sottosuolo, attraverso le misure HVSR è possibile risalire allo spessore di questo strato. Si possono inoltre effettuare delle considerazioni di tipo “qualitativo” molto utili in merito a possibili interferenze tra le frequenze risonanti del suolo e degli edifici sovrastanti.

Per la valutazione del periodo proprio di risonanza del sottosuolo è stata utilizzata la tecnica a stazione singola Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Kanai, 1957; Igarashi 1970; Nakamura 1989) che permette di estrarre informazioni relative alla frequenza di vibrazione del suolo a partire dagli spettri di rumore sismico registrati in sito. La tecnica prevede di calcolare il rapporto, in funzione della frequenza, tra gli spettri di risposta della componente orizzontale e verticale del moto dovuto ai microtremori ambientali. La misura di rumore sismico della durata di 26 minuti per ogni punto di misura è stata eseguita con una frequenza di campionamento a 128 Hz.

## 5. Strumentazione impiegata

### Hardware

L’acquisizione dati per l’elaborazione MASW, ReMI e sismica a rifrazione è avvenuta tramite sismografo a 24 canali (mod. Dolang Geophysical DBS280 24 bit 24 canali) collegato a geofoni verticali a frequenza propria di 4.5Hz.

È stato utilizzato un tromografo digitale modello “Tromino” (Micromed srl) avente un intervallo di acquisizione sulle frequenze da 0.1 a 256 Hz, dotato di sistema di acquisizione digitale ad alta risoluzione (24 bit) e primo-processing interno. La livellazione micrometrica dello strumento è stata assicurata per ogni misura tramite bolla di precisione agendo sui tre punti di appoggio (punte) ed orientando uno dei 3 sensori di acquisizione (ortogonali tra loro) verso il N magnetico.

### Software

Per le analisi dei dati acquisiti si sono adottati i software GeoMASW , GeoReMi, SismaCon di ProgramGeo (Brescia) e il software Grilla.

## Sito Stendimento Sismico St<sub>7</sub>

L'immagine a seguire mostra l'ubicazione dell'indagine denominata 'St<sub>7</sub>' ( ..... ) per lo stendimento sismico effettuato ai fini della classificazione sismica del suolo.



Lo stendimento sismico geofonico lineare multicanale con geofoni verticali (4.5 Hz) è stato posizionato e utilizzato per le prospezioni sismiche tipo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), ReMI (Refraction Microtremor) e Sismica a Rifrazione, analizzano le onde di superficie.

## Dati sperimentali (St7)

|                                               |        |
|-----------------------------------------------|--------|
| Numero di ricevitori .....                    | 24     |
| Distanza tra i sensori: .....                 | 2 m    |
| Numero di campioni temporali.....             | 2048   |
| Passo temporale di acquisizione.....          | 0.6 ms |
| Numero di ricevitori usati per l'analisi..... | ...24  |

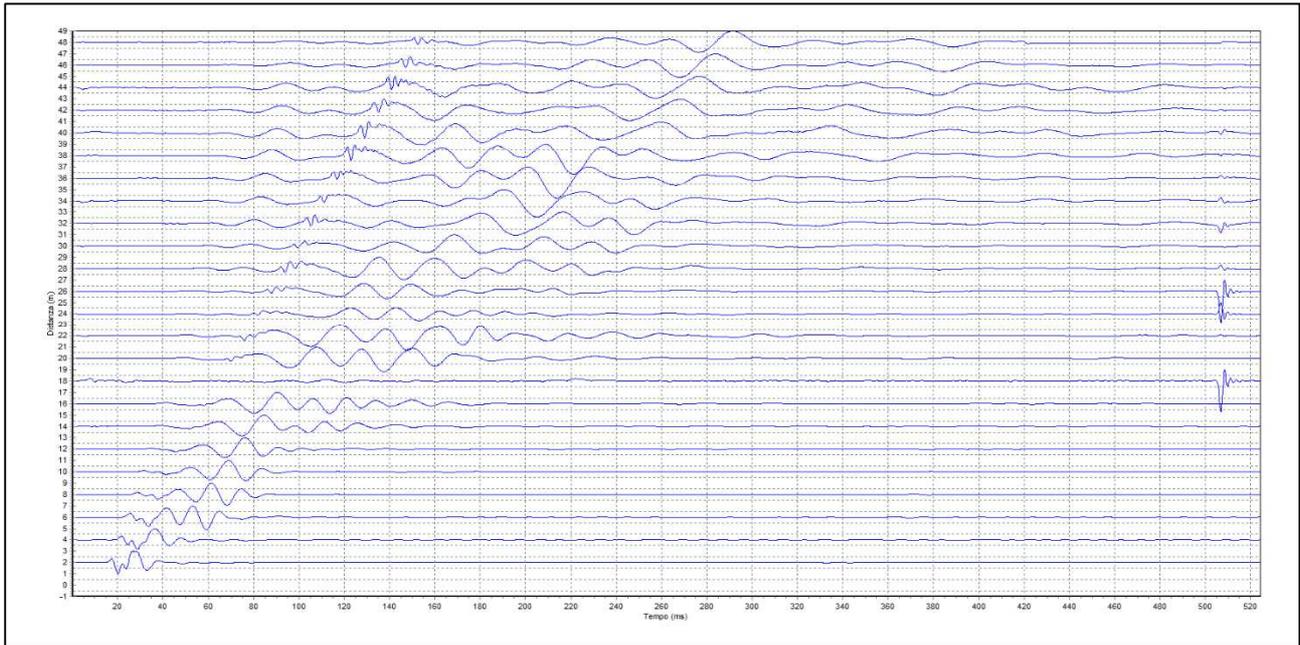


Figura 1.1: Tracce sperimentali tiro diretto

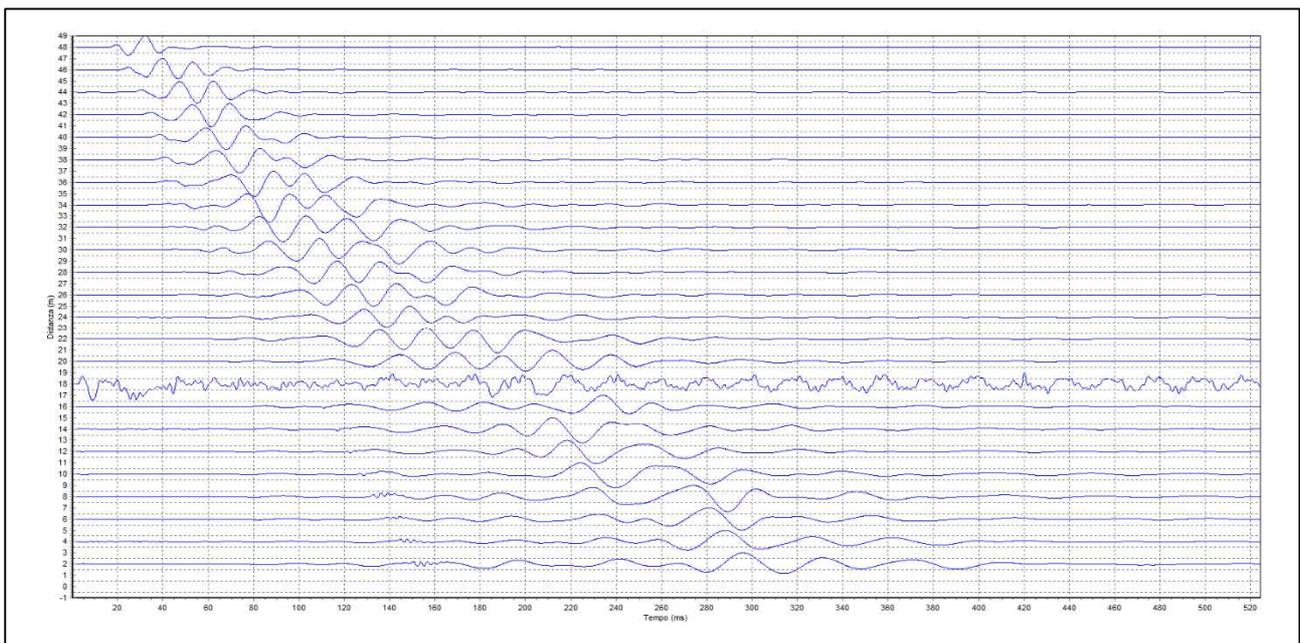


Figura 1.2: Tracce sperimentali tiro coniugato

## Sismica a rifrazione 7

L'interpretazione è stata effettuata sulla base di due sorgenti (mazza su piattello di battuta) poste rispettivamente 2 metri prima del primo geofono e 2 m oltre l'ultimo geofono.

Il metodo utilizzato è il Metodo convenzionale (metodo del tempo di ritardo - delay time); tale metodo è utilizzabile nel caso di strati orizzontali o con inclinazione uniforme e in presenza di una superficie topografica, almeno lungo lo stendimento, orizzontale. Si parte inoltre dal presupposto che la velocità dei rifrattori aumenti con la profondità. In pratica si dovrà verificare che la velocità delle onde P nel primo strato sia minore della velocità delle onde P nel secondo, a sua volta inferiore a quella del terzo, ecc. ( $V_1 < V_2 < V_3$ ), così come nel caso in esame.

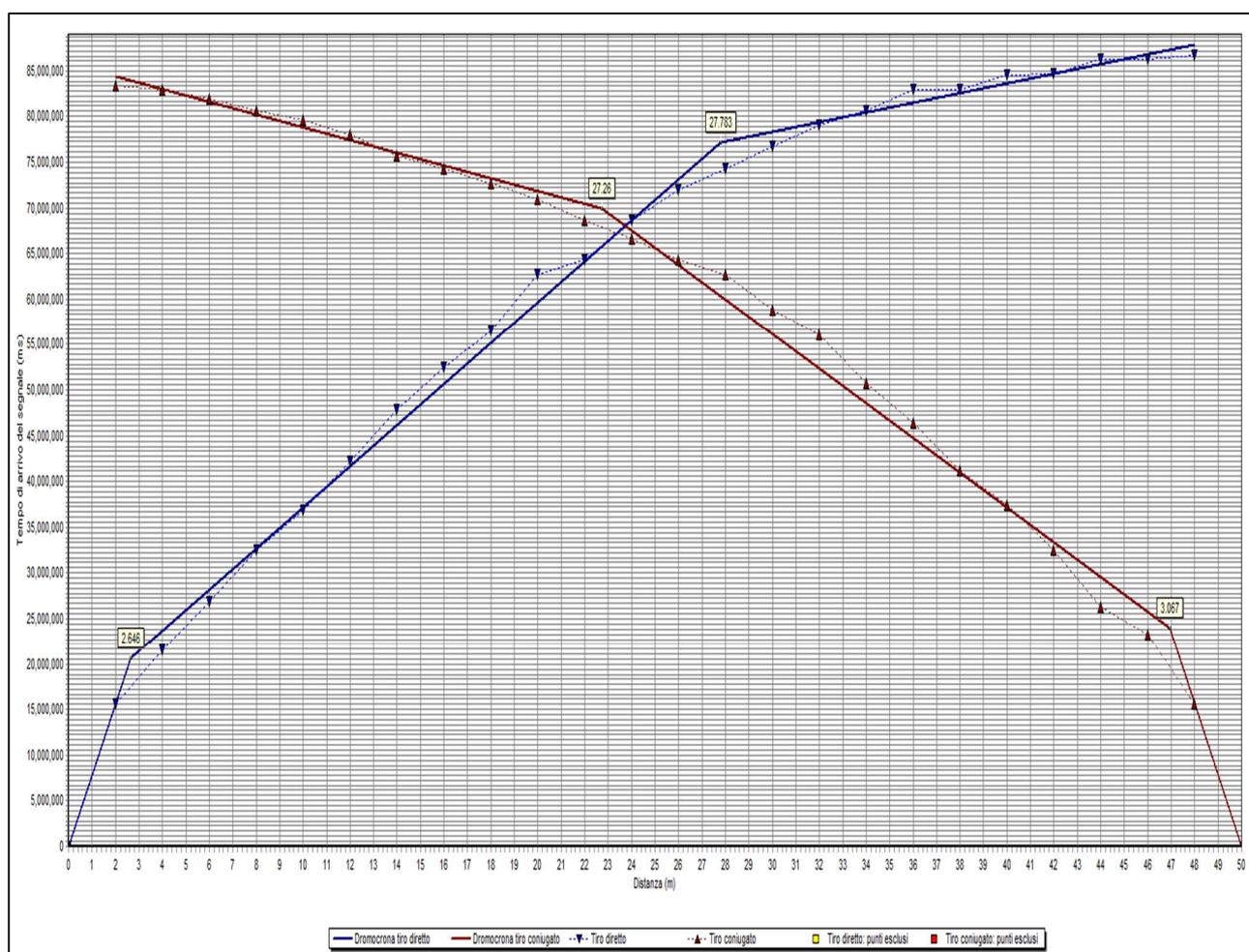


Figura 1.3: gráfico general curva distancia-tempo

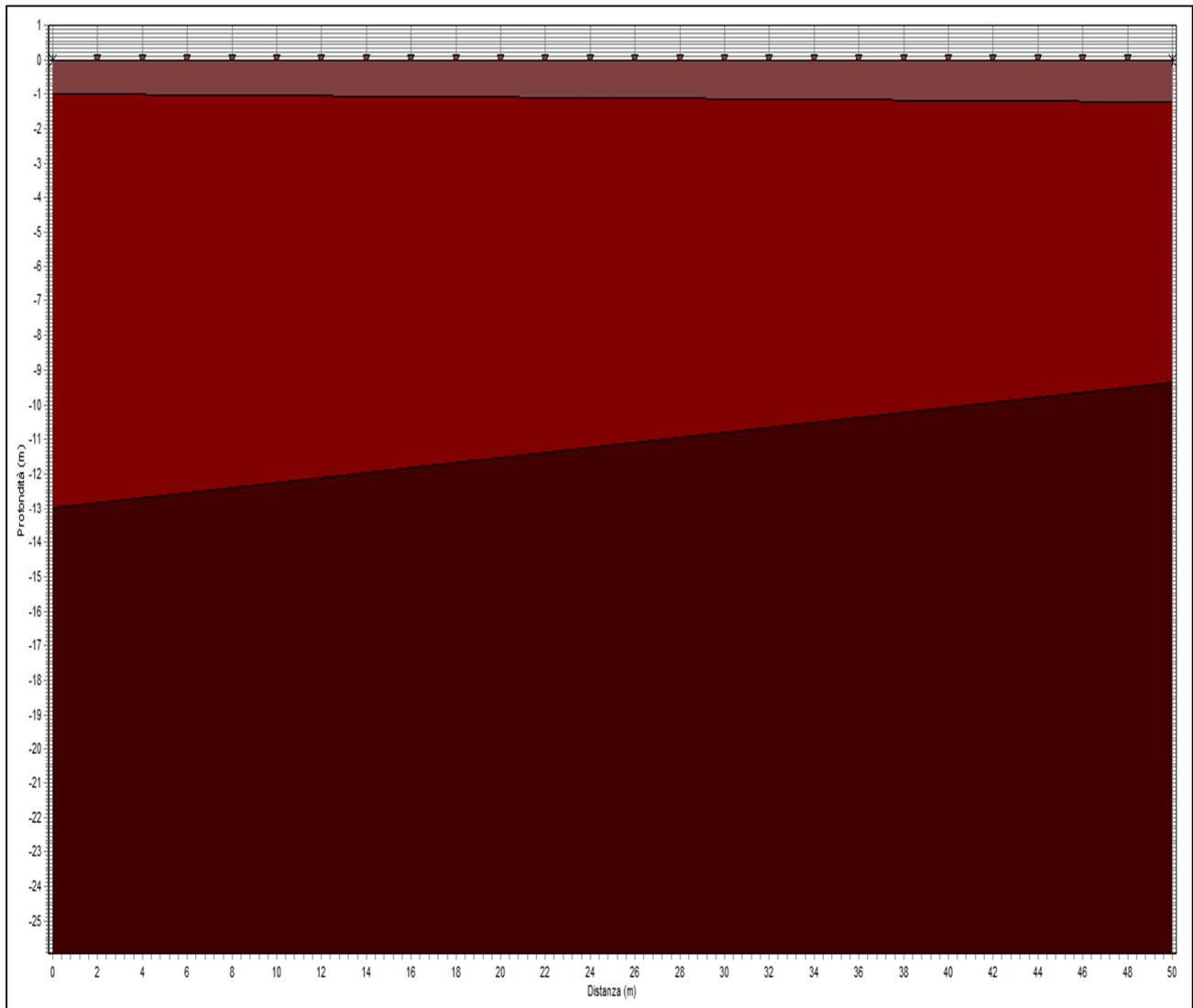


Figura 1.4: Sezione stratigrafica interpretata

La sezione stratigrafica è stata interpretata sulla base dei valori delle velocità delle onde P considerando il profilo topografico orizzontale e gli strati inclinati in maniera pseudo-uniforme.

| Strato n. | Vp (m/s) | Hs(m)  | Hd(m) | rd    | ri    |
|-----------|----------|--------|-------|-------|-------|
| 1         | 344      | 0.978  | 1.204 | 1     | 1     |
| 2         | 526      | 12.973 | 9.362 | 0.995 | 0.988 |
| 3         | 652      |        |       | 0.964 | 0.989 |

**LEGENDA:**

Hs = spessore strato lato sinistro;

Hd = spessore strato lato destro;

Vp = velocità delle onde P.

Vs = velocità delle onde S.

rd = coefficiente correlazione tiro diretto

ri = coefficiente correlazione tiro inverso

## Analisi MASW 7

Frequenza minima .....15 Hz

Frequenza massima .....50 Hz

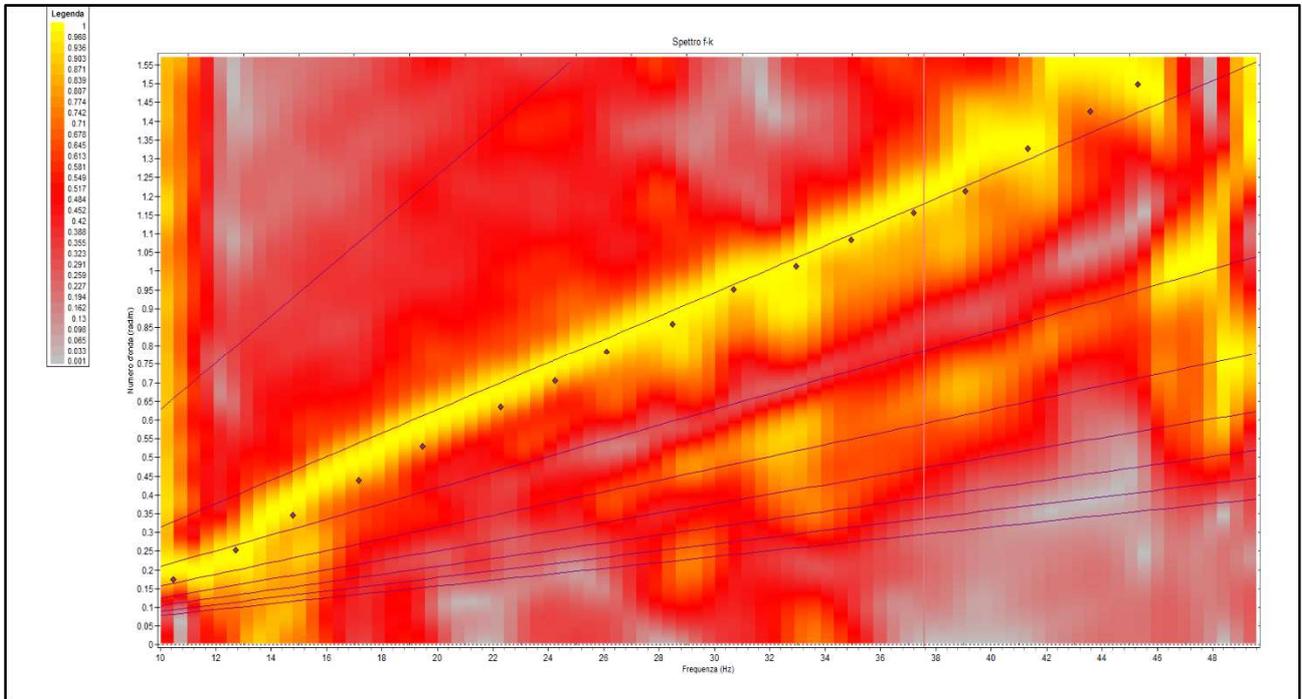


Figura 1.5: Spettro f – k

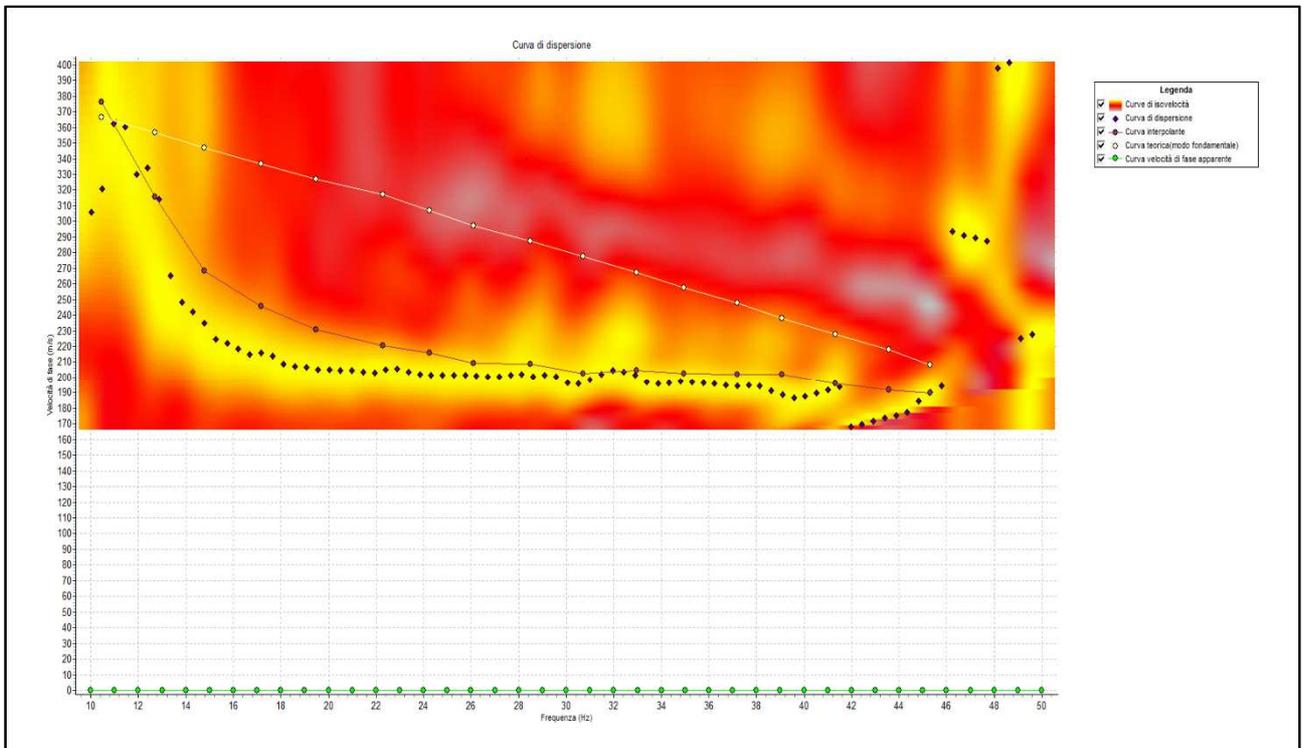


Figura 1.6: Curva di dispersione

L'interpretazione utilizza un algoritmo di inversione che consente di generare una curva di dispersione teorica una volta inserito un modello stratigrafico iniziale del terreno fino alla profondità desiderata e le caratteristiche del semispazio elastico di riferimento.

Procedendo per tentativi, secondo la procedura di Dunkin (1965) modificata da Watson (1970), il programma modifica in automatico il modello iniziale fino a quando lo scarto quadratico medio calcolato fra curva sperimentale e teorica non scende sotto un valore di soglia impostato e modificabile dall'operatore.

Poiché generalmente il metodo empirico genera in automatico un numero elevato di strati, si semplifica il modello iniziale generando mediando i livelli con valori di Vs simili.

|                                            |     |
|--------------------------------------------|-----|
| Numero di strati (escluso semispazio)..... | 4   |
| Spaziatura ricevitori [m].....             | 2 m |
| Numero ricevitori .....                    | 24  |

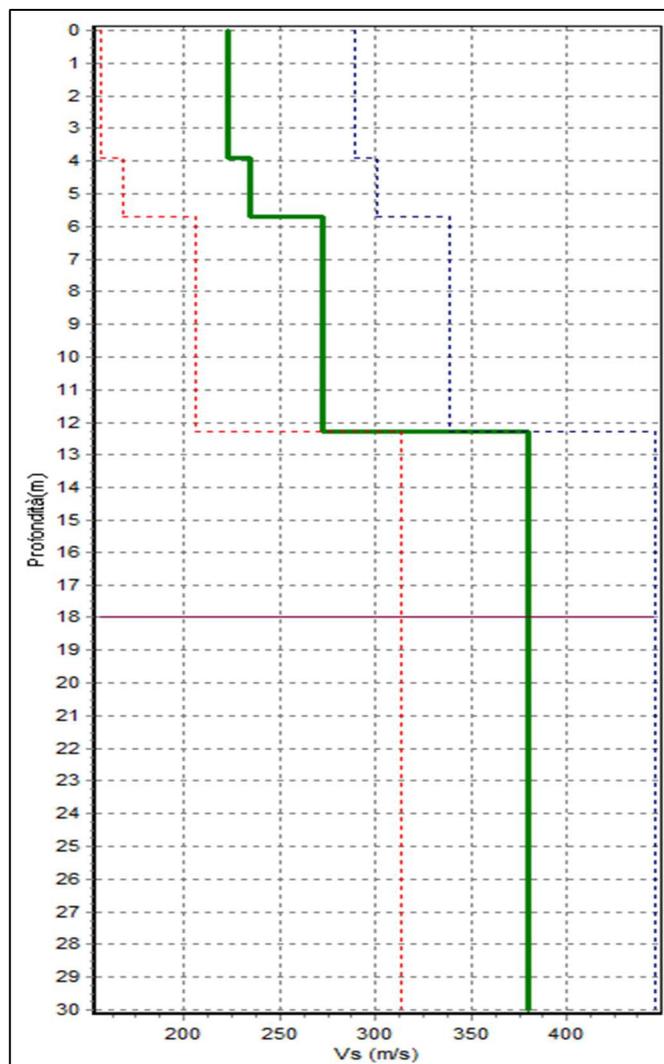


Figura 1.7: Profilo Vs numerico

La sezione stratigrafica risulta attendibile fino a circa 18 m di profondità; oltre tale valore il segnale risulta troppo disturbato anche se si può intuire un aumento dei valori di velocità con la profondità.

## Analisi ReMi 7

Numero di ricevitori ..... 24  
 Distanza tra i sensori: ..... 2 m  
 Numero di ricevitori usati per l'analisi.....24

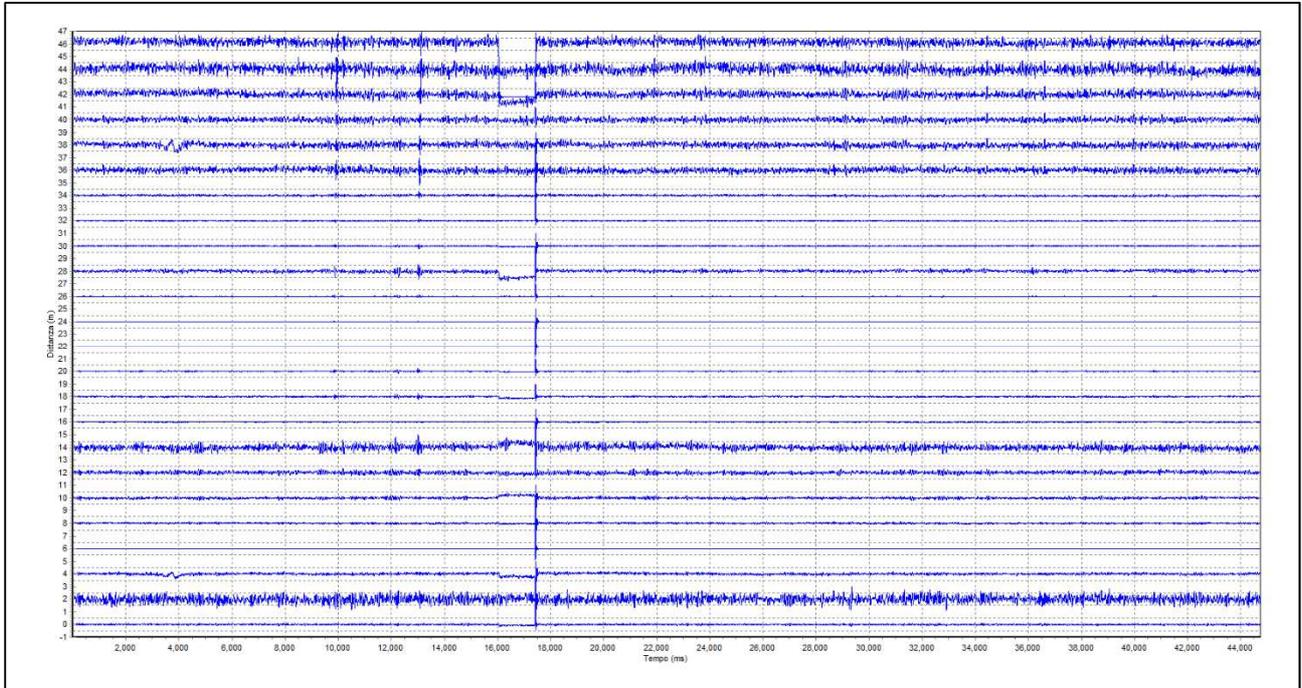


Figura 2.1: Tracce sperimentali

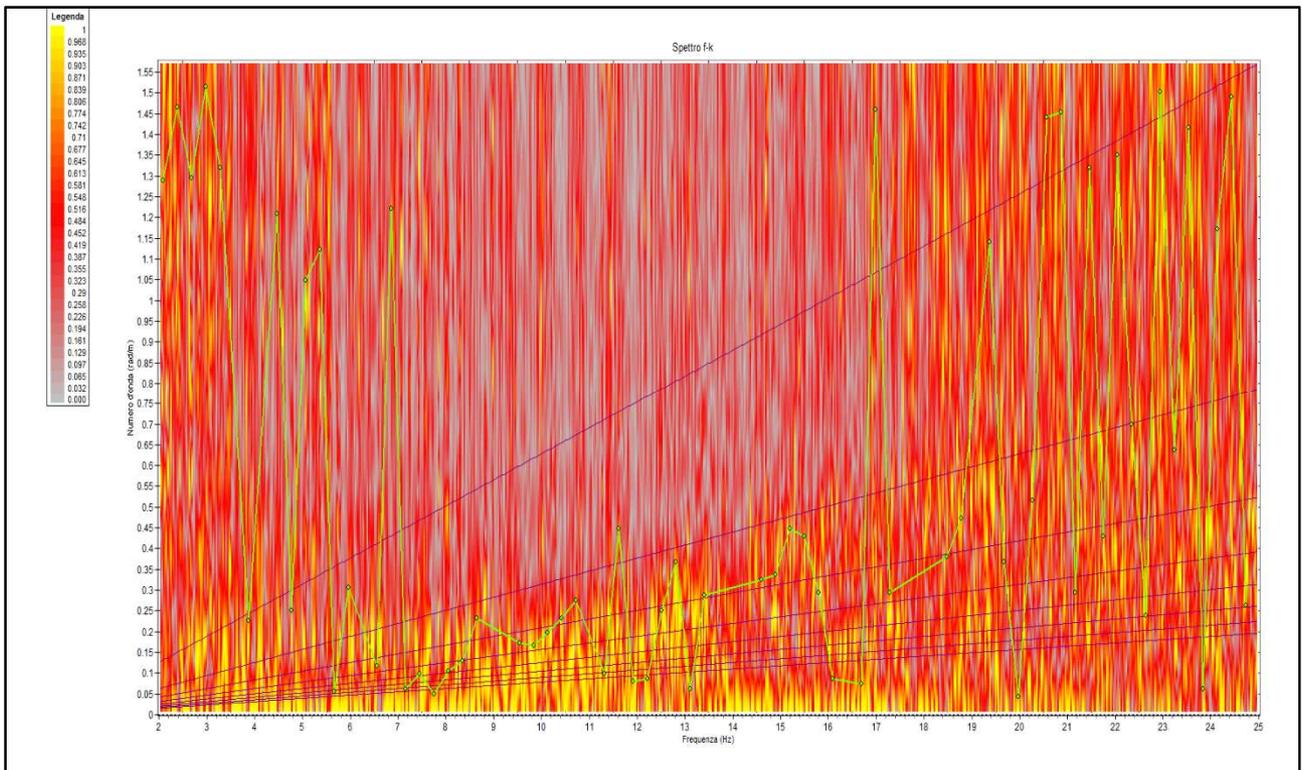


Figura 2.2: Spettro f - k

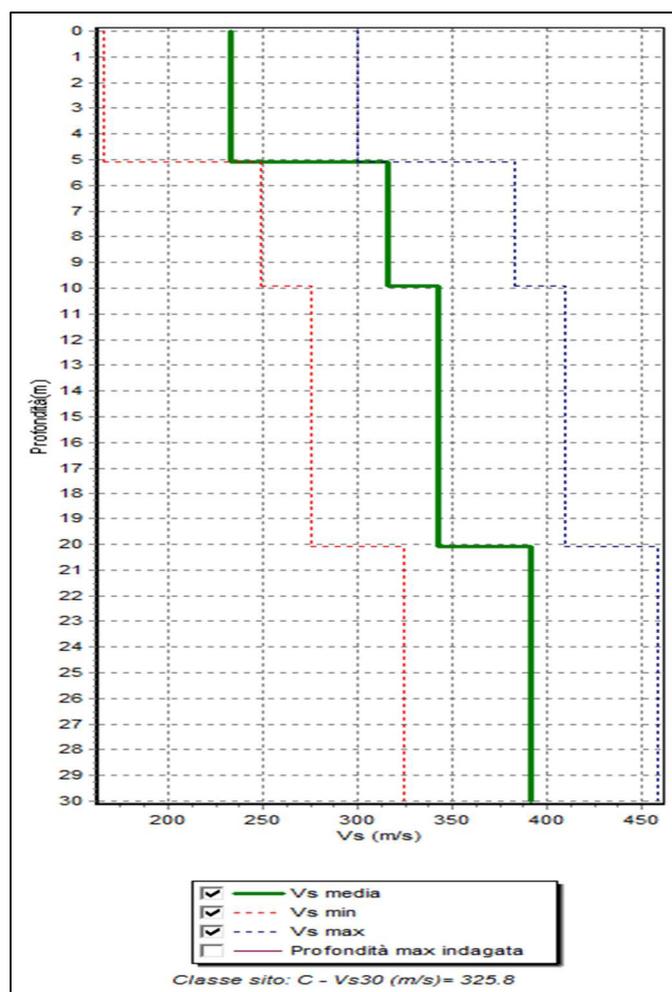


Figura 2.3: Profilo ReMi Vs numerico

## Conclusioni (St<sub>7</sub>)

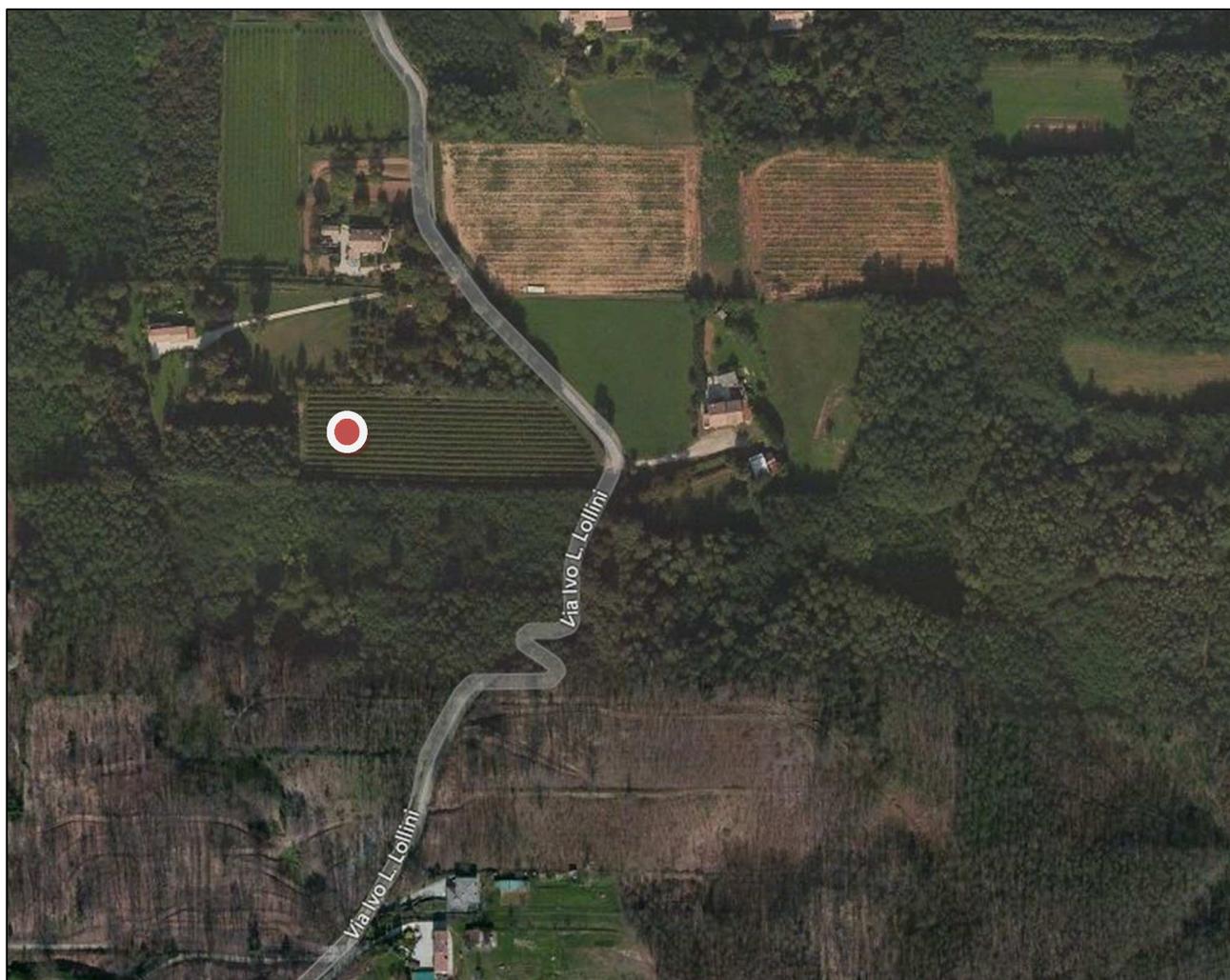
Secondo la misura sperimentale effettuata e la modellazione del sottosuolo elaborata dal trattamento dei dati con i tre metodi appena descritti, per lo stendimento sismico St<sub>1</sub> si individuano materiali sciolti di media consistenza caratterizzati da velocità delle onde sismiche di taglio tipiche di materiali granulari medio fini.

In sintesi viene riportata una stratigrafia sismica di massima del sito indagato:

| Profondità (m) | Vs (m/s) | Considerazioni                                    |
|----------------|----------|---------------------------------------------------|
| 0 – 7 m        | 240      | Limi Argilloso-Sabbiosi                           |
| 7 - 20 m       | 320      | Argille Rosse con blocchi relitti di conglomerato |
| 20 - 30 m      | 390      | Conglomerato del Montello alterato e incarsito    |

## Periodo proprio di risonanza del suolo (HV<sub>7</sub>)

La foto aerea mostra l'ubicazione della indagine denominata HV<sub>7</sub> ( ● ) indicante il punto di acquisizione di rumore sismico ambientale finalizzata alla definizione del periodo proprio del suolo.



Nello studio specifico degli effetti di sito, la frequenza di campionamento utilizzata è di 128 Hz, con tempi di misura dell'ordine di 26 minuti.

Per la misura, oltre allo spettro H/V, è palesata la trasformata delle singole componenti, l'analisi direzionale e temporale del rumore sismico acquisito.

## Analisi HV<sub>7</sub>

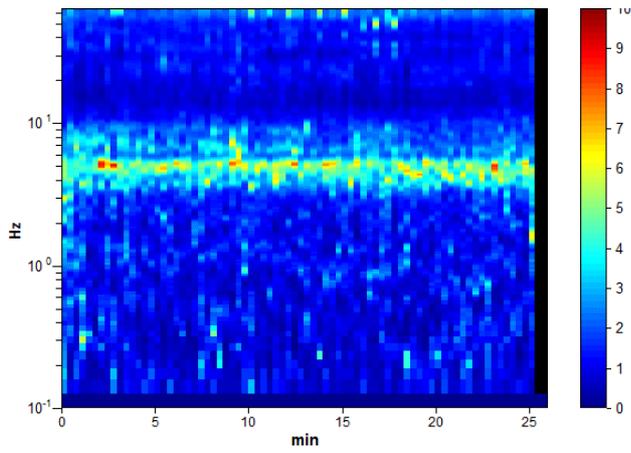


Figura 3.1: analisi temporale del rumore

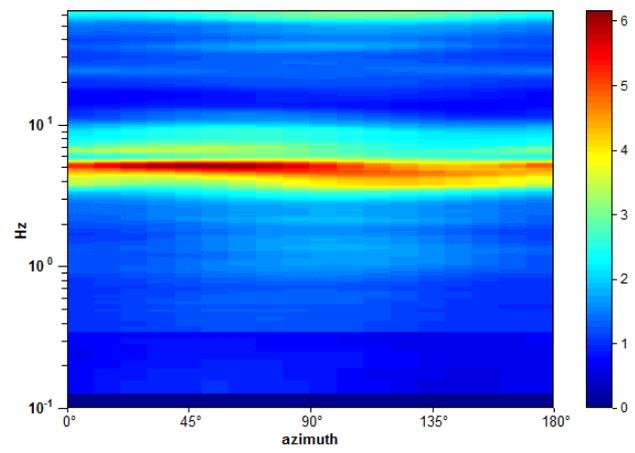


Figura 3.2: analisi direzionale del rumore

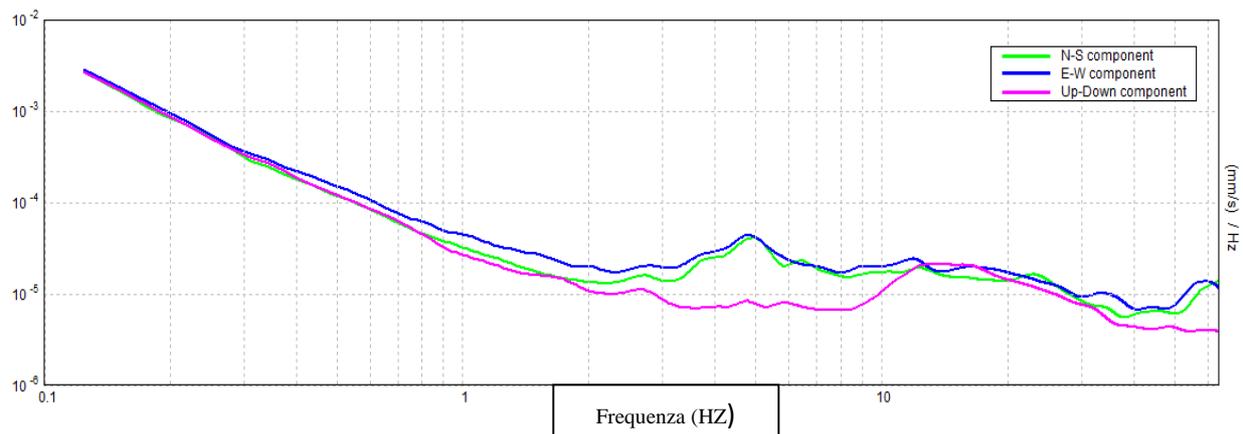


Figura 3.3: spettri delle 3 componenti

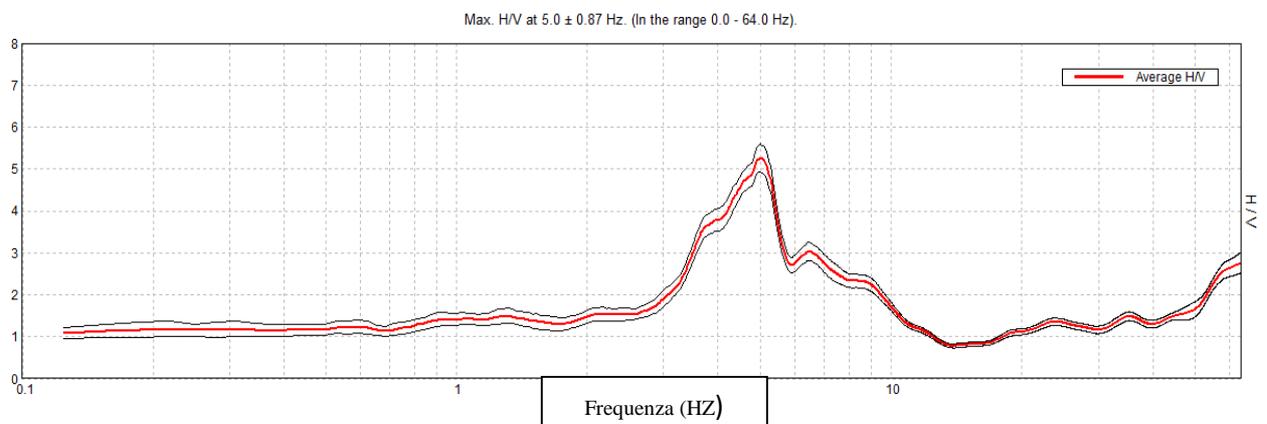


Figura 3.4: rapporto H/V

Una delle misure effettuate (HV) ha subito notevole influenza da rumore antropico. Tutte le tracce escludono la presenza di un netto contrasto di impedenza acustica nel sottosuolo. Non si individuano picchi di risonanza.

In termini di interpretazione del contrasto di impedenza acustica responsabile, eventuali picchi riscontrati, adottando secondo l'ipotesi  $\lambda/4$  una funzione di trasferimento di tipo:

$$F(\omega) = 1/\cos(\omega H/V_s)$$

La frequenza naturale ( $F_n$ ) di vibrazione dello strato di terreno corrisponde ai massimi della funzione di amplificazione:

$$F_n = \omega_n / 2\pi (V_s/4H)$$

con  $H$  profondità del rifrattore e  $V_s$  velocità delle onde sismiche di taglio, si può imporre la risonanza del sistema secondo la seguente relazione con  $T$  periodo proprio del suolo:

$$T = 2\pi/\omega = 4H/V_s$$

La situazione più pericolosa in termini di fenomeni di amplificazione si verifica quando la frequenza dell'eccitazione armonica ( $\omega$ ) è pari ad una delle frequenze fondamentali dello strato ( $\omega_n$ ). Quando si verifica tale condizione ( $\omega = \omega_n$ ) si ha la risonanza dello strato, ed il fattore di amplificazione è teoricamente infinito. E' quindi di fondamentale importanza porre attenzione ai fenomeni di "doppia risonanza", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei fabbricati.

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

$$\text{Freq. Naturale edificio} \approx 10 \text{ Hz} / \text{numero piani}$$

E' la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

$$\text{Freq. naturale edificio} = \text{Freq. fondamentale di risonanza del sito}$$

ad essere particolarmente pericolosa, poiché dà luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.

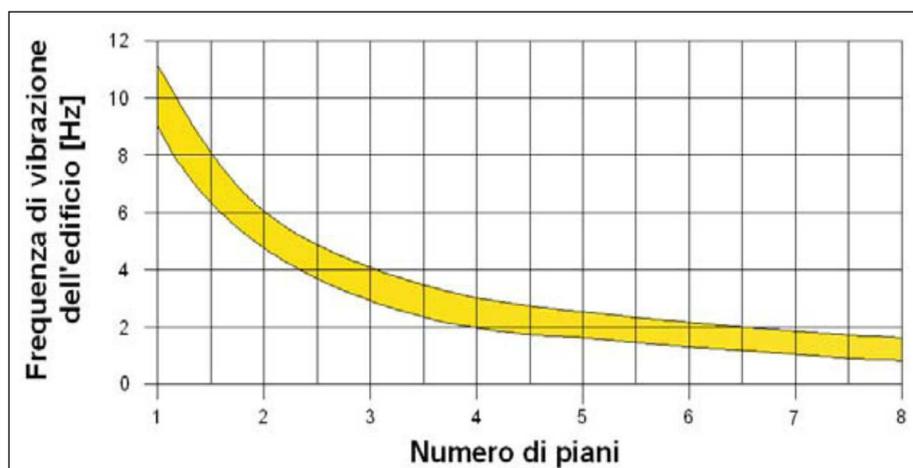


Tabella riassuntiva delle frequenze registrate in un range da 0,0 a 64,0 Hz:

| Sito di indagine | Frequenza max H/V | Considerazioni                                                                     |
|------------------|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| HV               | 5 Hz              | Dato registrato in condizioni di basso rumore antropico (traffico automobilistico) |

## Conclusioni HV<sub>7</sub>

Tutte le misurazioni sono state testate per validarne l'efficacia tramite i parametri suggeriti dal Progetto Europeo SESAME:

| Max. H/V at 5.0 ± 0.87 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).                                                                                |                                                                                                                                     |           |            |            |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|------------|------------|------------|
| <b>Criteria for a reliable H/V curve</b><br>[All 3 should be fulfilled]                                                                |                                                                                                                                     |           |            |            |            |
| $f_0 > 10 / L_w$                                                                                                                       | 5.00 > 0.50                                                                                                                         | OK        |            |            |            |
| $n_c(f_0) > 200$                                                                                                                       | 7800.0 > 200                                                                                                                        | OK        |            |            |            |
| $\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$<br>$\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$ | Exceeded 0 out of 241 times                                                                                                         | OK        |            |            |            |
| <b>Criteria for a clear H/V peak</b><br>[At least 5 out of 6 should be fulfilled]                                                      |                                                                                                                                     |           |            |            |            |
| Exists $f^-$ in $[f_0/4, f_0]   A_{HV}(f^-) < A_0 / 2$                                                                                 | 3.375 Hz                                                                                                                            | OK        |            |            |            |
| Exists $f^+$ in $[f_0, 4f_0]   A_{HV}(f^+) < A_0 / 2$                                                                                  | 7.219 Hz                                                                                                                            | OK        |            |            |            |
| $A_0 > 2$                                                                                                                              | 5.27 > 2                                                                                                                            | OK        |            |            |            |
| $f_{\text{peak}}[A_{HV}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$                                                                             | 0.17349  < 0.05                                                                                                                     |           | NO         |            |            |
| $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$                                                                                                          | 0.86745 < 0.25                                                                                                                      |           | NO         |            |            |
| $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$                                                                                                          | 0.331 < 1.58                                                                                                                        | OK        |            |            |            |
| $L_w$                                                                                                                                  | window length                                                                                                                       |           |            |            |            |
| $n_w$                                                                                                                                  | number of windows used in the analysis                                                                                              |           |            |            |            |
| $n_c = L_w n_w f_0$                                                                                                                    | number of significant cycles                                                                                                        |           |            |            |            |
| $f$                                                                                                                                    | current frequency                                                                                                                   |           |            |            |            |
| $f_0$                                                                                                                                  | H/V peak frequency                                                                                                                  |           |            |            |            |
| $\sigma_f$                                                                                                                             | standard deviation of H/V peak frequency                                                                                            |           |            |            |            |
| $\varepsilon(f_0)$                                                                                                                     | threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$                                                           |           |            |            |            |
| $A_0$                                                                                                                                  | H/V peak amplitude at frequency $f_0$                                                                                               |           |            |            |            |
| $A_{HV}(f)$                                                                                                                            | H/V curve amplitude at frequency $f$                                                                                                |           |            |            |            |
| $f^-$                                                                                                                                  | frequency between $f_0/4$ and $f_0$ for which $A_{HV}(f^-) < A_0/2$                                                                 |           |            |            |            |
| $f^+$                                                                                                                                  | frequency between $f_0$ and $4f_0$ for which $A_{HV}(f^+) < A_0/2$                                                                  |           |            |            |            |
| $\sigma_A(f)$                                                                                                                          | standard deviation of $A_{HV}(f)$ , $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{HV}(f)$ curve should be multiplied or divided |           |            |            |            |
| $\sigma_{\log HV}(f)$                                                                                                                  | standard deviation of $\log A_{HV}(f)$ curve                                                                                        |           |            |            |            |
| $\theta(f_0)$                                                                                                                          | threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$                                                             |           |            |            |            |
| Threshold values for $\sigma_f$ and $\sigma_A(f_0)$                                                                                    |                                                                                                                                     |           |            |            |            |
| <u>Freq. range</u> [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 $f_0$ |
| $\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$                                                                                                      | 3.0                                                                                                                                 | 2.5       | 2.0        | 1.78       | 1.58       |
| $\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log HV}(f_0)$                                                                                         | 0.48                                                                                                                                | 0.40      | 0.30       | 0.25       | 0.20       |

Sulla base di queste considerazioni, il sito in esame presenta un picco massimo di risonanza riscontrabile di 5 Hz; i dati appaiono propri di un graduale e progressivo miglioramento delle condizioni meccaniche del sottosuolo sino a rilevanti profondità.

## Risultati finali

L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) e sismica passiva (ReMI) ha consentito di determinare il profilo verticale della VS (e del modulo di taglio) e, di conseguenza, del parametro Vs30 (considerando come riferimento il piano campagna  $z = 0$  m).

Questi trovano peraltro riscontro nel modello sismostratigrafico ricavato dalla sismica a rifrazione.

In sintesi:

|                                                            | BEDROCK                          |    |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------|----|
|                                                            | NO                               | SI |
| <b>COPERTURA</b>                                           | Sciolta                          |    |
| <b>SPESSORE</b>                                            | 12 m (spessore certo registrato) |    |
| <b>PARAMETRO Vs da MASW</b><br><b>PARAMETRO Vs da ReMi</b> | <b>Vs 30 = 326 m/s</b>           |    |
| <b>CATEGORIA DEL SOTTOSUOLO</b>                            | <b>B</b>                         |    |
| <b>PICCO DI FREQUENZA da H/V</b>                           | <b>5 Hz</b>                      |    |

Rispetto le norme tecniche per le costruzioni (DM 14 gennaio 2008, ex DM 14/09/2005) il sito in esame rientra quindi nella **categoria C**

### **Suolo di tipo C**

Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o di terreni a grana fina mediamente consistenti, con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs30 compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero  $15 < \text{NSPT}_{30} < 50$  nei terreni a grana grossa e  $70 < \text{cu}_{30} < 250$  kPa nei terreni a grana fina).

Naturalmente il vero dato di velocità va considerato in un ragionevole intorno del dato proveniente dalle elaborazioni sperimentali ( $\pm 10\%$ ), per cui i terreni con velocità borderline vengono cautelativamente attribuiti alla categoria inferiore.

**Una elaborazione più spinta dei dati con l'introduzione di filtraggi particolari avrebbe portato a risultati opinabili. Le conclusioni riguardano quindi solo le elaborazioni dei dati ritenuti attendibili.**

Cison di Valmarino, 10/04/2015

il Geologo  
dott. Simone Bortolini

**STUDIO TECNICO DI GEOLOGIA APPLICATA ALL'INGEGNERIA**  
dott. geol. SIMONE BORTOLINI via San Vito, 9/A Cison di Valmarino (TV)  
tel. 338-1977870  
e-mail simonebortolini@libero.it

---

# **Relazione**

## **Sismica a Rifrazione - MASW – ReMi - HVSr**

per la definizione del profilo verticale Vs e parametro Vs30

---

# **CDM\_SMC 8**

## **CROCETTA DEL MONTELLO (TV)**

### **Via Giovanni Fantin**

Coordinate WGS84

Lat. N 45,815531 Long. E 12,043071

Coordinate ED50

Lat. N 45,816431 Long. E 12,044071

---



il Geologo

dott. Simone Bortolini

# Introduzione

Al fine di caratterizzare la risposta sismica del sito in esame è stata effettuata una serie di acquisizioni MASW (Multi-channel Analysis of Surface Waves, analisi della dispersione delle onde di Rayleigh da misure di sismica attiva – e.g. Park et al., 1999) e ReMi (Refraction Microtremor -Louie, 2001) utili a definire il profilo verticale della  $V_s$  (velocità di propagazione delle onde di taglio) oltre alla tradizionale sismica a rifrazione.

## 1. Interpretazione di stendimenti di sismica a rifrazione

Questo metodo, di semplice applicazione, è utilizzabile nel caso di strati orizzontali o con inclinazione uniforme e in presenza di una superficie topografica, almeno lungo lo stendimento, orizzontale. Si parte inoltre dal presupposto che la velocità dei rifrattori aumenti con la profondità. In pratica si dovrà verificare che la velocità delle onde P nel primo strato sia minore della velocità delle onde P nel secondo, a sua volta inferiore a quella del terzo, ecc. ( $V_1 < V_2 < V_3$ ).

## 2. Tecnica di misurazione e interpretazione MASW

La tecnica MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves - Park et al., 1999) è un metodo d'indagine geofisica, sviluppato e diffuso negli ultimi dieci anni circa, che sfrutta le modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare delle onde di Rayleigh, generate da sorgenti artificiali (mazza battente o scoppio). Le onde di Rayleigh si muovono lungo l'interfaccia terra-aria e sono generate dalla rifrazione e riflessione multipla di onde di compressione (P) e onde di taglio che si propagano in direzione verticale (SV).

## 3. Tecnica di misurazione e interpretazione ReMi

La tecnica ReMi (Refraction Microtremor) è un metodo d'indagine geofisica che sfrutta invece le modalità di propagazione delle onde di superficie, in particolare delle onde di Rayleigh, generate però da sorgenti ambientali.

A differenza di quanto avviene nell'indagine eseguita con la tecnica MASW, dove la posizione delle sorgenti è nota ed è allineata allo stendimento, nel caso del ReMi i punti di origine dei microtremori sono spesso non identificabili. Quindi la registrazione viene protratta per tempi più lunghi. Essendo la potenza associata al segnale utile comparabile con quella del rumore di fondo è necessario rilevare un numero di tremori molto elevato, questo sarà ottenibile semplicemente andando a allungare i tempi di registrazione del segnale. A differenza dei pochi secondi necessari per acquisizioni MASW sono qui necessari da alcuni a molti minuti di acquisizione (in genere 10 - 20 minuti sono sufficienti).

I principi teorici e gli aspetti di acquisizione ed elaborazione dei dati sono sostanzialmente gli stessi della tecnica MASW con la differenza che con ReMi si ha una maggior definizione degli strati profondi.

## 4. Tecnica di misure ed interpretazione HVSR (tramite TROMINO)

Tale prospezione sismica si basa sull'acquisizione e sull'analisi del Rumore Sismico Ambientale (Seismic Noise) ovvero la continua vibrazione del suolo dovuta sia a cause antropiche che naturali. Questa tipologia di tecniche (definite metodi sismici passivi), dunque, non ha bisogno

di alcuna energizzazione esterna poiché utilizza come sorgente il traffico veicolare, la produzione industriale, il vento, la pioggia e tutto ciò che è in grado di produrre una minima vibrazione sulla superficie del suolo.

In particolar modo con la tecnica a “ Stazione Singola” viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero “Horizontal to Vertical Spectral Ratios) (Nakamura, Y. [1989]). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno e individuare la frequenza fondamentale ( $f$ ) di questa vibrazione. Sapendo che in generale esiste una relazione semplice fra  $f$ , lo spessore della parte più soffice del terreno (ovvero la parte di materiali sovrastante il bed-rock) e la velocità media ( $V_s$ ) delle onde sismiche nel sottosuolo, attraverso le misure HVSR è possibile risalire allo spessore di questo strato. Si possono inoltre effettuare delle considerazioni di tipo “qualitativo” molto utili in merito a possibili interferenze tra le frequenze risonanti del suolo e degli edifici sovrastanti.

Per la valutazione del periodo proprio di risonanza del sottosuolo è stata utilizzata la tecnica a stazione singola Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Kanai, 1957; Igarashi 1970; Nakamura 1989) che permette di estrarre informazioni relative alla frequenza di vibrazione del suolo a partire dagli spettri di rumore sismico registrati in sito. La tecnica prevede di calcolare il rapporto, in funzione della frequenza, tra gli spettri di risposta della componente orizzontale e verticale del moto dovuto ai microtremori ambientali. La misura di rumore sismico della durata di 26 minuti per ogni punto di misura è stata eseguita con una frequenza di campionamento a 128 Hz.

## 5. Strumentazione impiegata

### Hardware

L'acquisizione dati per l'elaborazione MASW, ReMI e sismica a rifrazione è avvenuta tramite sismografo a 24 canali (mod. Dolang Geophysical DBS280 24 bit 24 canali) collegato a geofoni verticali a frequenza propria di 4.5Hz.

È stato utilizzato un tromografo digitale modello “Tromino” (Micromed srl) avente un intervallo di acquisizione sulle frequenze da 0.1 a 256 Hz, dotato di sistema di acquisizione digitale ad alta risoluzione (24 bit) e primo-processing interno. La livellazione micrometrica dello strumento è stata assicurata per ogni misura tramite bolla di precisione agendo sui tre punti di appoggio (punte) ed orientando uno dei 3 sensori di acquisizione (ortogonali tra loro) verso il N magnetico.

### Software

Per le analisi dei dati acquisiti si sono adottati i software GeoMASW , GeoReMi, SismaCon di ProgramGeo (Brescia) e il software Grilla.

## Sito Stendimento Sismico St<sub>8</sub>

L'immagine a seguire mostra l'ubicazione dell'indagine denominata 'St<sub>8</sub>' ( ..... ) per lo stendimento sismico effettuato ai fini della classificazione sismica del suolo.



Lo stendimento sismico geofonico lineare multicanale con geofoni verticali (4.5 Hz) è stato posizionato e utilizzato per le prospezioni sismiche tipo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves), ReMI (Refraction Microtremor) e Sismica a Rifrazione, analizzano le onde di superficie.

## Dati sperimentali (St<sub>s</sub>)

|                                               |        |
|-----------------------------------------------|--------|
| Numero di ricevitori .....                    | 24     |
| Distanza tra i sensori: .....                 | 2 m    |
| Numero di campioni temporali.....             | 2048   |
| Passo temporale di acquisizione.....          | 0.6 ms |
| Numero di ricevitori usati per l'analisi..... | ...24  |

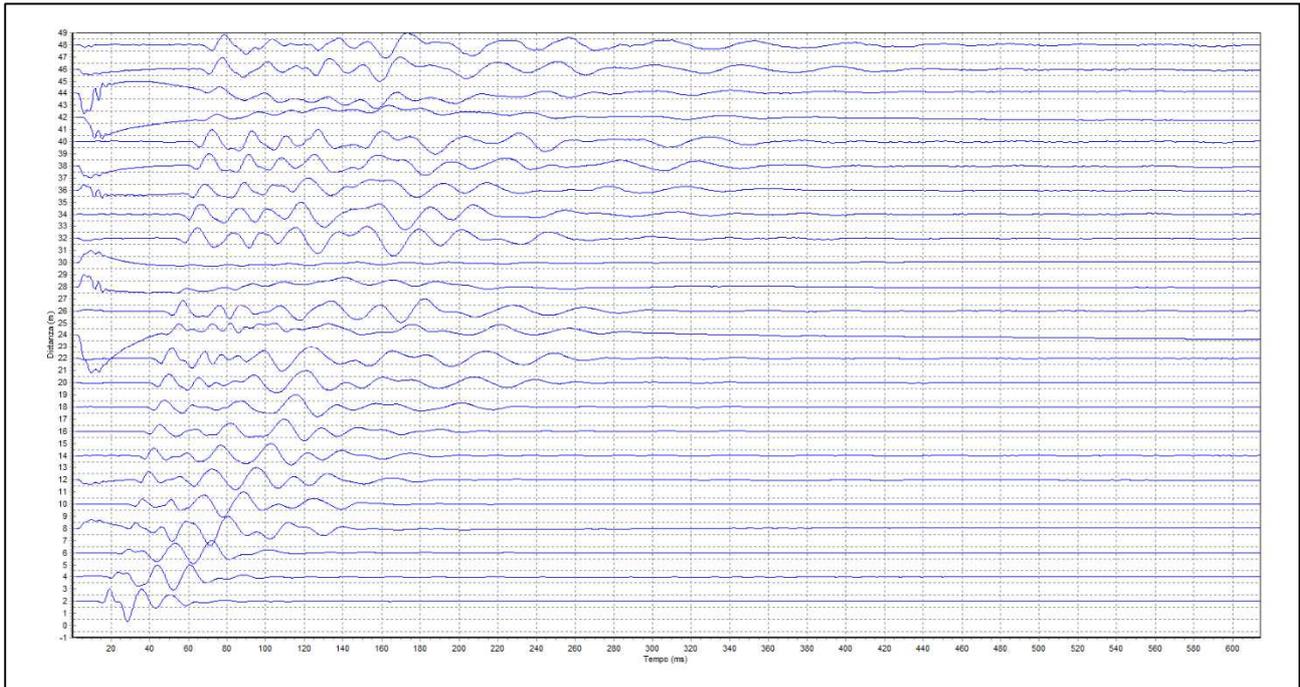


Figura 1.1: Tracce sperimentali tiro diretto

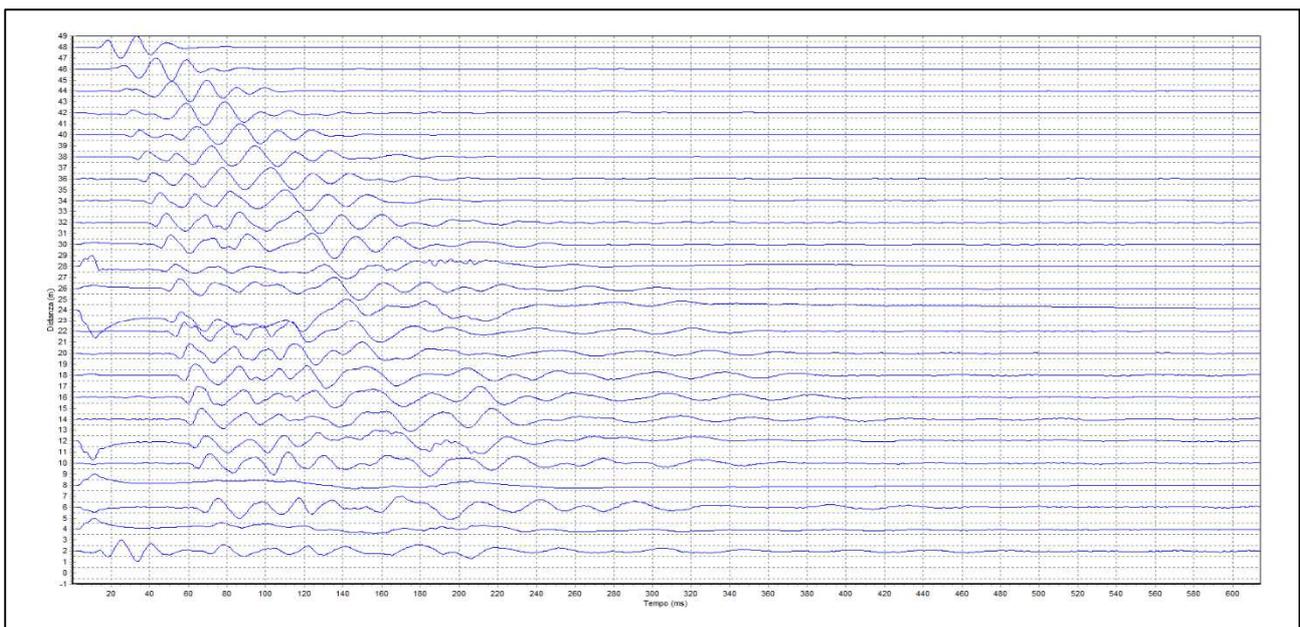


Figura 1.2: Tracce sperimentali tiro coniugato

## Sismica a rifrazione 8

L'interpretazione è stata effettuata sulla base di due sorgenti (mazza su piattello di battuta) poste rispettivamente 2 metri prima del primo geofono e 2 m oltre l'ultimo geofono.

Il metodo utilizzato è il Metodo convenzionale (metodo del tempo di ritardo - delay time); tale metodo è utilizzabile nel caso di strati orizzontali o con inclinazione uniforme e in presenza di una superficie topografica, almeno lungo lo stendimento, orizzontale. Si parte inoltre dal presupposto che la velocità dei rifrattori aumenti con la profondità. In pratica si dovrà verificare che la velocità delle onde P nel primo strato sia minore della velocità delle onde P nel secondo, a sua volta inferiore a quella del terzo, ecc. ( $V_1 < V_2 < V_3$ ), così come nel caso in esame.

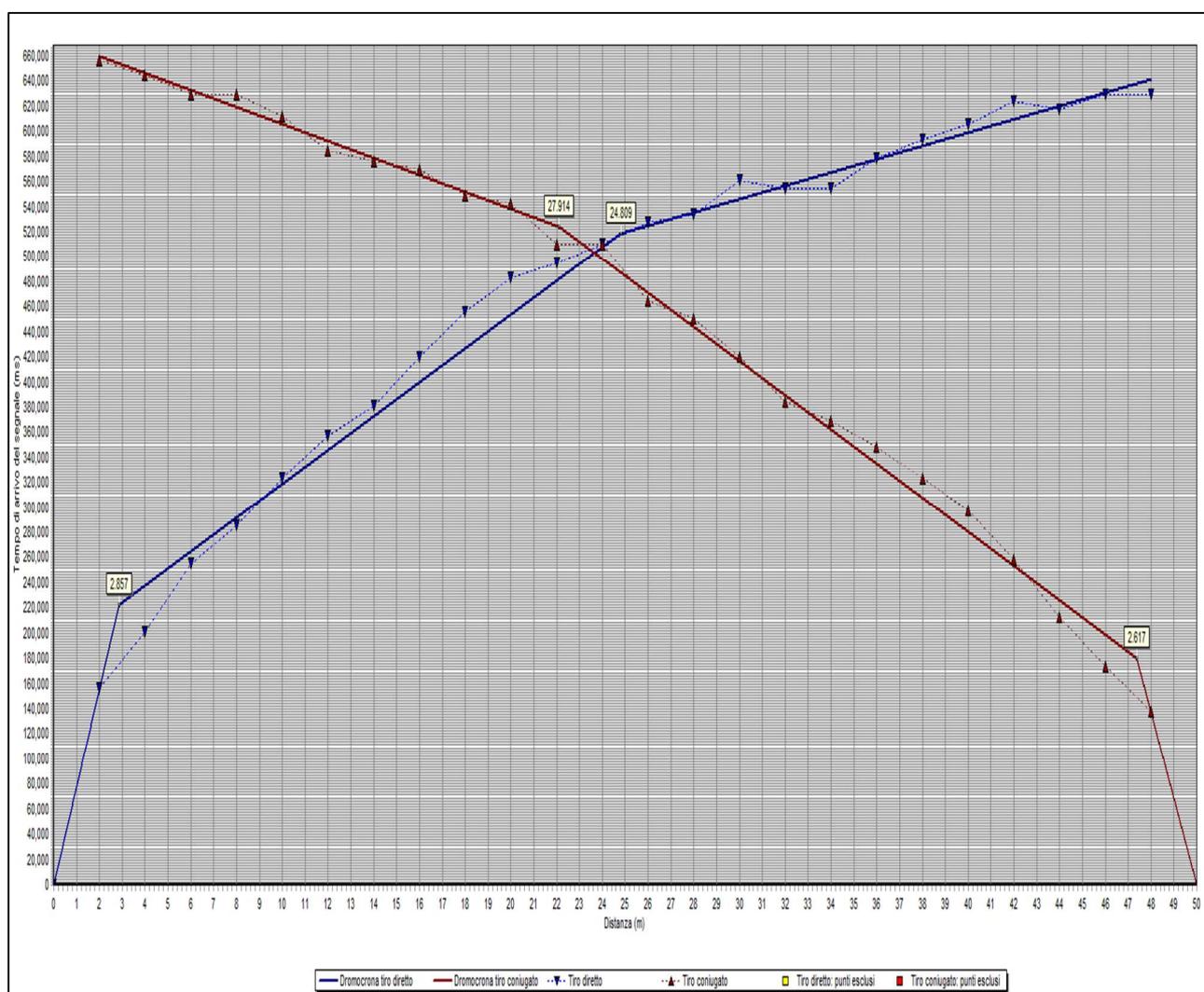


Figura 1.3: grafico generale curva distanza-tempo

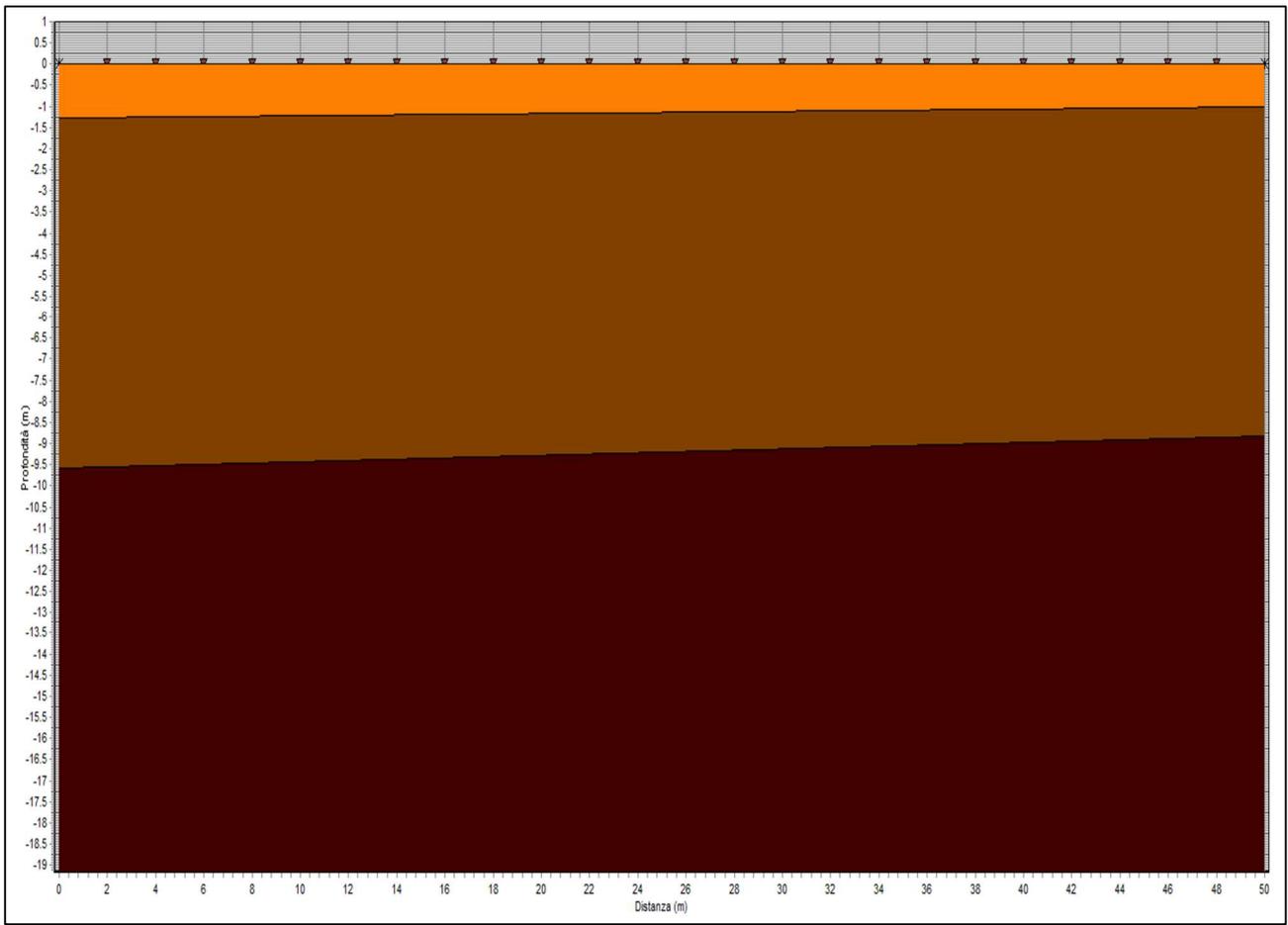


Figura 1.4: Sezione stratigrafica interpretata

La sezione stratigrafica è stata interpretata sulla base dei valori delle velocità delle onde P considerando il profilo topografico orizzontale e gli strati inclinati in maniera pseudo-uniforme.

| Strato n. | Vp (m/s) | Hs(m) | Hd(m) | rd    | ri    |
|-----------|----------|-------|-------|-------|-------|
| 1         | 356      | 1.281 | 1.007 | 1     | 1     |
| 2         | 523      | 9.586 | 8.813 | 0.983 | 0.994 |
| 3         | 798      |       |       | 0.959 | 0.988 |

**LEGENDA:**

Hs = spessore strato lato sinistro;

Hd = spessore strato lato destro;

Vp = velocità delle onde P.

Vs = velocità delle onde S.

rd = coefficiente correlazione tiro diretto

ri = coefficiente correlazione tiro inverso

## Analisi MASW 8

Frequenza minima .....15 Hz

Frequenza massima .....50 Hz

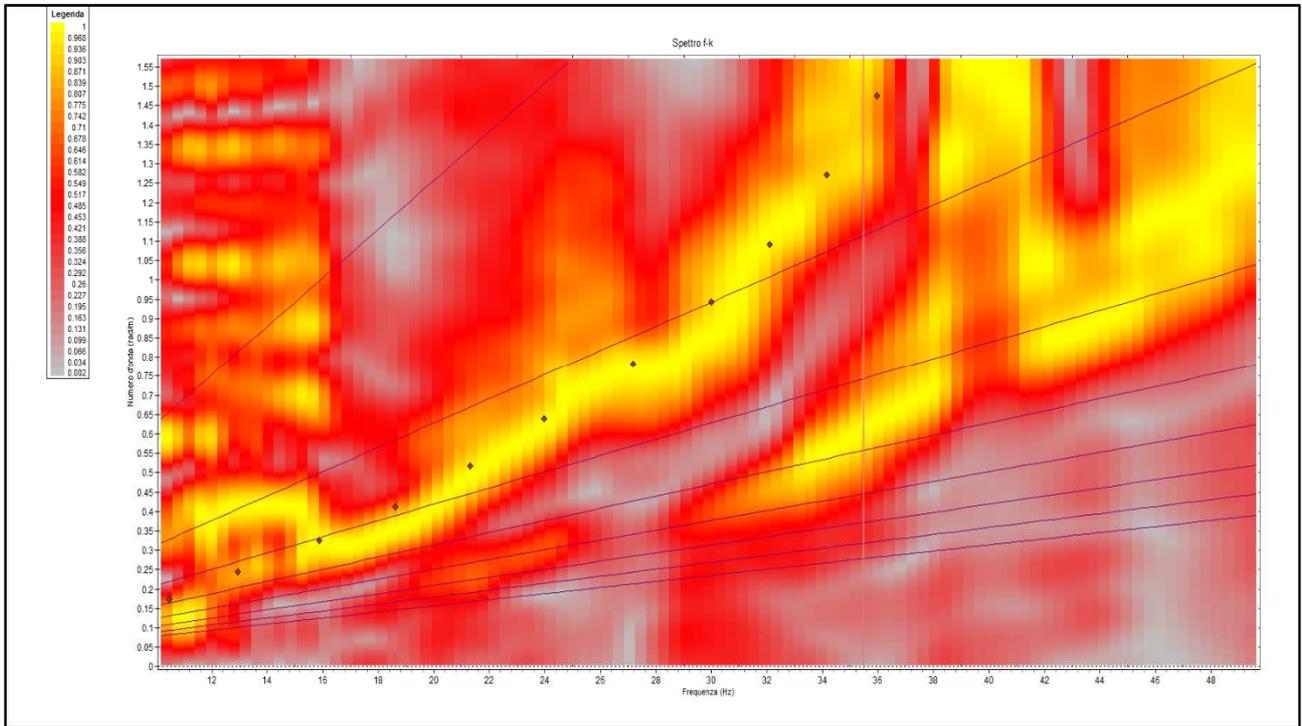


Figura 1.5: Spettro f – k

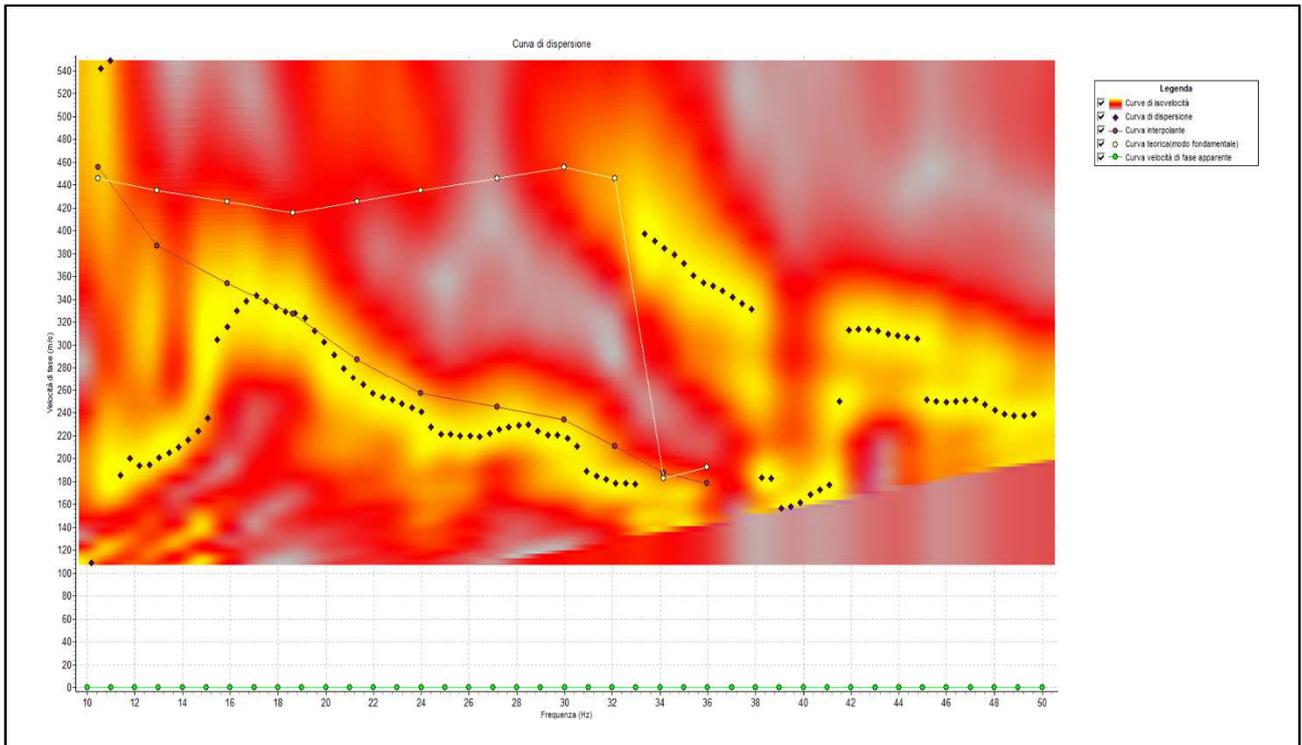


Figura 1.6: Curva di dispersione

L'interpretazione utilizza un algoritmo di inversione che consente di generare una curva di dispersione teorica una volta inserito un modello stratigrafico iniziale del terreno fino alla profondità desiderata e le caratteristiche del semispazio elastico di riferimento.

Procedendo per tentativi, secondo la procedura di Dunkin (1965) modificata da Watson (1970), il programma modifica in automatico il modello iniziale fino a quando lo scarto quadratico medio calcolato fra curva sperimentale e teorica non scende sotto un valore di soglia impostato e modificabile dall'operatore.

Poiché generalmente il metodo empirico genera in automatico un numero elevato di strati, si semplifica il modello iniziale generato mediando i livelli con valori di Vs simili.

|                                            |     |
|--------------------------------------------|-----|
| Numero di strati (escluso semispazio)..... | 4   |
| Spaziatura ricevitori [m].....             | 2 m |
| Numero ricevitori .....                    | 24  |

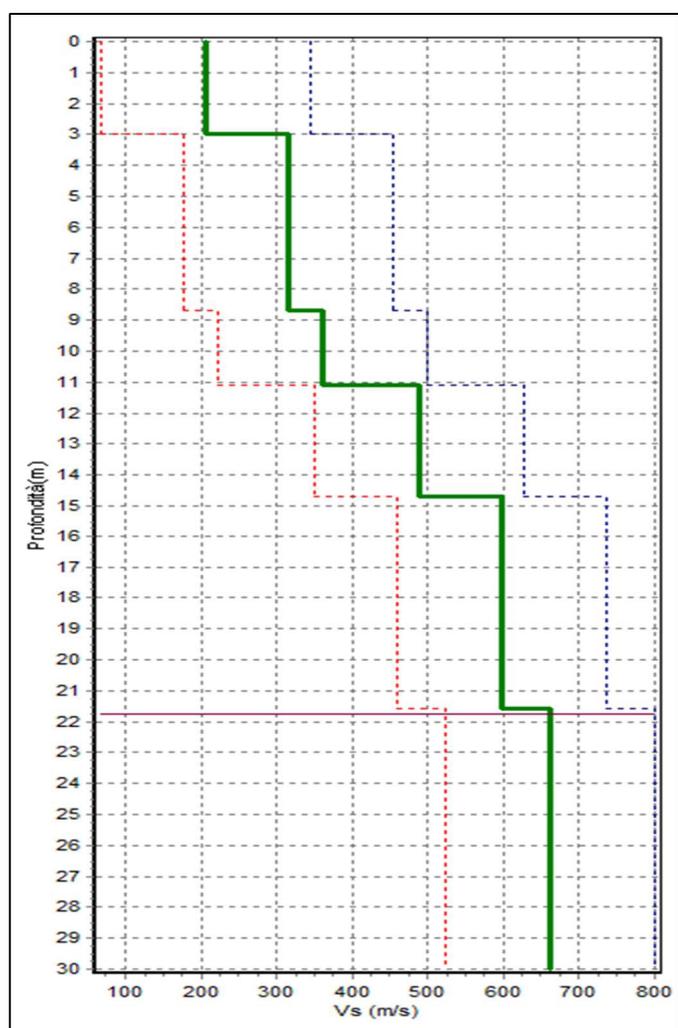


Figura 1.7: Profilo Vs numerico

La sezione stratigrafica risulta attendibile fino a circa 22 m di profondità; oltre tale valore il segnale risulta troppo disturbato anche se si può intuire un aumento dei valori di velocità con la profondità.

## Analisi ReMi 8

|                                               |     |
|-----------------------------------------------|-----|
| Numero di ricevitori .....                    | 24  |
| Distanza tra i sensori: .....                 | 2 m |
| Numero di ricevitori usati per l'analisi..... | 24  |

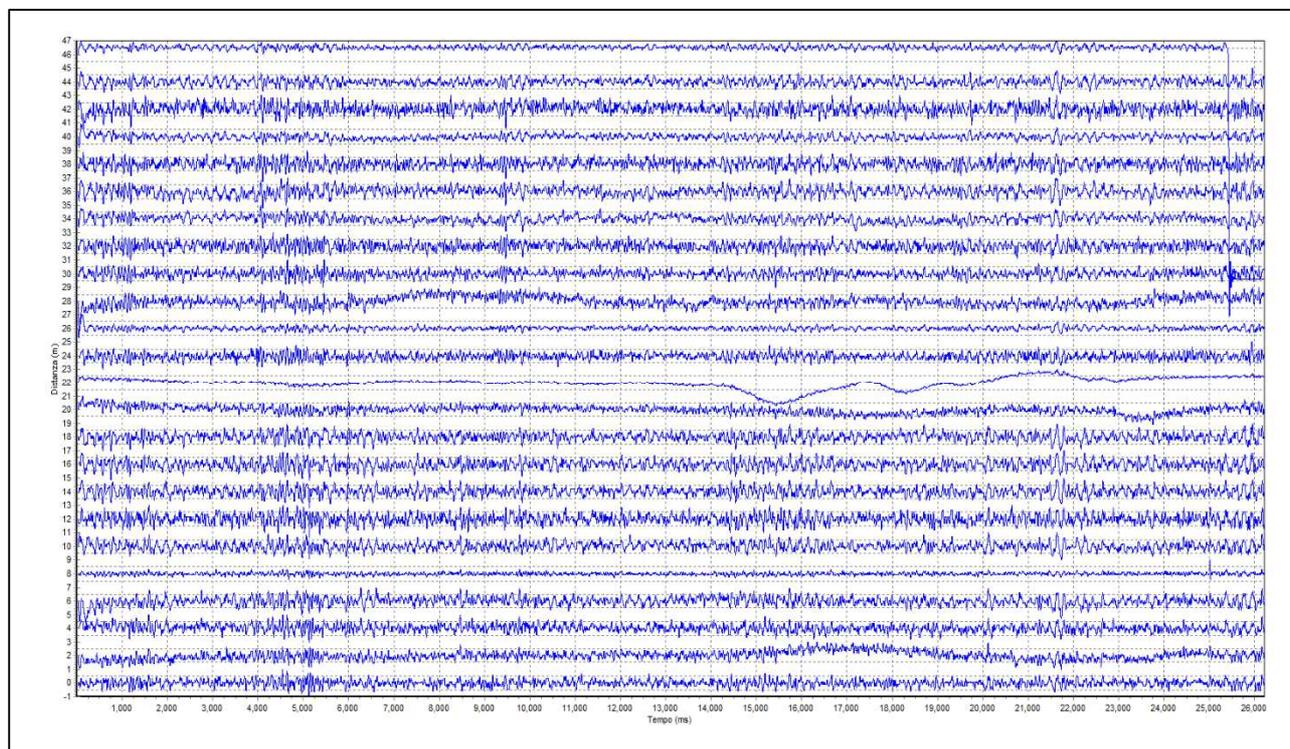


Figura 2.1: Tracce sperimentali

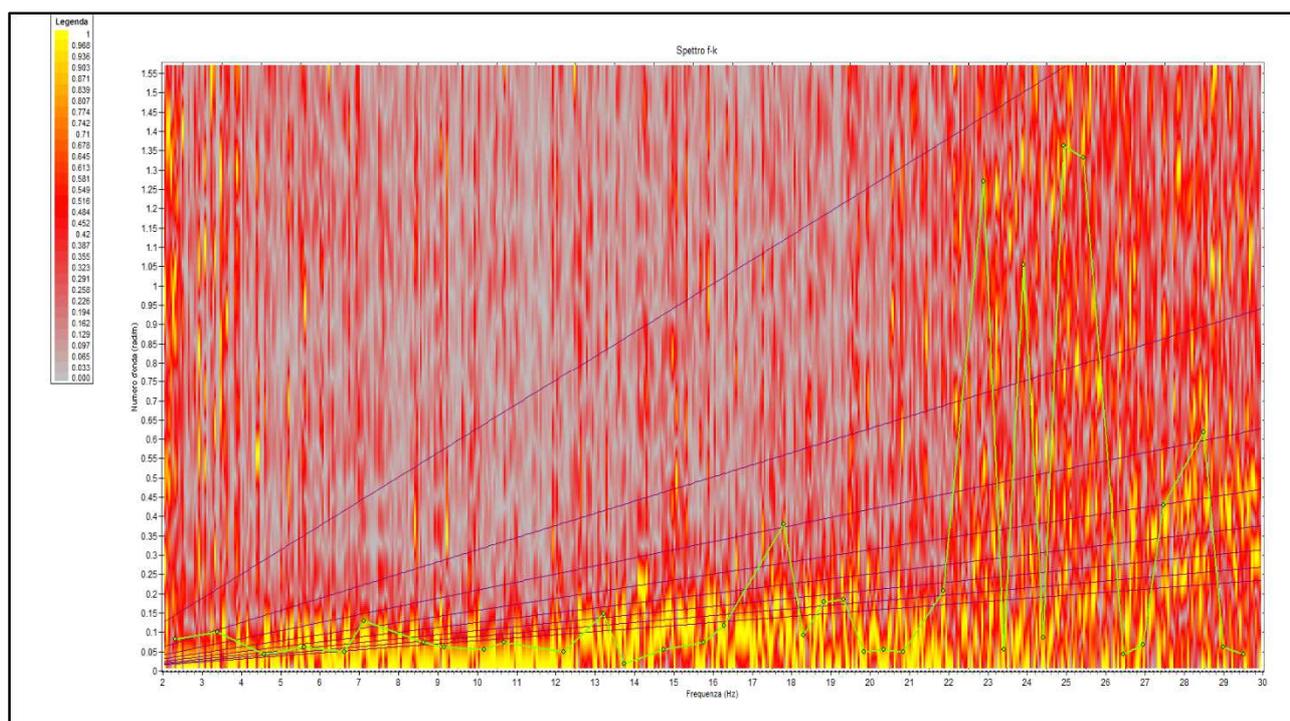


Figura 2.2: Spettro f - k

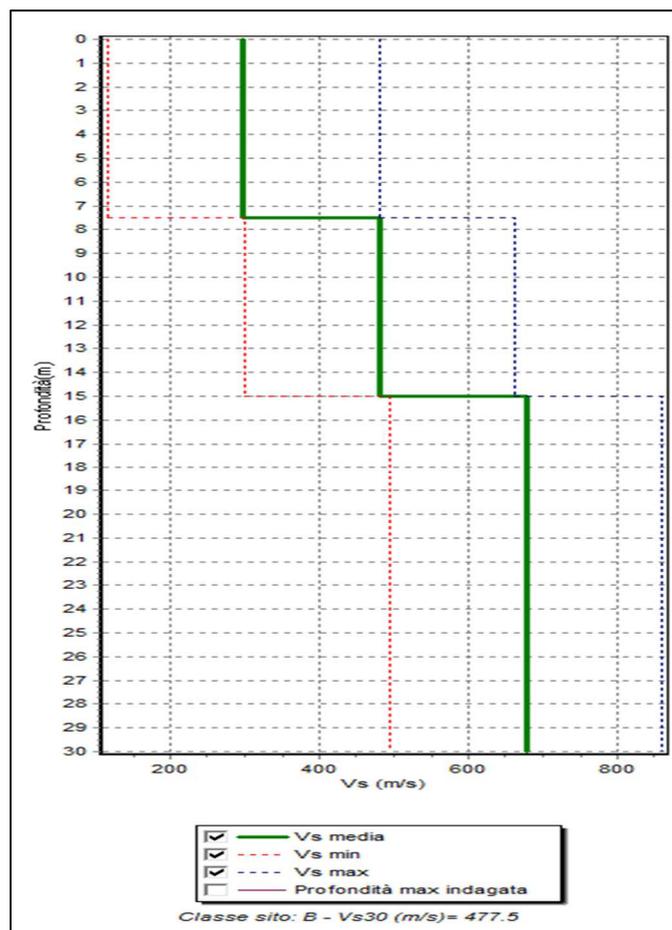


Figura 2.3: Profilo ReMi Vs numerico

## Conclusioni (St<sub>8</sub>)

Secondo la misura sperimentale effettuata e la modellazione del sottosuolo elaborata dal trattamento dei dati con i tre metodi appena descritti, per lo stendimento sismico St<sub>1</sub> si individuano materiali sciolti di media consistenza caratterizzati da velocità delle onde sismiche di taglio tipiche di materiali granulari medio fini.

In sintesi viene riportata una stratigrafia sismica di massima del sito indagato:

| Profondità (m) | Vs (m/s) | Considerazioni                    |
|----------------|----------|-----------------------------------|
| 0 – 7 m        | 300      | Ghiaie frammiste a Limi Argillosi |
| 7 - 15 m       | 480      | Ghiaie                            |
| 15 - 30 m      | 670      | Ghiaie compatte                   |

## Periodo proprio di risonanza del suolo ( $HV_8$ )

La foto aerea mostra l'ubicazione della indagine denominata  $HV_8$  (  ) indicante il punto di acquisizione di rumore sismico ambientale finalizzata alla definizione del periodo proprio del suolo.



Nello studio specifico degli effetti di sito, la frequenza di campionamento utilizzata è di 128 Hz, con tempi di misura dell'ordine di 26 minuti.

Per la misura, oltre allo spettro H/V, è palesata la trasformata delle singole componenti, l'analisi direzionale e temporale del rumore sismico acquisito.

## Analisi HV<sub>8</sub>

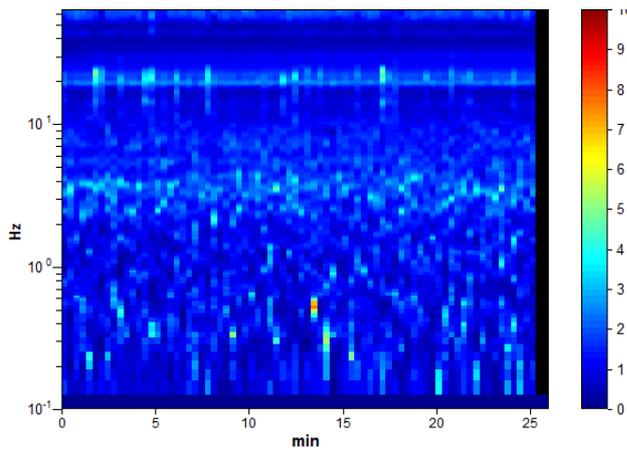


Figura 3.1: analisi temporale del rumore

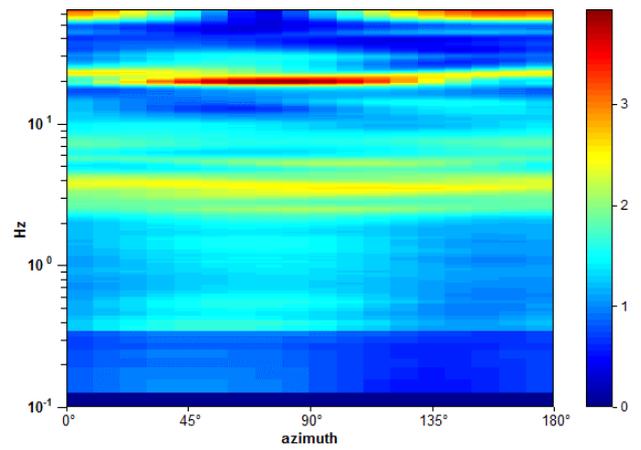


Figura 3.2: analisi direzionale del rumore

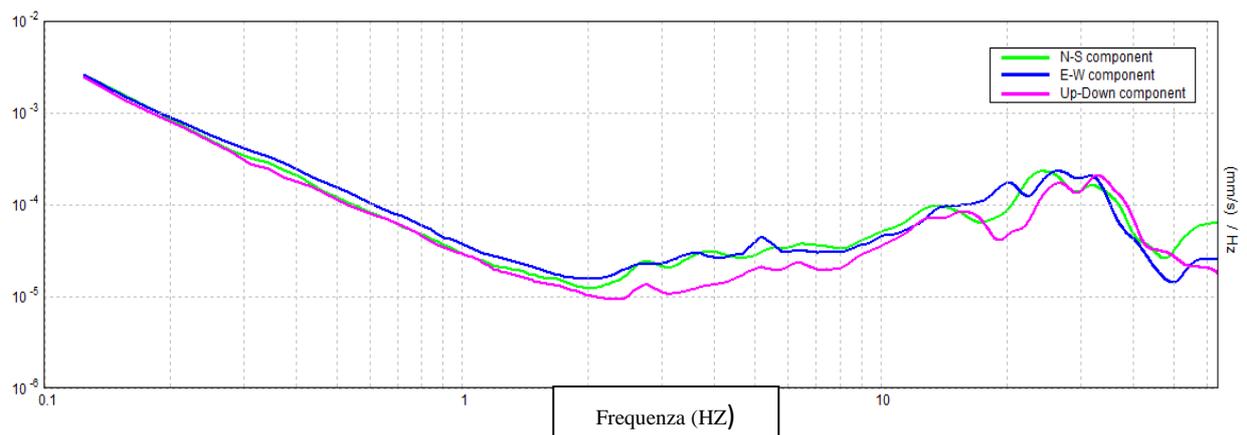


Figura 3.3: spettri delle 3 componenti

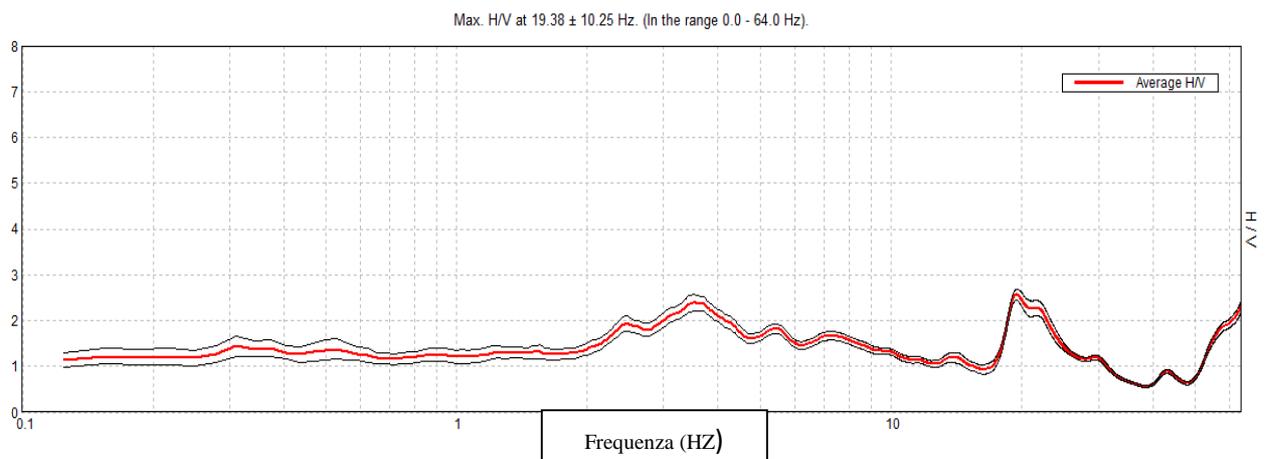


Figura 3.4: rapporto H/V

Una delle misure effettuate (HV) ha subito notevole influenza da rumore antropico. Tutte le tracce escludono la presenza di un netto contrasto di impedenza acustica nel sottosuolo. Non si individuano picchi di risonanza.

In termini di interpretazione del contrasto di impedenza acustica responsabile, eventuali picchi riscontrati, adottando secondo l'ipotesi  $\lambda/4$  una funzione di trasferimento di tipo:

$$F(\omega) = 1/\cos(\omega H/V_s)$$

La frequenza naturale ( $F_n$ ) di vibrazione dello strato di terreno corrisponde ai massimi della funzione di amplificazione:

$$F_n = \omega_n / 2\pi (V_s/4H)$$

con H profondità del rifrattore e  $V_s$  velocità delle onde sismiche di taglio, si può imporre la risonanza del sistema secondo la seguente relazione con T periodo proprio del suolo:

$$T = 2\pi/\omega = 4H/V_s$$

La situazione più pericolosa in termini di fenomeni di amplificazione si verifica quando la frequenza dell'eccitazione armonica ( $\omega$ ) è pari ad una delle frequenze fondamentali dello strato ( $\omega_n$ ). Quando si verifica tale condizione ( $\omega = \omega_n$ ) si ha la risonanza dello strato, ed il fattore di amplificazione è teoricamente infinito. E' quindi di fondamentale importanza porre attenzione ai fenomeni di "doppia risonanza", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei fabbricati.

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

$$\text{Freq. Naturale edificio} \approx 10 \text{ Hz} / \text{numero piani}$$

E' la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

$$\text{Freq. naturale edificio} = \text{Freq. fondamentale di risonanza del sito}$$

ad essere particolarmente pericolosa, poiché dà luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.

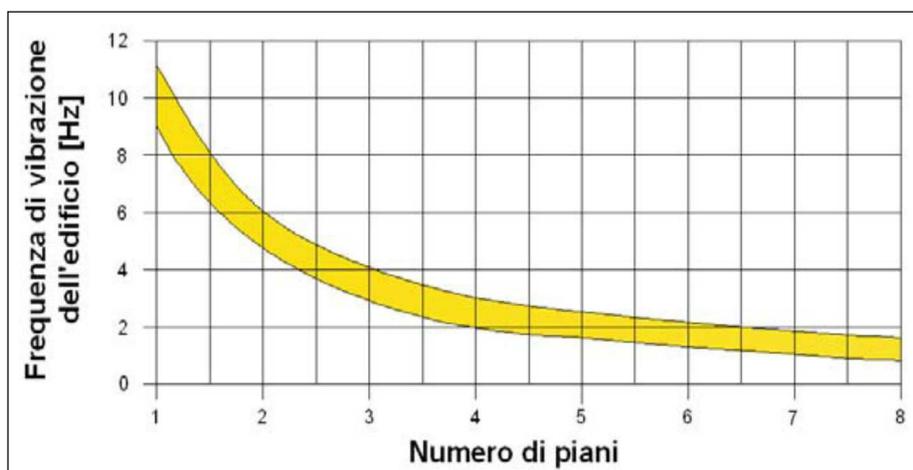


Tabella riassuntiva delle frequenze registrate in un range da 0,0 a 64,0 Hz:

| Sito di indagine | Frequenza max H/V | Considerazioni                                                                     |
|------------------|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| HV               | 3,5 Hz; 19,38 Hz  | Dato registrato in condizioni di basso rumore antropico (traffico automobilistico) |

## Conclusioni HV<sub>8</sub>

Tutte le misurazioni sono state testate per validarne l'efficacia tramite i parametri suggeriti dal Progetto Europeo SESAME:

**Max. H/V at 19.38 ± 10.25 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).**

| Criteria for a reliable H/V curve<br>[All 3 should be fulfilled]                                                                       |                             |    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----|----|
| $f_0 > 10 / L_w$                                                                                                                       | 19.38 > 0.50                | OK |    |
| $\Omega_c(f_0) > 200$                                                                                                                  | 30225.0 > 200               | OK |    |
| $\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$<br>$\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$ | Exceeded 0 out of 931 times | OK |    |
| Criteria for a clear H/V peak<br>[At least 5 out of 6 should be fulfilled]                                                             |                             |    |    |
| Exists $f^-$ in $[f_0/4, f_0]$   $A_{HV}(f^-) < A_0 / 2$                                                                               | 17.781 Hz                   | OK |    |
| Exists $f^+$ in $[f_0, 4f_0]$   $A_{HV}(f^+) < A_0 / 2$                                                                                | 25.969 Hz                   | OK |    |
| $A_0 > 2$                                                                                                                              | 2.57 > 2                    | OK |    |
| $f_{\text{peak}}[A_{HV}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$                                                                             | $ 0.52879  < 0.05$          |    | NO |
| $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$                                                                                                          | $10.24525 < 0.96875$        |    | NO |
| $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$                                                                                                          | $0.12 < 1.58$               | OK |    |

|                               |                                                                                                                                     |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $L_w$                         | window length                                                                                                                       |
| $\Omega_w$                    | number of windows used in the analysis                                                                                              |
| $\Omega_c = L_w \Omega_w f_0$ | number of significant cycles                                                                                                        |
| $f$                           | current frequency                                                                                                                   |
| $f_0$                         | H/V peak frequency                                                                                                                  |
| $\sigma_f$                    | standard deviation of H/V peak frequency                                                                                            |
| $\varepsilon(f_0)$            | threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$                                                           |
| $A_0$                         | H/V peak amplitude at frequency $f_0$                                                                                               |
| $A_{HV}(f)$                   | H/V curve amplitude at frequency $f$                                                                                                |
| $f^-$                         | frequency between $f_0/4$ and $f_0$ for which $A_{HV}(f^-) < A_0/2$                                                                 |
| $f^+$                         | frequency between $f_0$ and $4f_0$ for which $A_{HV}(f^+) < A_0/2$                                                                  |
| $\sigma_A(f)$                 | standard deviation of $A_{HV}(f)$ , $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{HV}(f)$ curve should be multiplied or divided |
| $\sigma_{\log A_{HV}}(f)$     | standard deviation of $\log A_{HV}(f)$ curve                                                                                        |
| $\theta(f_0)$                 | threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$                                                             |

| Freq. range [Hz]                                   | Threshold values for $\sigma_f$ and $\sigma_A(f_0)$ |           |            |            |            |
|----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-----------|------------|------------|------------|
|                                                    | < 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 $f_0$ |
| $\theta(f_0)$ for $\sigma_A(f_0)$                  | 3.0                                                 | 2.5       | 2.0        | 1.78       | 1.58       |
| $\log \theta(f_0)$ for $\sigma_{\log A_{HV}}(f_0)$ | 0.48                                                | 0.40      | 0.30       | 0.25       | 0.20       |

Sulla base di queste considerazioni, il sito in esame presenta un picco di risonanza riscontrabile di ,5 Hz e un massimo a circa 20 Hz; i dati appaiono propri di un graduale e progressivo miglioramento delle condizioni meccaniche del sottosuolo sino a rilevanti profondità.

## Risultati finali

L'analisi della dispersione delle onde di Rayleigh a partire da dati di sismica attiva (MASW) e sismica passiva (ReMI) ha consentito di determinare il profilo verticale della VS (e del modulo di taglio) e, di conseguenza, del parametro Vs30 (considerando come riferimento il piano campagna  $z = 0$  m).

Questi trovano peraltro riscontro nel modello sismostratigrafico ricavato dalla sismica a rifrazione.

In sintesi:

|                                                            | <b>BEDROCK</b>                   |           |
|------------------------------------------------------------|----------------------------------|-----------|
|                                                            | <b>NO</b>                        | <b>SI</b> |
| <b>COPERTURA</b>                                           | Sciolta                          |           |
| <b>SPESSORE</b>                                            | 22 m (spessore certo registrato) |           |
| <b>PARAMETRO Vs da MASW</b><br><b>PARAMETRO Vs da ReMi</b> | <b>Vs 30 = 477 m/s</b>           |           |
| <b>CATEGORIA DEL SOTTOSUOLO</b>                            | <b>B</b>                         |           |
| <b>PICCO DI FREQUENZA da H/V</b>                           | <b>3,5 Hz</b>                    |           |

Rispetto le norme tecniche per le costruzioni (DM 14 gennaio 2008, ex DM 14/09/2005) il sito in esame rientra quindi nella **categoria B**

### Suolo di tipo B

Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, con spessori superiori a 30m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di Vs30, compresi fra 360 m/s e 800 m/s (Nspt,30>50 nei terreni a grana grossa o cu30 >250 kPa nei terreni a grana fina).

Naturalmente il vero dato di velocità va considerato in un ragionevole intorno del dato proveniente dalle elaborazioni sperimentali ( $\pm 10\%$ ), per cui i terreni con velocità borderline vengono cautelativamente attribuiti alla categoria inferiore.

**Una elaborazione più spinta dei dati con l'introduzione di filtraggi particolari avrebbe portato a risultati opinabili. Le conclusioni riguardano quindi solo le elaborazioni dei dati ritenuti attendibili.**

Cison di Valmarino, 10/04/2015

il Geologo

dott. Simone Bortolini

**STUDIO TECNICO DI GEOLOGIA APPLICATA ALL'INGEGNERIA**  
dott. geol. SIMONE BORTOLINI via San Vito, 9/A Cison di Valmarino (TV)  
tel. 338-1977870  
e-mail [simonebortolini@libero.it](mailto:simonebortolini@libero.it)

---

# Relazione

## Indagine sismica passiva HVSR

finalizzata all'individuazione delle [frequenze](#) caratteristiche di risonanza di sito.

---

# CDM\_HVSR 9

## CROCETTA DEL MONTELLO

### Viale Rimembranza

Coordinate WGS84

Lat. N 45,830622 Long. E 12,036744

Coordinate ED50

Lat. N 45,831521 Long. E 12,037744

---



il Geologo

dott. Simone Bortolini

## **TECNICA DI MISURE ED INTERPRETAZIONE HVSR (tramite TROMINO)**

Tale prospezioni sismica si basa sull'acquisizione e sull'analisi del Rumore Sismico Ambientale (Seismic Noise) ovvero la continua vibrazione del suolo dovuta sia a cause antropiche che naturali. Questa tipologia di tecniche (definite metodi sismici passivi), dunque, non ha bisogno di alcuna energizzazione esterna poiché utilizza come sorgente il traffico veicolare, la produzione industriale, il vento, la pioggia e tutto ciò che è in grado di produrre una minima vibrazione sulla superficie del suolo.

In particolar modo con la tecnica a “Stazione Singola” viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero “Horizontal to Vertical Spectral Ratios) (Nakamura, Y. [1989]). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno e individuare la frequenza fondamentale ( $f$ ) di questa vibrazione. Sapendo che in generale esiste una relazione semplice fra  $f$ , lo spessore della parte più soffice del terreno (ovvero la parte di materiali sovrastante il bed-rock) e la velocità media ( $V_s$ ) delle onde sismiche nel sottosuolo, attraverso le misure HVSR è possibile risalire allo spessore di questo strato. Si possono inoltre effettuare delle considerazioni di tipo “qualitativo” molto utili in merito a possibili interferenze tra le frequenze risonanti del suolo e degli edifici sovrastanti.

Per la valutazione del periodo proprio di risonanza del sottosuolo è stata utilizzata la tecnica a stazione singola Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Kanai, 1957; Igarashi 1970; Nakamura 1989) che permette di estrarre informazioni relative alla frequenza di vibrazione del suolo a partire dagli spettri di rumore sismico registrati in sito. La tecnica prevede di calcolare il rapporto, in funzione della frequenza, tra gli spettri di risposta della componente orizzontale e verticale del moto dovuto ai microtremori ambientali. La misura di rumore sismico della durata di 26 minuti per ogni punto di misura è stata eseguita con una frequenza di campionamento a 128 Hz.

### **STRUMENTAZIONE IMPIEGATA**

#### Hardware

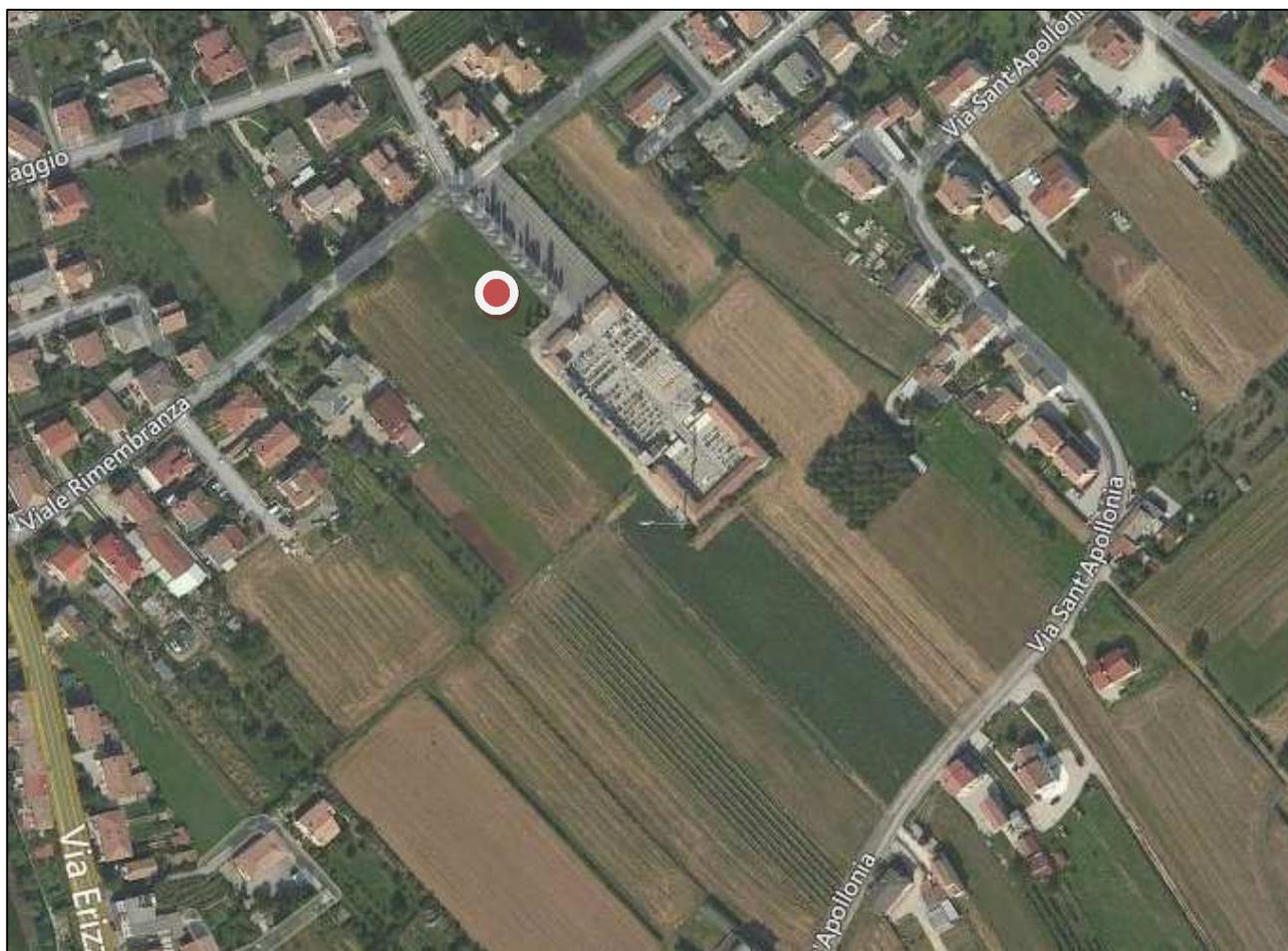
È stato utilizzato un tromografo digitale modello “Tromino” (Micromed srl) avente un intervallo di acquisizione sulle frequenze da 0.1 a 256 Hz, dotato di sistema di acquisizione digitale ad alta risoluzione (24 bit) e primo-processing interno. La livellazione micrometrica dello strumento è stata assicurata per ogni misura tramite bolla di precisione agendo sui tre punti di appoggio (punte) ed orientando uno dei 3 sensori di acquisizione (ortogonali tra loro) verso il N magnetico.

#### Software

Per le analisi dei dati acquisiti è stato adottato l'apposito software Grilla.

## Periodo proprio di risonanza del suolo (HV<sub>9</sub>)

La foto aerea mostra l'ubicazione della indagine denominata HV<sub>9</sub> (  ) indicante il punto di acquisizione di rumore sismico ambientale finalizzata alla definizione del periodo proprio del suolo.



Nello studio specifico degli effetti di sito, la frequenza di campionamento utilizzata è di 128 Hz, con tempi di misura dell'ordine di 26 minuti.

Per la misura, oltre allo spettro H/V, è palesata la trasformata delle singole componenti, l'analisi direzionale e temporale del rumore sismico acquisito.

## Analisi HV<sub>9</sub>

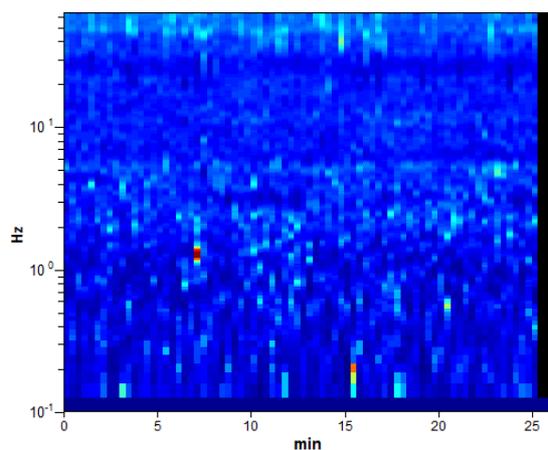


Figura 3.1: analisi temporale del rumore

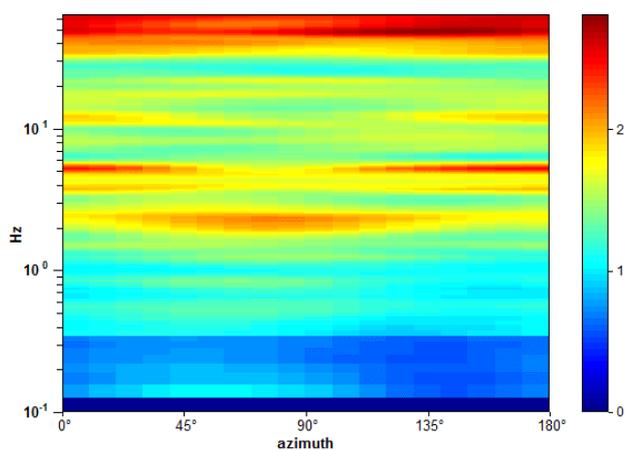


Figura 3.2: analisi direzionale del rumore

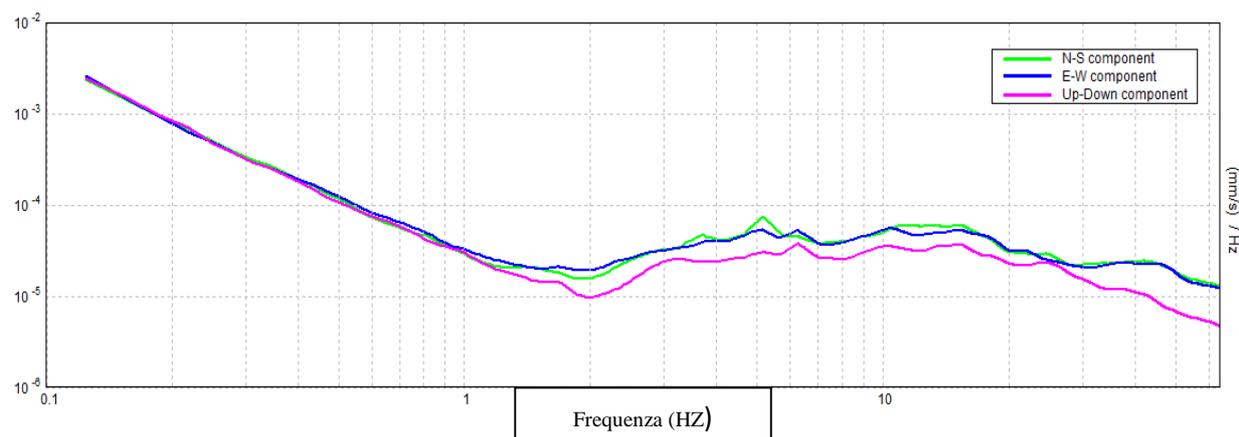


Figura 3.3: spettri delle 3 componenti

Max. H/V at  $47.81 \pm 9.24$  Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).

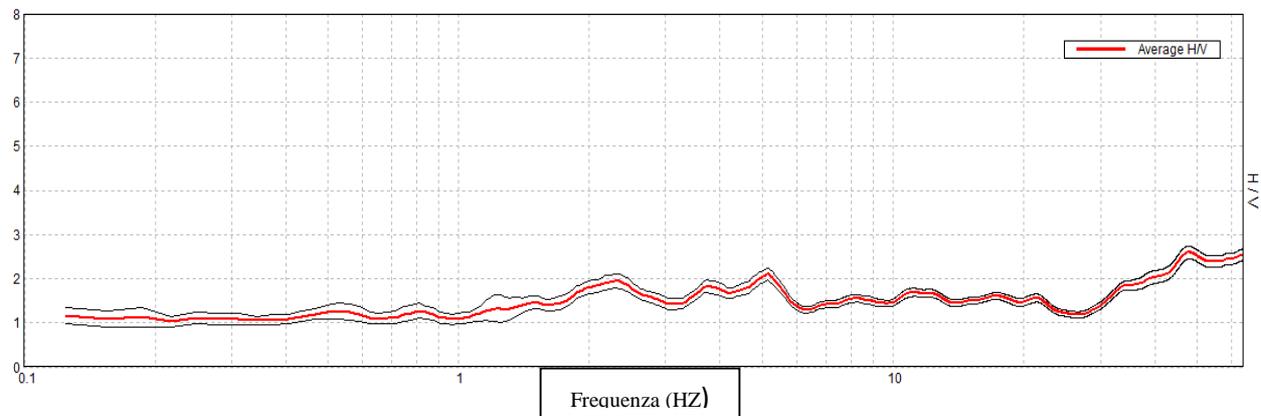


Figura 3.4: rapporto H/V

Una delle misure effettuate (HV) ha subito notevole influenza da rumore antropico. Tutte le tracce escludono la presenza di un netto contrasto di impedenza acustica nel sottosuolo. Non si individuano picchi di risonanza.

In termini di interpretazione del contrasto di impedenza acustica responsabile, eventuali picchi riscontrati, adottando secondo l'ipotesi  $\lambda/4$  una funzione di trasferimento di tipo:

$$F(\omega) = 1/\cos(\omega H/V_s)$$

La frequenza naturale ( $F_n$ ) di vibrazione dello strato di terreno corrisponde ai massimi della funzione di amplificazione:

$$F_n = \omega_n/2\pi (V_s/4H)$$

con H profondità del rifrattore e  $V_s$  velocità delle onde sismiche di taglio, si può imporre la risonanza del sistema secondo la seguente relazione con T periodo proprio del suolo:

$$T = 2\pi/\omega = 4H/V_s$$

La situazione più pericolosa in termini di fenomeni di amplificazione si verifica quando la frequenza dell'eccitazione armonica ( $\omega$ ) è pari ad una delle frequenze fondamentali dello strato ( $\omega_n$ ). Quando si verifica tale condizione ( $\omega = \omega_n$ ) si ha la risonanza dello strato, ed il fattore di amplificazione è teoricamente infinito. E' quindi di fondamentale importanza porre attenzione ai fenomeni di "doppia risonanza", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei fabbricati.

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

$$\text{Freq. naturale edificio} \approx 10 \text{ Hz} / \text{numero piani}$$

E' la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

$$\text{Freq. naturale edificio} = \text{Freq. fondamentale di risonanza del sito}$$

ad essere particolarmente pericolosa, poiché dà luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.

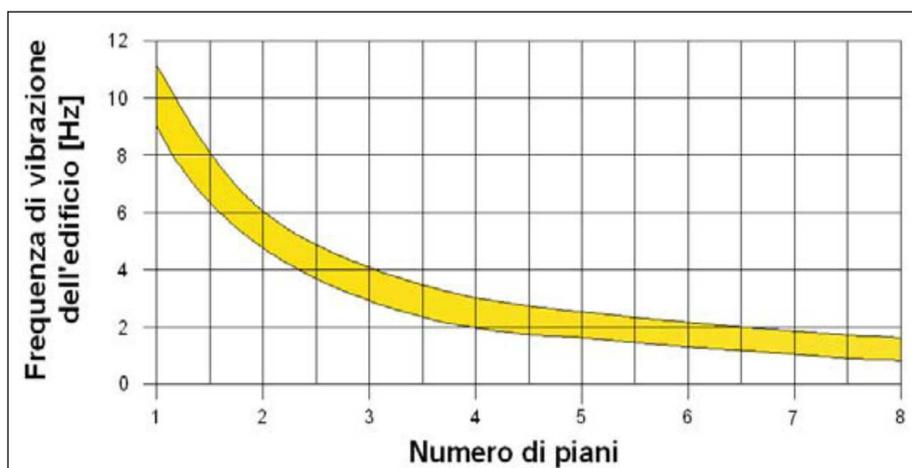


Tabella riassuntiva delle frequenze registrate in un range da 0,0 a 64,0 Hz:

| Sito di indagine | Frequenza max H/V                 |
|------------------|-----------------------------------|
| HV               | 2,3 Hz; 3,8 Hz; 5,0 Hz e 47,81 Hz |

## Conclusioni HV<sub>9</sub>

Tutte le misurazioni sono state testate per validarne l'efficacia tramite i parametri suggeriti dal Progetto Europeo SESAME:

**Max. H/V at 47.81 ± 9.24 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).**

### Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

|                                                                                                                                        |                              |    |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|----|--|
| $f_0 > 10 / L_w$                                                                                                                       | 47.81 > 0.50                 | OK |  |
| $\Omega_c(f_0) > 200$                                                                                                                  | 74587.5 > 200                | OK |  |
| $\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$<br>$\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$ | Exceeded 0 out of 1284 times | OK |  |

### Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

|                                                            |                    |    |    |
|------------------------------------------------------------|--------------------|----|----|
| Exists $f^-$ in $[f_0/4, f_0] \mid A_{HV}(f^-) < A_0 / 2$  | 28.875 Hz          | OK |    |
| Exists $f^+$ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{HV}(f^+) < A_0 / 2$   |                    |    | NO |
| $A_0 > 2$                                                  | 2.60 > 2           | OK |    |
| $f_{\text{peak}}[A_{HV}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$ | $ 0.19322  < 0.05$ |    | NO |
| $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$                              | 9.23846 < 2.39063  |    | NO |
| $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$                              | 0.1465 < 1.58      | OK |    |

|                               |                                                                                                                                     |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $L_w$                         | window length                                                                                                                       |
| $\Omega_w$                    | number of windows used in the analysis                                                                                              |
| $\Omega_c = L_w \Omega_w f_0$ | number of significant cycles                                                                                                        |
| $f$                           | current frequency                                                                                                                   |
| $f_0$                         | H/V peak frequency                                                                                                                  |
| $\sigma_f$                    | standard deviation of H/V peak frequency                                                                                            |
| $\varepsilon(f_0)$            | threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$                                                           |
| $A_0$                         | H/V peak amplitude at frequency $f_0$                                                                                               |
| $A_{HV}(f)$                   | H/V curve amplitude at frequency $f$                                                                                                |
| $f^-$                         | frequency between $f_0/4$ and $f_0$ for which $A_{HV}(f^-) < A_0/2$                                                                 |
| $f^+$                         | frequency between $f_0$ and $4f_0$ for which $A_{HV}(f^+) < A_0/2$                                                                  |
| $\sigma_A(f)$                 | standard deviation of $A_{HV}(f)$ , $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{HV}(f)$ curve should be multiplied or divided |
| $\sigma_{\log A_{HV}(f)}$     | standard deviation of $\log A_{HV}(f)$ curve                                                                                        |
| $\theta(f_0)$                 | threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$                                                             |

| Threshold values for $\sigma_f$ and $\sigma_A(f_0)$ |            |           |            |            |            |
|-----------------------------------------------------|------------|-----------|------------|------------|------------|
| Freq. range [Hz]                                    | < 0.2      | 0.2 – 0.5 | 0.5 – 1.0  | 1.0 – 2.0  | > 2.0      |
| $\varepsilon(f_0)$ [Hz]                             | 0.25 $f_0$ | 0.2 $f_0$ | 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 $\sigma_{\log A_{HV}(f_0)}$  | 0.48       | 0.40      | 0.30       | 0.25       | 0.20       |

La prova si è svolta in condizioni di basso rumore antropico (vicinanza ad una strada con moderato traffico- sorgente primaria antropica di disturbo)

Sulla base di queste considerazioni, il sito in esame presenta diversi picco di risonanza riscontrabile a **2,3 Hz; 3,8 Hz; 5,0 Hz e 47,81 Hz**; i dati appaiono propri di un graduale e progressivo miglioramento delle condizioni meccaniche del sottosuolo sino a rilevanti profondità.

La frequenza propria del terreno si pone a  $F_0$  **2,3 Hz**.

Cison di Valmarino, 11/04/2015

il Geologo  
dott. Simone Bortolini

**STUDIO TECNICO DI GEOLOGIA APPLICATA ALL'INGEGNERIA**  
dott. geol. SIMONE BORTOLINI via San Vito, 9/A Cison di Valmarino (TV)  
tel. 338-1977870  
e-mail simonebortolini@libero.it

# Relazione

## Indagine sismica passiva HVSR

finalizzata all'individuazione delle [frequenze](#) caratteristiche di risonanza di sito.

# CDM\_HVSR 10

## CROCETTA DEL MONTELLO

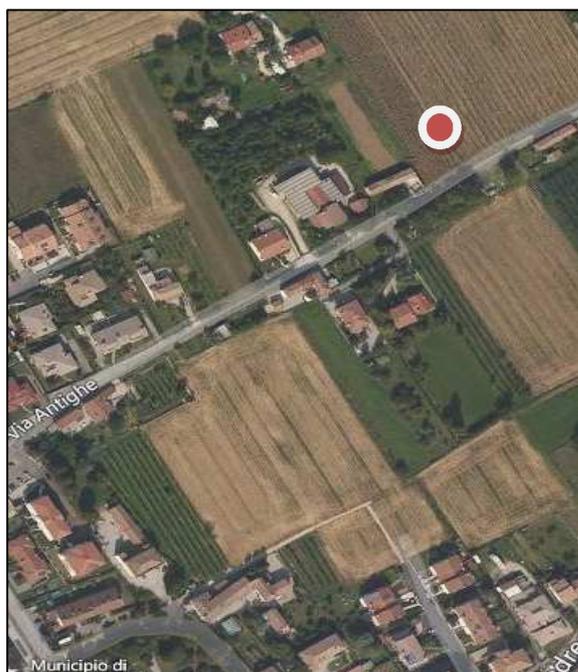
### Via Antighe

Coordinate WGS84

Lat. N 45,826303 Long. E 12,022084

Coordinate ED50

Lat. N 45,827203 Long. E 12,023084



il Geologo

dott. Simone Bortolini

## **TECNICA DI MISURE ED INTERPRETAZIONE HVSR (tramite TROMINO)**

Tale prospezioni sismica si basa sull'acquisizione e sull'analisi del Rumore Sismico Ambientale (Seismic Noise) ovvero la continua vibrazione del suolo dovuta sia a cause antropiche che naturali. Questa tipologia di tecniche (definite metodi sismici passivi), dunque, non ha bisogno di alcuna energizzazione esterna poiché utilizza come sorgente il traffico veicolare, la produzione industriale, il vento, la pioggia e tutto ciò che è in grado di produrre una minima vibrazione sulla superficie del suolo.

In particolar modo con la tecnica a “Stazione Singola” viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero “Horizontal to Vertical Spectral Ratios) (Nakamura, Y. [1989]). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno e individuare la frequenza fondamentale ( $f$ ) di questa vibrazione. Sapendo che in generale esiste una relazione semplice fra  $f$ , lo spessore della parte più soffice del terreno (ovvero la parte di materiali sovrastante il bed-rock) e la velocità media ( $V_s$ ) delle onde sismiche nel sottosuolo, attraverso le misure HVSR è possibile risalire allo spessore di questo strato. Si possono inoltre effettuare delle considerazioni di tipo “qualitativo” molto utili in merito a possibili interferenze tra le frequenze risonanti del suolo e degli edifici sovrastanti.

Per la valutazione del periodo proprio di risonanza del sottosuolo è stata utilizzata la tecnica a stazione singola Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Kanai, 1957; Igarashi 1970; Nakamura 1989) che permette di estrarre informazioni relative alla frequenza di vibrazione del suolo a partire dagli spettri di rumore sismico registrati in sito. La tecnica prevede di calcolare il rapporto, in funzione della frequenza, tra gli spettri di risposta della componente orizzontale e verticale del moto dovuto ai microtremori ambientali. La misura di rumore sismico della durata di 26 minuti per ogni punto di misura è stata eseguita con una frequenza di campionamento a 128 Hz.

### **STRUMENTAZIONE IMPIEGATA**

#### Hardware

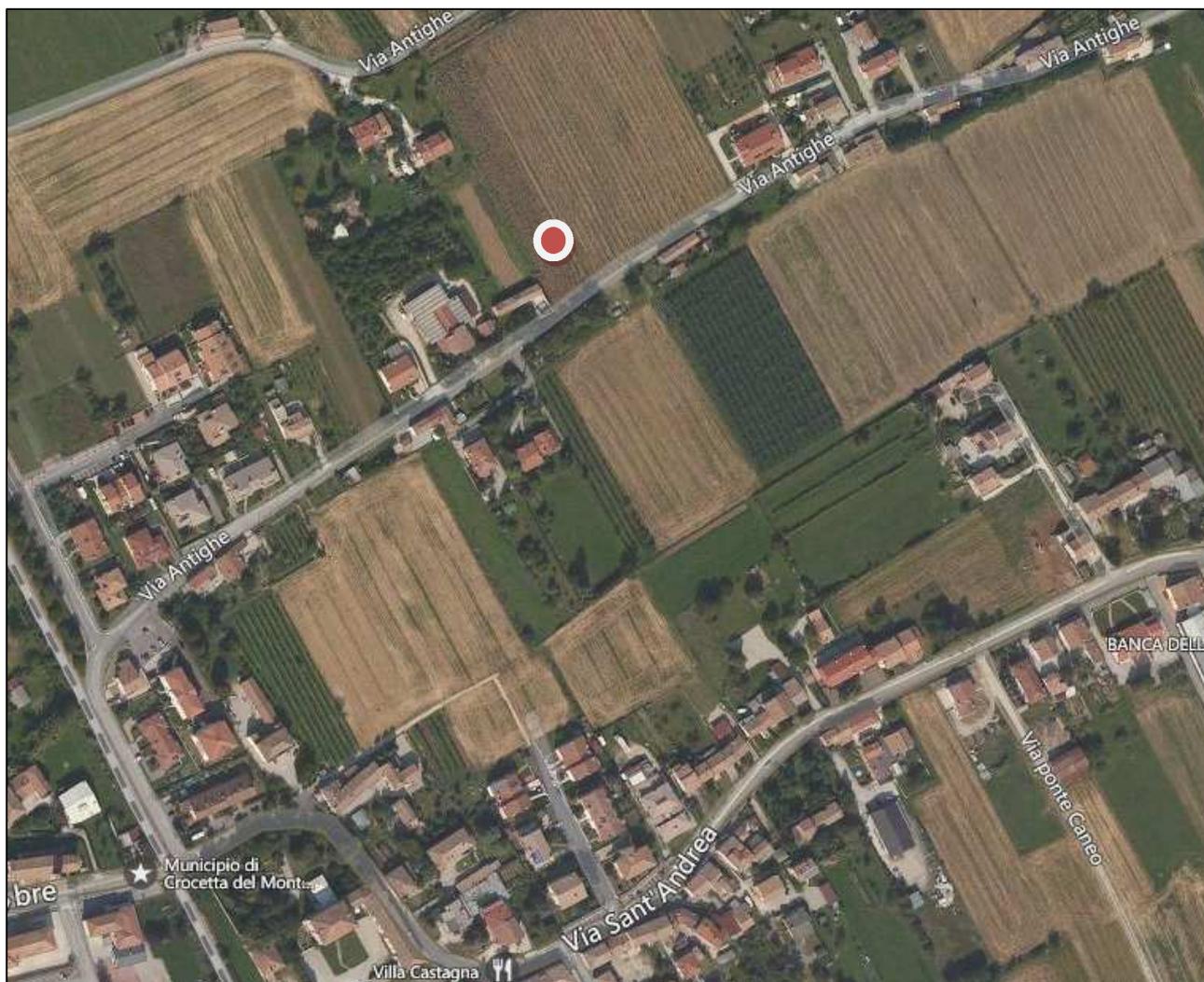
È stato utilizzato un tromografo digitale modello “Tromino” (Micromed srl) avente un intervallo di acquisizione sulle frequenze da 0.1 a 256 Hz, dotato di sistema di acquisizione digitale ad alta risoluzione (24 bit) e primo-processing interno. La livellazione micrometrica dello strumento è stata assicurata per ogni misura tramite bolla di precisione agendo sui tre punti di appoggio (punte) ed orientando uno dei 3 sensori di acquisizione (ortogonali tra loro) verso il N magnetico.

#### Software

Per le analisi dei dati acquisiti è stato adottato l'apposito software Grilla.

## Periodo proprio di risonanza del suolo (HV<sub>10</sub>)

La foto aerea mostra l'ubicazione della indagine denominata HV<sub>10</sub> (  ) indicante il punto di acquisizione di rumore sismico ambientale finalizzata alla definizione del periodo proprio del suolo.



Nello studio specifico degli effetti di sito, la frequenza di campionamento utilizzata è di 128 Hz, con tempi di misura dell'ordine di 26 minuti.

Per la misura, oltre allo spettro H/V, è palesata la trasformata delle singole componenti, l'analisi direzionale e temporale del rumore sismico acquisito.

## Analisi HV<sub>10</sub>

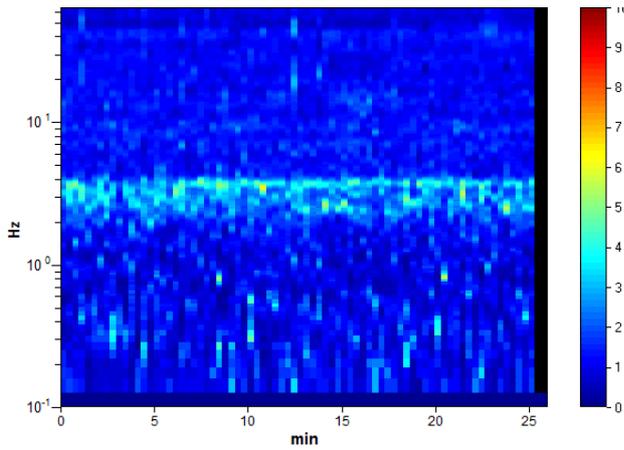


Figura 3.1: analisi temporale del rumore

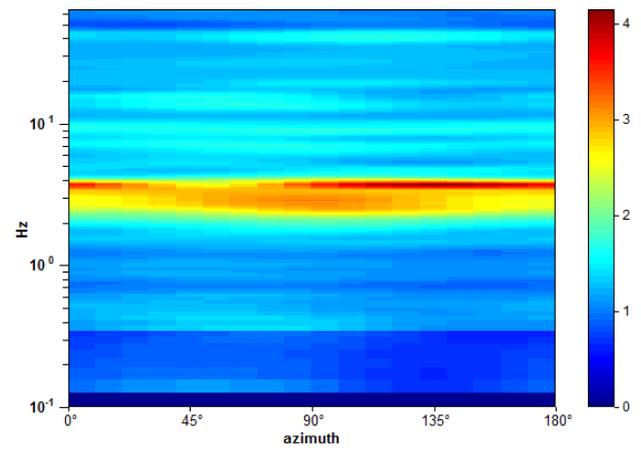


Figura 3.2: analisi direzionale del rumore

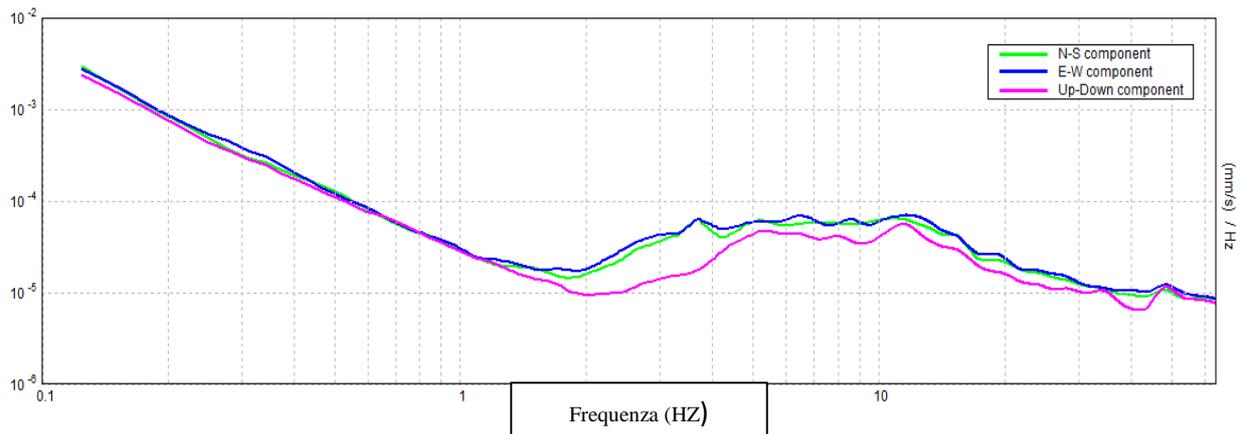


Figura 3.3: spettri delle 3 componenti

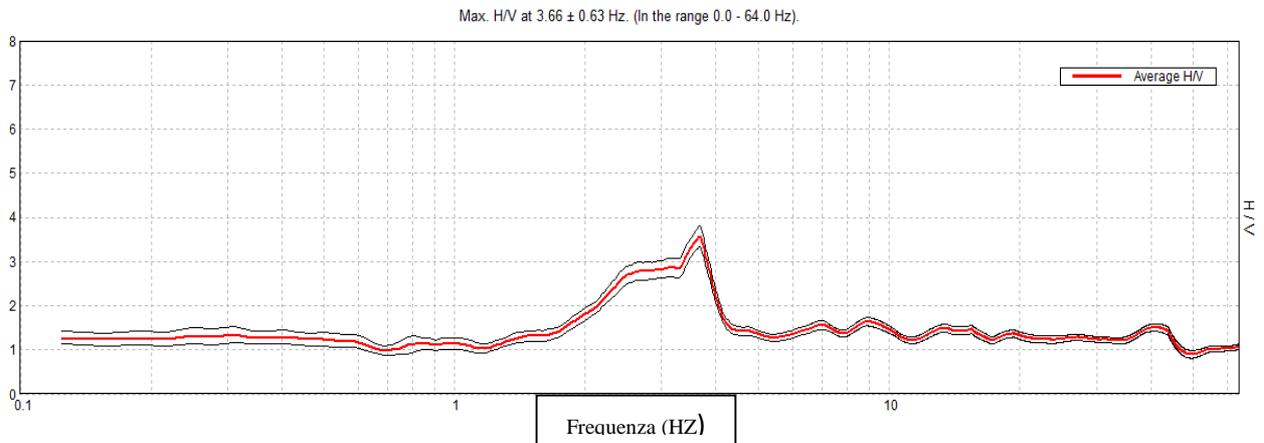


Figura 3.4: rapporto H/V

Una delle misure effettuate (HV) ha subito notevole influenza da rumore antropico. Tutte le tracce escludono la presenza di un netto contrasto di impedenza acustica nel sottosuolo. Non si individuano picchi di risonanza.

In termini di interpretazione del contrasto di impedenza acustica responsabile, eventuali picchi riscontrati, adottando secondo l'ipotesi  $\lambda/4$  una funzione di trasferimento di tipo:

$$F(\omega) = 1/\cos(\omega H/V_s)$$

La frequenza naturale ( $F_n$ ) di vibrazione dello strato di terreno corrisponde ai massimi della funzione di amplificazione:

$$F_n = \omega_n / 2\pi (V_s/4H)$$

con H profondità del rifrattore e  $V_s$  velocità delle onde sismiche di taglio, si può imporre la risonanza del sistema secondo la seguente relazione con T periodo proprio del suolo:

$$T = 2\pi/\omega = 4H/V_s$$

La situazione più pericolosa in termini di fenomeni di amplificazione si verifica quando la frequenza dell'eccitazione armonica ( $\omega$ ) è pari ad una delle frequenze fondamentali dello strato ( $\omega_n$ ). Quando si verifica tale condizione ( $\omega = \omega_n$ ) si ha la risonanza dello strato, ed il fattore di amplificazione è teoricamente infinito. E' quindi di fondamentale importanza porre attenzione ai fenomeni di "doppia risonanza", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei fabbricati.

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

$$\text{Freq. naturale edificio} \approx 10 \text{ Hz} / \text{numero piani}$$

E' la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

$$\text{Freq. naturale edificio} = \text{Freq. fondamentale di risonanza del sito}$$

ad essere particolarmente pericolosa, poiché dà luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.

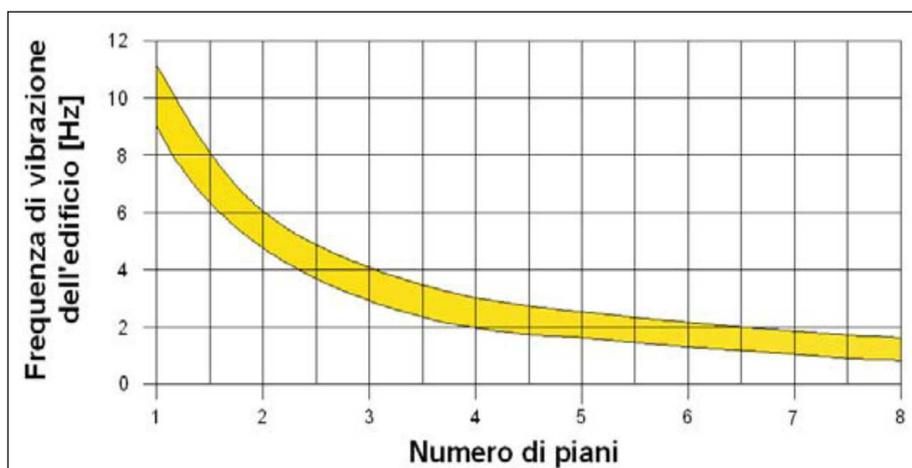


Tabella riassuntiva delle frequenze registrate in un range da 0,0 a 64,0 Hz:

| Sito di indagine | Frequenza max H/V |
|------------------|-------------------|
| HV               | 3,7 Hz            |

## Conclusioni HV<sub>10</sub>

Tutte le misurazioni sono state testate per validarne l'efficacia tramite i parametri suggeriti dal Progetto Europeo SESAME:

**Max. H/V at 3.66 ± 0.63 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).**

### Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

|                                                                                                                                        |                             |    |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----|--|
| $f_0 > 10 / L_w$                                                                                                                       | 3.66 > 0.50                 | OK |  |
| $n_c(f_0) > 200$                                                                                                                       | 5703.8 > 200                | OK |  |
| $\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$<br>$\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$ | Exceeded 0 out of 176 times | OK |  |

### Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

|                                                            |                     |    |    |
|------------------------------------------------------------|---------------------|----|----|
| Exists $f^-$ in $[f_0/4, f_0]$   $A_{HV}(f^-) < A_0 / 2$   | 1.969 Hz            | OK |    |
| Exists $f^+$ in $[f_0, 4f_0]$   $A_{HV}(f^+) < A_0 / 2$    | 4.156 Hz            | OK |    |
| $A_0 > 2$                                                  | 3.58 > 2            | OK |    |
| $f_{\text{peak}}[A_{HV}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$ | $ 0.17148  < 0.05$  |    | NO |
| $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$                              | $0.62696 < 0.18281$ |    | NO |
| $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$                              | $0.2356 < 1.58$     | OK |    |

|                           |                                                                                                                                     |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $L_w$                     | window length                                                                                                                       |
| $N_w$                     | number of windows used in the analysis                                                                                              |
| $n_c = L_w N_w f_0$       | number of significant cycles                                                                                                        |
| $f$                       | current frequency                                                                                                                   |
| $f_0$                     | H/V peak frequency                                                                                                                  |
| $\sigma_f$                | standard deviation of H/V peak frequency                                                                                            |
| $\varepsilon(f_0)$        | threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$                                                           |
| $A_0$                     | H/V peak amplitude at frequency $f_0$                                                                                               |
| $A_{HV}(f)$               | H/V curve amplitude at frequency $f$                                                                                                |
| $f^-$                     | frequency between $f_0/4$ and $f_0$ for which $A_{HV}(f^-) < A_0/2$                                                                 |
| $f^+$                     | frequency between $f_0$ and $4f_0$ for which $A_{HV}(f^+) < A_0/2$                                                                  |
| $\sigma_A(f)$             | standard deviation of $A_{HV}(f)$ , $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{HV}(f)$ curve should be multiplied or divided |
| $\sigma_{\log A_{HV}(f)}$ | standard deviation of $\log A_{HV}(f)$ curve                                                                                        |
| $\theta(f_0)$             | threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$                                                             |

### Threshold values for $\sigma_f$ and $\sigma_A(f_0)$

| Freq. range [Hz]                                   | < 0.2      | 0.2 – 0.5 | 0.5 – 1.0  | 1.0 – 2.0  | > 2.0      |
|----------------------------------------------------|------------|-----------|------------|------------|------------|
| $\varepsilon(f_0)$ [Hz]                            | 0.25 $f_0$ | 0.2 $f_0$ | 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 $\sigma_{\log A_{HV}(f_0)}$ | 0.48       | 0.40      | 0.30       | 0.25       | 0.20       |

La prova si è svolta in condizioni di basso rumore antropico (vicinanza ad una strada con moderato traffico- sorgente primaria antropica di disturbo)

Sulla base di queste considerazioni, il sito in esame presenta un picco di risonanza riscontrabile a **3,7 Hz**; i dati appaiono propri di un graduale e progressivo miglioramento delle condizioni meccaniche del sottosuolo sino a rilevanti profondità.

La frequenza propria del terreno si pone a  $F_0$  **3,7 Hz**.

Cison di Valmarino, 11/04/2015

il Geologo  
dott. Simone Bortolini

**STUDIO TECNICO DI GEOLOGIA APPLICATA ALL'INGEGNERIA**  
dott. geol. SIMONE BORTOLINI via San Vito, 9/A Cison di Valmarino (TV)  
tel. 338-1977870  
e-mail [simonebortolini@libero.it](mailto:simonebortolini@libero.it)

---

# Relazione

## Indagine sismica passiva HVSR

finalizzata all'individuazione delle [frequenze](#) caratteristiche di risonanza di sito.

---

# CDM\_HVSR 11

## CROCETTA DEL MONTELLO

### Via Del Cristo

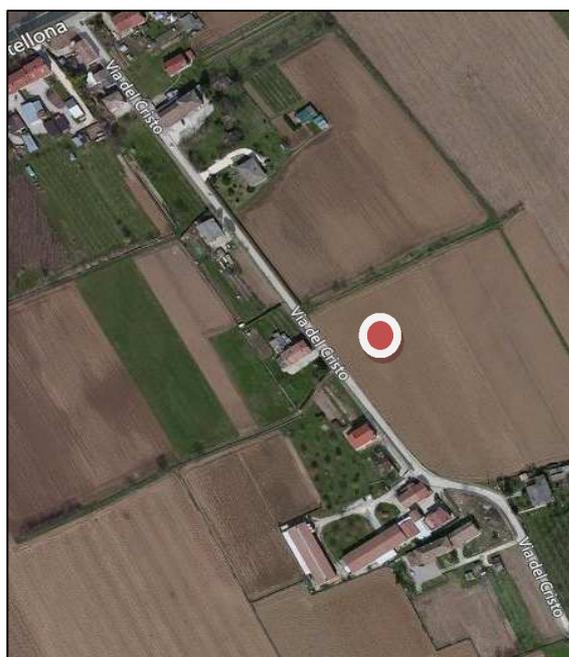
Coordinate WGS84

Lat. N 45,816005 Long. E 12,030058

Coordinate ED50

Lat. N 45,816905 Long. E 12,031058

---



il Geologo  
dott. Simone Bortolini

## **TECNICA DI MISURE ED INTERPRETAZIONE HVSR (tramite TROMINO)**

Tale prospezioni sismica si basa sull'acquisizione e sull'analisi del Rumore Sismico Ambientale (Seismic Noise) ovvero la continua vibrazione del suolo dovuta sia a cause antropiche che naturali. Questa tipologia di tecniche (definite metodi sismici passivi), dunque, non ha bisogno di alcuna energizzazione esterna poiché utilizza come sorgente il traffico veicolare, la produzione industriale, il vento, la pioggia e tutto ciò che è in grado di produrre una minima vibrazione sulla superficie del suolo.

In particolar modo con la tecnica a “Stazione Singola” viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero “Horizontal to Vertical Spectral Ratios) (Nakamura, Y. [1989]). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno e individuare la frequenza fondamentale ( $f$ ) di questa vibrazione. Sapendo che in generale esiste una relazione semplice fra  $f$ , lo spessore della parte più soffice del terreno (ovvero la parte di materiali sovrastante il bed-rock) e la velocità media ( $V_s$ ) delle onde sismiche nel sottosuolo, attraverso le misure HVSR è possibile risalire allo spessore di questo strato. Si possono inoltre effettuare delle considerazioni di tipo “qualitativo” molto utili in merito a possibili interferenze tra le frequenze risonanti del suolo e degli edifici sovrastanti.

Per la valutazione del periodo proprio di risonanza del sottosuolo è stata utilizzata la tecnica a stazione singola Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Kanai, 1957; Igarashi 1970; Nakamura 1989) che permette di estrarre informazioni relative alla frequenza di vibrazione del suolo a partire dagli spettri di rumore sismico registrati in sito. La tecnica prevede di calcolare il rapporto, in funzione della frequenza, tra gli spettri di risposta della componente orizzontale e verticale del moto dovuto ai microtremori ambientali. La misura di rumore sismico della durata di 26 minuti per ogni punto di misura è stata eseguita con una frequenza di campionamento a 128 Hz.

### **STRUMENTAZIONE IMPIEGATA**

#### Hardware

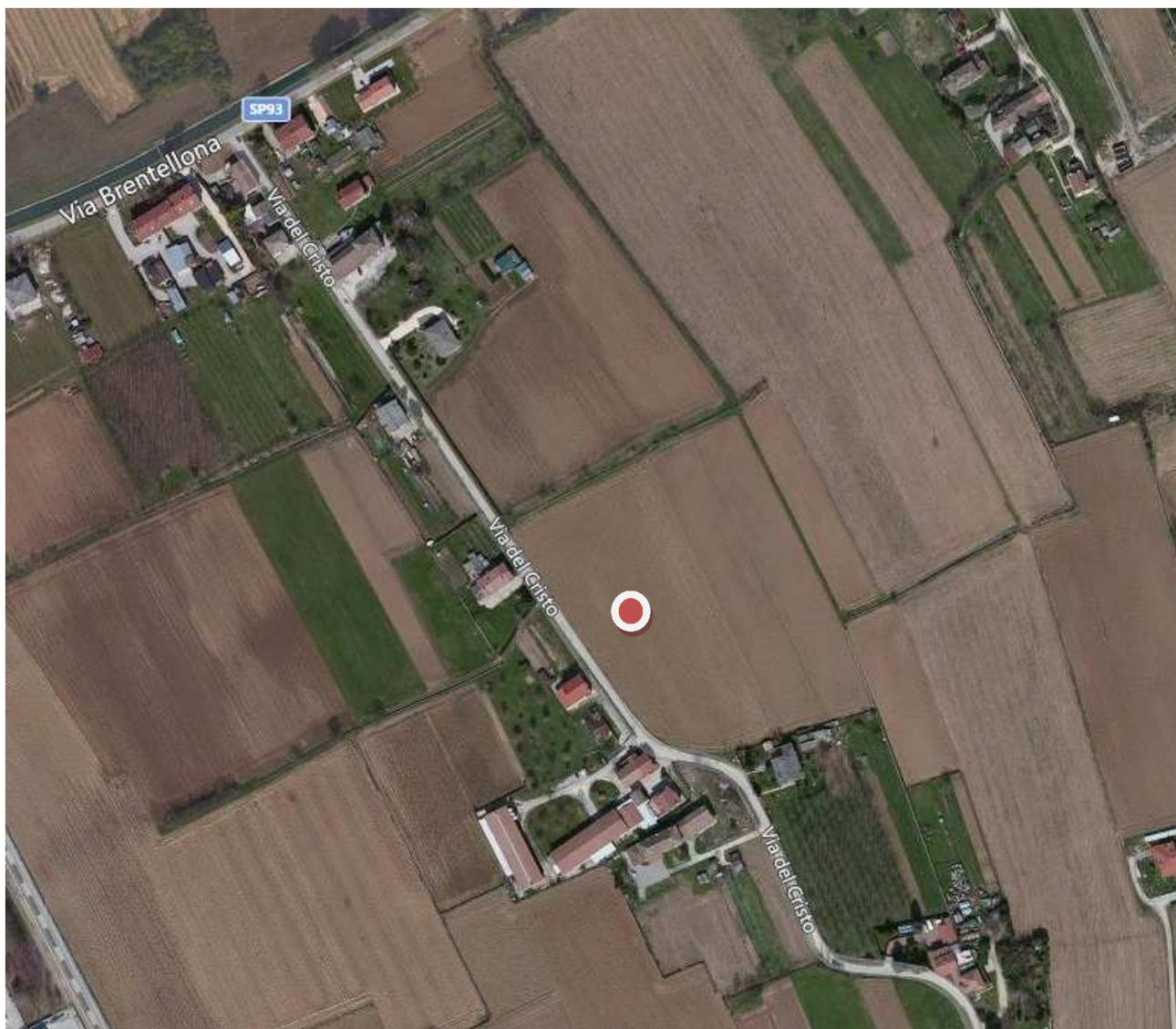
È stato utilizzato un tromografo digitale modello “Tromino” (Micromed srl) avente un intervallo di acquisizione sulle frequenze da 0.1 a 256 Hz, dotato di sistema di acquisizione digitale ad alta risoluzione (24 bit) e primo-processing interno. La livellazione micrometrica dello strumento è stata assicurata per ogni misura tramite bolla di precisione agendo sui tre punti di appoggio (punte) ed orientando uno dei 3 sensori di acquisizione (ortogonali tra loro) verso il N magnetico.

#### Software

Per le analisi dei dati acquisiti è stato adottato l'apposito software Grilla.

## Periodo proprio di risonanza del suolo (HV<sub>11</sub>)

La foto aerea mostra l'ubicazione della indagine denominata HV<sub>11</sub> (  ) indicante il punto di acquisizione di rumore sismico ambientale finalizzata alla definizione del periodo proprio del suolo.



Nello studio specifico degli effetti di sito, la frequenza di campionamento utilizzata è di 128 Hz, con tempi di misura dell'ordine di 26 minuti.

Per la misura, oltre allo spettro H/V, è palesata la trasformata delle singole componenti, l'analisi direzionale e temporale del rumore sismico acquisito.

## Analisi HV<sub>11</sub>

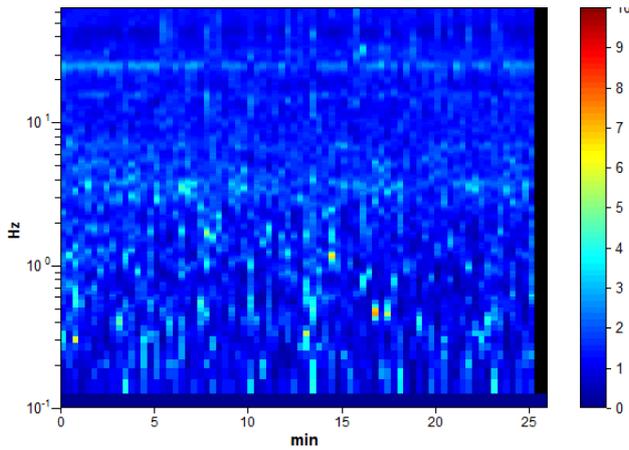


Figura 3.1: analisi temporale del rumore

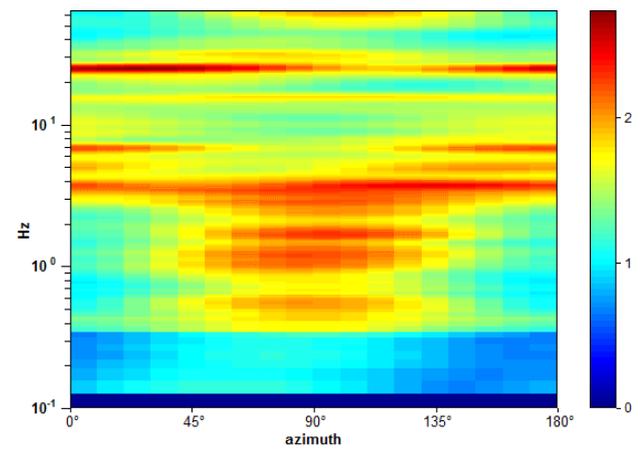


Figura 3.2: analisi direzionale del rumore

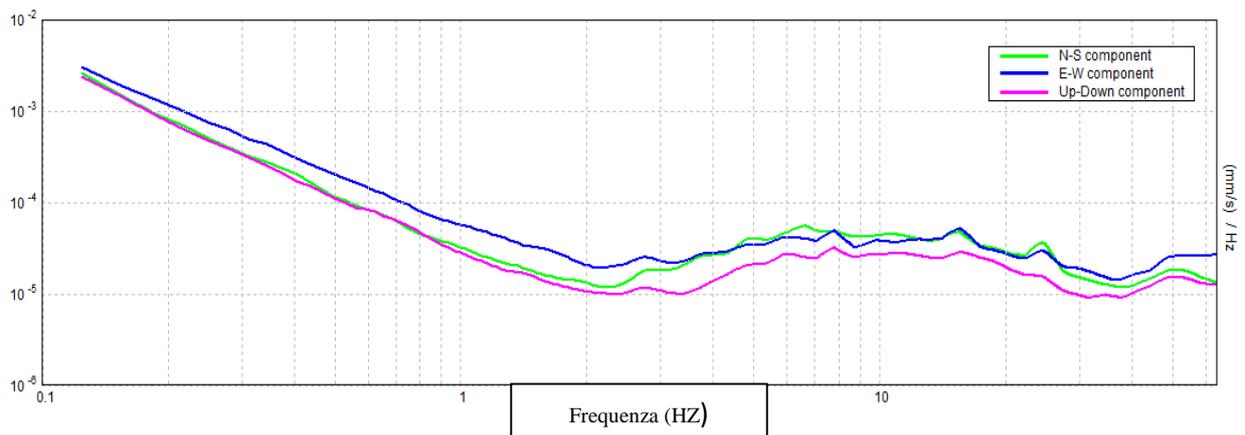


Figura 3.3: spettri delle 3 componenti

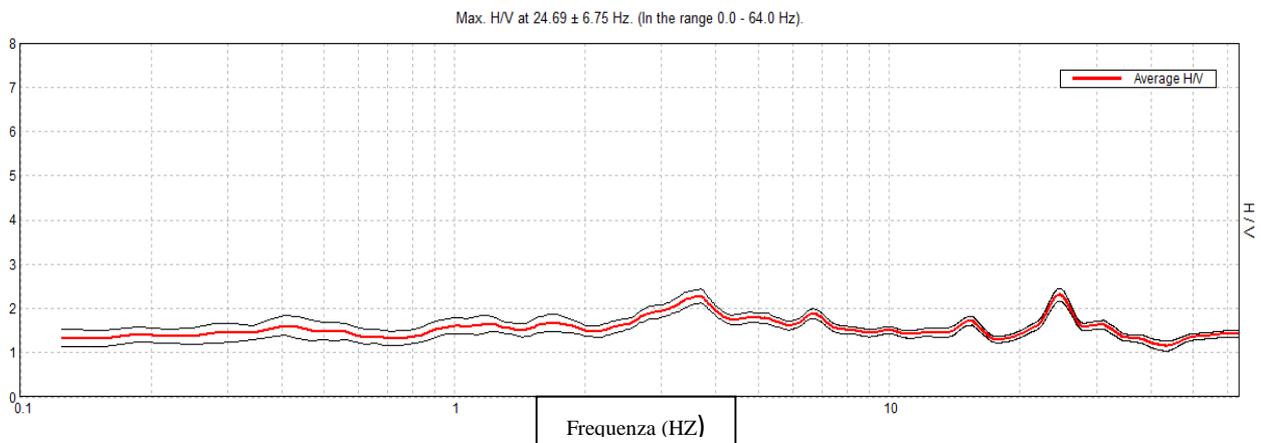


Figura 3.4: rapporto H/V

Una delle misure effettuate (HV) ha subito notevole influenza da rumore antropico. Tutte le tracce escludono la presenza di un netto contrasto di impedenza acustica nel sottosuolo. Non si individuano picchi di risonanza.

In termini di interpretazione del contrasto di impedenza acustica responsabile, eventuali picchi riscontrati, adottando secondo l'ipotesi  $\lambda/4$  una funzione di trasferimento di tipo:

$$F(\omega) = 1/\cos(\omega H/V_s)$$

La frequenza naturale ( $F_n$ ) di vibrazione dello strato di terreno corrisponde ai massimi della funzione di amplificazione:

$$F_n = \omega_n / 2\pi (V_s/4H)$$

con H profondità del rifrattore e  $V_s$  velocità delle onde sismiche di taglio, si può imporre la risonanza del sistema secondo la seguente relazione con T periodo proprio del suolo:

$$T = 2\pi/\omega = 4H/V_s$$

La situazione più pericolosa in termini di fenomeni di amplificazione si verifica quando la frequenza dell'eccitazione armonica ( $\omega$ ) è pari ad una delle frequenze fondamentali dello strato ( $\omega_n$ ). Quando si verifica tale condizione ( $\omega = \omega_n$ ) si ha la risonanza dello strato, ed il fattore di amplificazione è teoricamente infinito. E' quindi di fondamentale importanza porre attenzione ai fenomeni di "doppia risonanza", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei fabbricati.

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

$$\text{Freq. naturale edificio} \approx 10 \text{ Hz} / \text{numero piani}$$

E' la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

$$\text{Freq. naturale edificio} = \text{Freq. fondamentale di risonanza del sito}$$

ad essere particolarmente pericolosa, poiché dà luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.

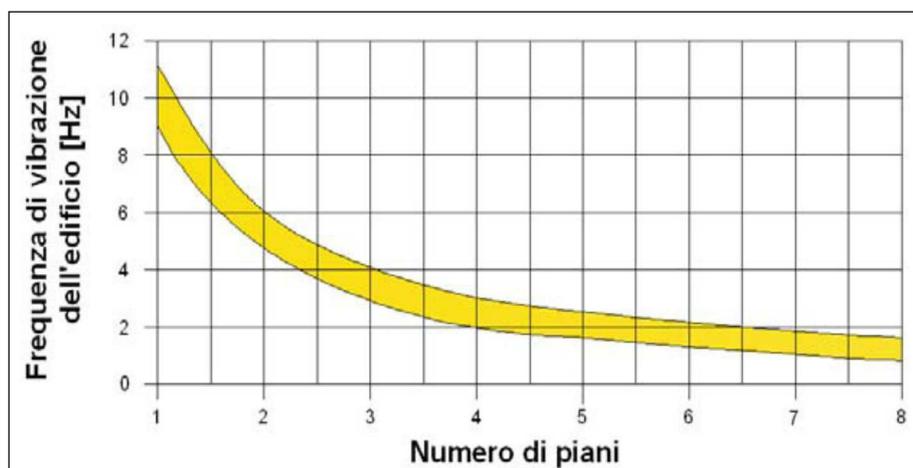


Tabella riassuntiva delle frequenze registrate in un range da 0,0 a 64,0 Hz:

| Sito di indagine | Frequenza max H/V        |
|------------------|--------------------------|
| HV               | 3,5 Hz; 6,5 Hz e 24,7 Hz |

## Conclusioni HV<sub>11</sub>

Tutte le misurazioni sono state testate per validarne l'efficacia tramite i parametri suggeriti dal Progetto Europeo SESAME:

**Max. H/V at 24.69 ± 6.75 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).**

### Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

|                                                                                                                                        |                              |    |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|----|--|
| $f_0 > 10 / L_w$                                                                                                                       | 24.69 > 0.50                 | OK |  |
| $\Omega_c(f_0) > 200$                                                                                                                  | 38512.5 > 200                | OK |  |
| $\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$<br>$\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$ | Exceeded 0 out of 1186 times | OK |  |

### Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

|                                                            |                    |    |    |
|------------------------------------------------------------|--------------------|----|----|
| Exists $f^-$ in $[f_0/4, f_0]$   $A_{HV}(f^-) < A_0 / 2$   |                    |    | NO |
| Exists $f^+$ in $[f_0, 4f_0]$   $A_{HV}(f^+) < A_0 / 2$    | 42.938 Hz          | OK |    |
| $A_0 > 2$                                                  | 2.31 > 2           | OK |    |
| $f_{\text{peak}}[A_{HV}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$ | $ 0.27358  < 0.05$ |    | NO |
| $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$                              | 6.75407 < 1.23438  |    | NO |
| $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$                              | 0.1435 < 1.58      | OK |    |

|                               |                                                                                                                                     |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $L_w$                         | window length                                                                                                                       |
| $\Omega_w$                    | number of windows used in the analysis                                                                                              |
| $\Omega_c = L_w \Omega_w f_0$ | number of significant cycles                                                                                                        |
| $f$                           | current frequency                                                                                                                   |
| $f_0$                         | H/V peak frequency                                                                                                                  |
| $\sigma_f$                    | standard deviation of H/V peak frequency                                                                                            |
| $\varepsilon(f_0)$            | threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$                                                           |
| $A_0$                         | H/V peak amplitude at frequency $f_0$                                                                                               |
| $A_{HV}(f)$                   | H/V curve amplitude at frequency $f$                                                                                                |
| $f^-$                         | frequency between $f_0/4$ and $f_0$ for which $A_{HV}(f^-) < A_0/2$                                                                 |
| $f^+$                         | frequency between $f_0$ and $4f_0$ for which $A_{HV}(f^+) < A_0/2$                                                                  |
| $\sigma_A(f)$                 | standard deviation of $A_{HV}(f)$ , $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{HV}(f)$ curve should be multiplied or divided |
| $\sigma_{\log A_{HV}(f)}$     | standard deviation of $\log A_{HV}(f)$ curve                                                                                        |
| $\theta(f_0)$                 | threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$                                                             |

### Threshold values for $\sigma_f$ and $\sigma_A(f_0)$

|                                                    |            |           |            |            |            |
|----------------------------------------------------|------------|-----------|------------|------------|------------|
| Freq. range [Hz]                                   | < 0.2      | 0.2 – 0.5 | 0.5 – 1.0  | 1.0 – 2.0  | > 2.0      |
| $\varepsilon(f_0)$ [Hz]                            | 0.25 $f_0$ | 0.2 $f_0$ | 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 $\sigma_{\log A_{HV}(f_0)}$ | 0.48       | 0.40      | 0.30       | 0.25       | 0.20       |

La prova si è svolta in condizioni di basso rumore antropico (vicinanza ad una strada con moderato traffico- sorgente primaria antropica di disturbo)

Sulla base di queste considerazioni, il sito in esame presenta picchi di risonanza riscontrabile a **3,5 Hz; 6,5 Hz e 24,7 Hz**; i dati appaiono propri di un graduale e progressivo miglioramento delle condizioni meccaniche del sottosuolo sino a rilevanti profondità.

La frequenza propria del terreno si pone a  $F_0$  **3,5 Hz**.

Cison di Valmarino, 11/04/2015

il Geologo  
dott. Simone Bortolini

**STUDIO TECNICO DI GEOLOGIA APPLICATA ALL'INGEGNERIA**  
dott. geol. SIMONE BORTOLINI via San Vito, 9/A Cison di Valmarino (TV)  
tel. 338-1977870  
e-mail simonebortolini@libero.it

---

## **Relazione**

### **Indagine sismica passiva HVSR**

finalizzata all'individuazione delle [frequenze](#) caratteristiche di risonanza di sito.

---

## **CDM\_HVSR 12**

### **CROCETTA DEL MONTELLO**

#### **Via Canapificio**

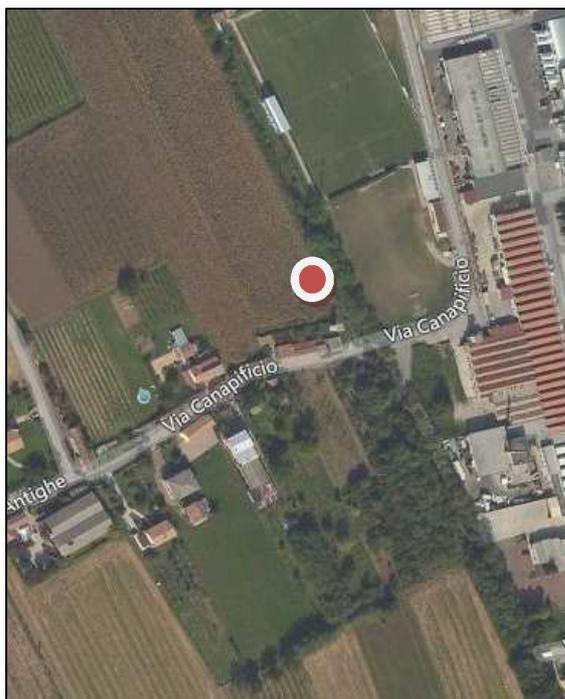
Coordinate WGS84

Lat. N 45,830617 Long. E 12,029979

Coordinate ED50

Lat. N 45,831516 Long. E 12,030979

---



il Geologo  
dott. Simone Bortolini

## **TECNICA DI MISURE ED INTERPRETAZIONE HVSR (tramite TROMINO)**

Tale prospezioni sismica si basa sull'acquisizione e sull'analisi del Rumore Sismico Ambientale (Seismic Noise) ovvero la continua vibrazione del suolo dovuta sia a cause antropiche che naturali. Questa tipologia di tecniche (definite metodi sismici passivi), dunque, non ha bisogno di alcuna energizzazione esterna poiché utilizza come sorgente il traffico veicolare, la produzione industriale, il vento, la pioggia e tutto ciò che è in grado di produrre una minima vibrazione sulla superficie del suolo.

In particolar modo con la tecnica a “Stazione Singola” viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero “Horizontal to Vertical Spectral Ratios) (Nakamura, Y. [1989]). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno e individuare la frequenza fondamentale ( $f$ ) di questa vibrazione. Sapendo che in generale esiste una relazione semplice fra  $f$ , lo spessore della parte più soffice del terreno (ovvero la parte di materiali sovrastante il bed-rock) e la velocità media ( $V_s$ ) delle onde sismiche nel sottosuolo, attraverso le misure HVSR è possibile risalire allo spessore di questo strato. Si possono inoltre effettuare delle considerazioni di tipo “qualitativo” molto utili in merito a possibili interferenze tra le frequenze risonanti del suolo e degli edifici sovrastanti.

Per la valutazione del periodo proprio di risonanza del sottosuolo è stata utilizzata la tecnica a stazione singola Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Kanai, 1957; Igarashi 1970; Nakamura 1989) che permette di estrarre informazioni relative alla frequenza di vibrazione del suolo a partire dagli spettri di rumore sismico registrati in sito. La tecnica prevede di calcolare il rapporto, in funzione della frequenza, tra gli spettri di risposta della componente orizzontale e verticale del moto dovuto ai microtremori ambientali. La misura di rumore sismico della durata di 26 minuti per ogni punto di misura è stata eseguita con una frequenza di campionamento a 128 Hz.

### **STRUMENTAZIONE IMPIEGATA**

#### Hardware

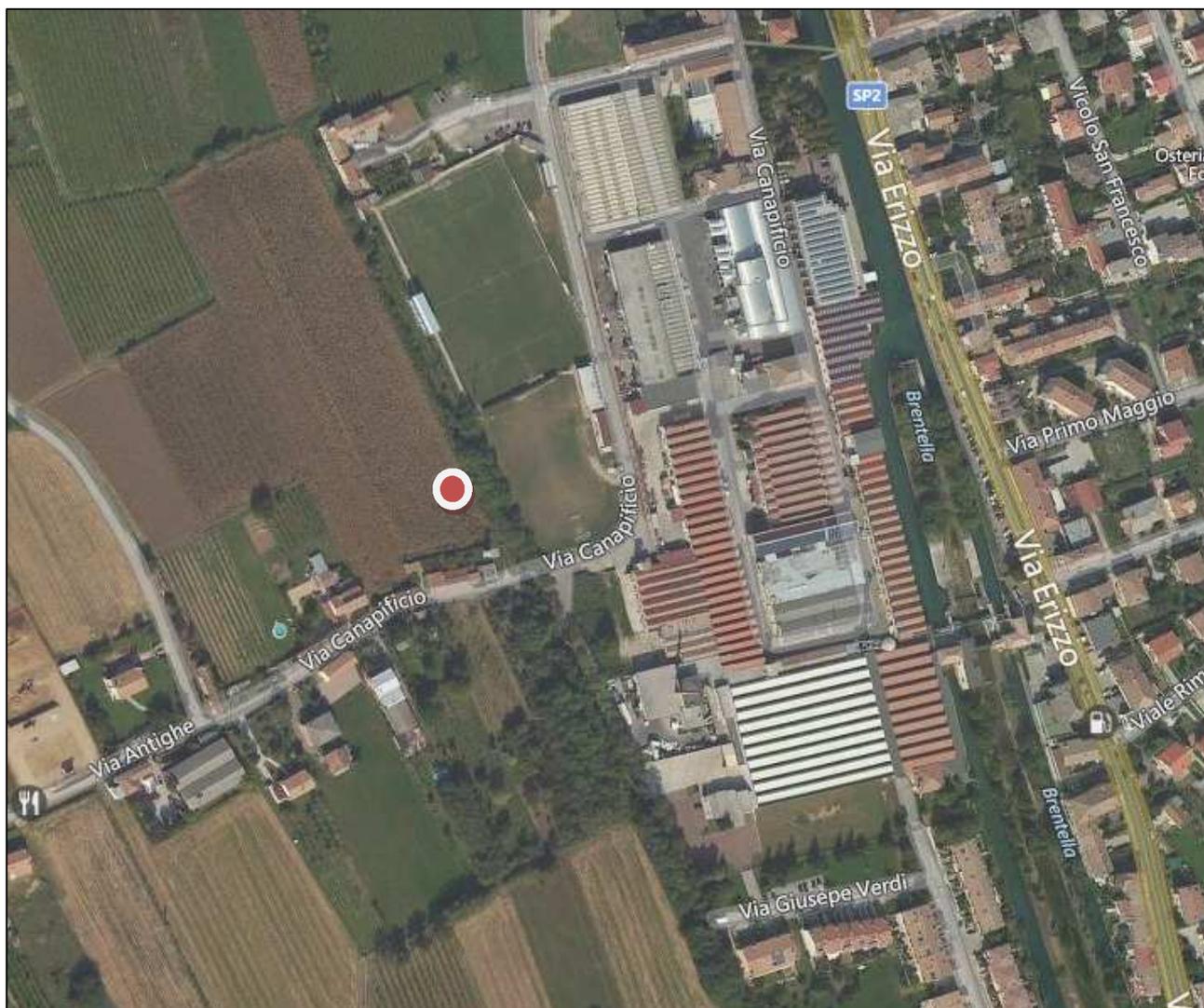
È stato utilizzato un tromografo digitale modello “Tromino” (Micromed srl) avente un intervallo di acquisizione sulle frequenze da 0.1 a 256 Hz, dotato di sistema di acquisizione digitale ad alta risoluzione (24 bit) e primo-processing interno. La livellazione micrometrica dello strumento è stata assicurata per ogni misura tramite bolla di precisione agendo sui tre punti di appoggio (punte) ed orientando uno dei 3 sensori di acquisizione (ortogonali tra loro) verso il N magnetico.

#### Software

Per le analisi dei dati acquisiti è stato adottato l'apposito software Grilla.

## Periodo proprio di risonanza del suolo (HV<sub>12</sub>)

La foto aerea mostra l'ubicazione della indagine denominata HV<sub>12</sub> (  ) indicante il punto di acquisizione di rumore sismico ambientale finalizzata alla definizione del periodo proprio del suolo.



Nello studio specifico degli effetti di sito, la frequenza di campionamento utilizzata è di 128 Hz, con tempi di misura dell'ordine di 26 minuti.

Per la misura, oltre allo spettro H/V, è palesata la trasformata delle singole componenti, l'analisi direzionale e temporale del rumore sismico acquisito.

## Analisi HV<sub>12</sub>

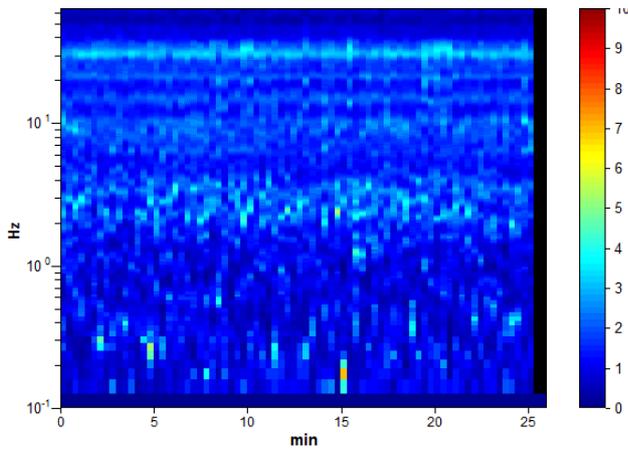


Figura 3.1: analisi temporale del rumore

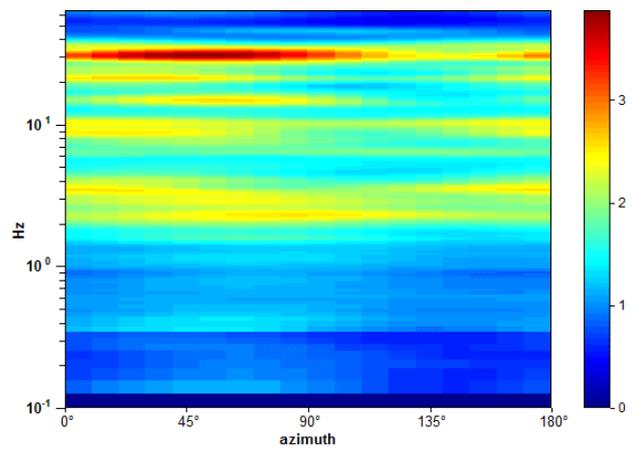


Figura 3.2: analisi direzionale del rumore

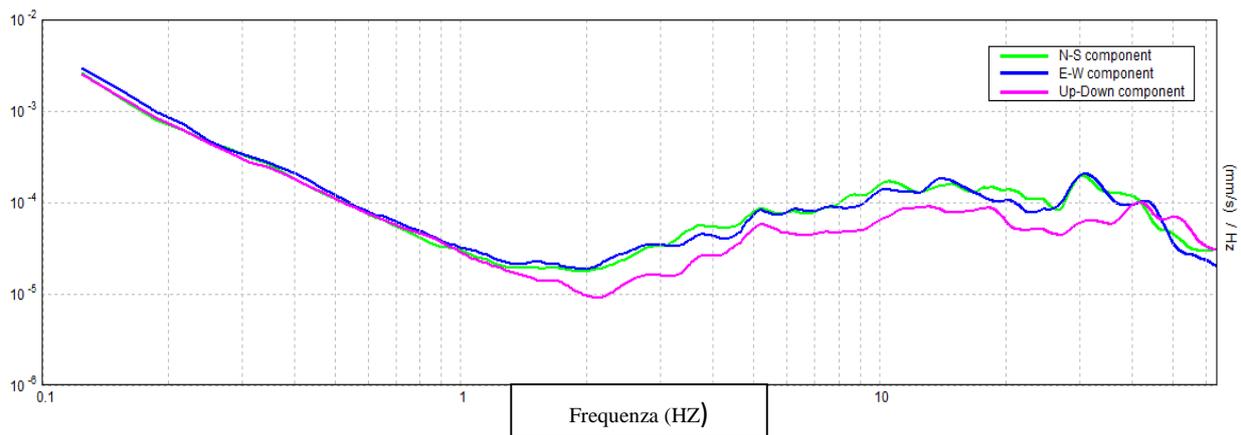


Figura 3.3: spettri delle 3 componenti

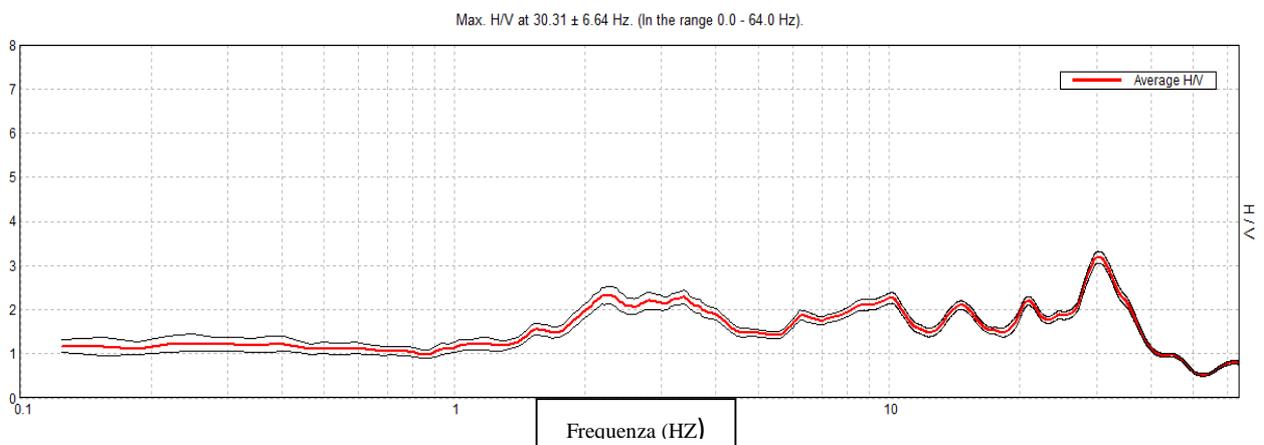


Figura 3.4: rapporto H/V

Una delle misure effettuate (HV) ha subito notevole influenza da rumore antropico. Tutte le tracce escludono la presenza di un netto contrasto di impedenza acustica nel sottosuolo. Non si individuano picchi di risonanza.

In termini di interpretazione del contrasto di impedenza acustica responsabile, eventuali picchi riscontrati, adottando secondo l'ipotesi  $\lambda/4$  una funzione di trasferimento di tipo:

$$F(\omega) = 1/\cos(\omega H/V_s)$$

La frequenza naturale ( $F_n$ ) di vibrazione dello strato di terreno corrisponde ai massimi della funzione di amplificazione:

$$F_n = \omega_n / 2\pi (V_s/4H)$$

con H profondità del rifrattore e  $V_s$  velocità delle onde sismiche di taglio, si può imporre la risonanza del sistema secondo la seguente relazione con T periodo proprio del suolo:

$$T = 2\pi/\omega = 4H/V_s$$

La situazione più pericolosa in termini di fenomeni di amplificazione si verifica quando la frequenza dell'eccitazione armonica ( $\omega$ ) è pari ad una delle frequenze fondamentali dello strato ( $\omega_n$ ). Quando si verifica tale condizione ( $\omega = \omega_n$ ) si ha la risonanza dello strato, ed il fattore di amplificazione è teoricamente infinito. E' quindi di fondamentale importanza porre attenzione ai fenomeni di "doppia risonanza", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei fabbricati.

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

$$\text{Freq. naturale edificio} \approx 10 \text{ Hz} / \text{numero piani}$$

E' la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

$$\text{Freq. naturale edificio} = \text{Freq. fondamentale di risonanza del sito}$$

ad essere particolarmente pericolosa, poiché dà luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.

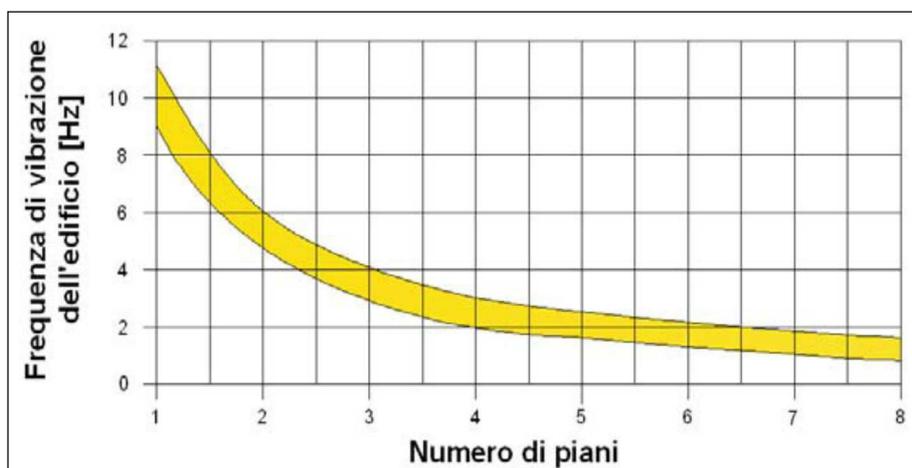


Tabella riassuntiva delle frequenze registrate in un range da 0,0 a 64,0 Hz:

| Sito di indagine | Frequenza max H/V               |
|------------------|---------------------------------|
| HV               | 2,4 Hz; 6,1 Hz; 10 Hz e 30,3 Hz |

## Conclusioni HV<sub>12</sub>

Tutte le misurazioni sono state testate per validarne l'efficacia tramite i parametri suggeriti dal Progetto Europeo SESAME:

**Max. H/V at 30.31 ± 6.64 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).**

### Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

|                                                                                                                                        |                              |    |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|----|--|
| $f_0 > 10 / L_w$                                                                                                                       | 30.31 > 0.50                 | OK |  |
| $n_c(f_0) > 200$                                                                                                                       | 47287.5 > 200                | OK |  |
| $\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$<br>$\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$ | Exceeded 0 out of 1456 times | OK |  |

### Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

|                                                             |                    |    |    |
|-------------------------------------------------------------|--------------------|----|----|
| Exists $f^-$ in $[f_0/4, f_0]   A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$     | 19.094 Hz          | OK |    |
| Exists $f^+$ in $[f_0, 4f_0]   A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$      | 37.625 Hz          | OK |    |
| $A_0 > 2$                                                   | 3.19 > 2           | OK |    |
| $f_{\text{peak}}[A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$ | $ 0.21914  < 0.05$ |    | NO |
| $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$                               | 6.64273 < 1.51563  |    | NO |
| $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$                               | 0.1353 < 1.58      | OK |    |

|                            |                                                                                                                                       |
|----------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $L_w$                      | window length                                                                                                                         |
| $D_w$                      | number of windows used in the analysis                                                                                                |
| $n_c = L_w D_w f_0$        | number of significant cycles                                                                                                          |
| $f$                        | current frequency                                                                                                                     |
| $f_0$                      | H/V peak frequency                                                                                                                    |
| $\sigma_f$                 | standard deviation of H/V peak frequency                                                                                              |
| $\varepsilon(f_0)$         | 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 |
| $\sigma_{\log A_{H/V}(f)}$ | standard deviation of $\log A_{H/V}(f)$ curve                                                                                         |
| $\theta(f_0)$              | threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$                                                               |

### Threshold values for $\sigma$ and $\sigma_A(f_0)$

| Freq. range [Hz]                                    | < 0.2      | 0.2 – 0.5 | 0.5 – 1.0  | 1.0 – 2.0  | > 2.0      |
|-----------------------------------------------------|------------|-----------|------------|------------|------------|
| $\varepsilon(f_0)$ [Hz]                             | 0.25 $f_0$ | 0.2 $f_0$ | 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 $\sigma_{\log A_{H/V}(f_0)}$ | 0.48       | 0.40      | 0.30       | 0.25       | 0.20       |

La prova si è svolta in condizioni di basso rumore antropico (vicinanza ad una strada con moderato traffico- sorgente primaria antropica di disturbo)

Sulla base di queste considerazioni, il sito in esame presenta picchi di risonanza riscontrabile a **2,4 Hz; 6,1 Hz; 10 Hz e 30,3 Hz**; i dati appaiono propri di un graduale e progressivo miglioramento delle condizioni meccaniche del sottosuolo sino a rilevanti profondità.

La frequenza propria del terreno si pone a  $F_0$  **2,4 Hz**.

Cison di Valmarino, 11/04/2015

il Geologo  
dott. Simone Bortolini

**STUDIO TECNICO DI GEOLOGIA APPLICATA ALL'INGEGNERIA**  
dott. geol. SIMONE BORTOLINI via San Vito, 9/A Cison di Valmarino (TV)  
tel. 338-1977870  
e-mail simonebortolini@libero.it

---

## **Relazione**

### **Indagine sismica passiva HVSR**

finalizzata all'individuazione delle [frequenze](#) caratteristiche di risonanza di sito.

---

## **CDM\_HVSR 13**

### **CROCETTA DEL MONTELLO**

#### **Località Borgo Furo**

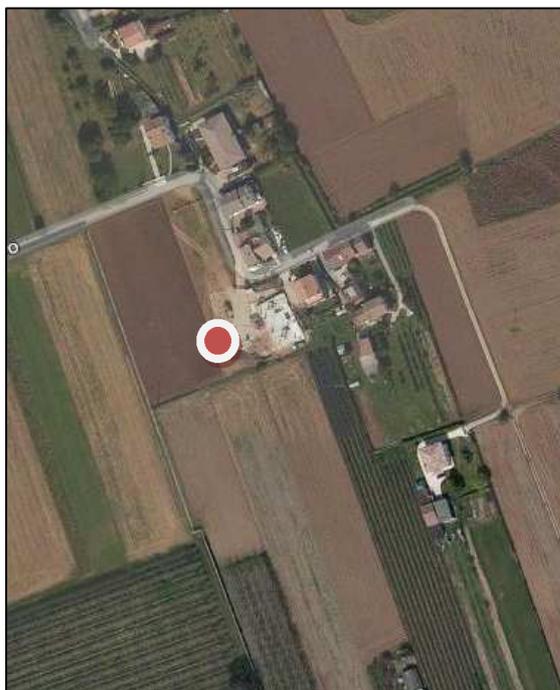
Coordinate WGS84

Lat. N 45,822619 Long. E 12,040991

Coordinate ED50

Lat. N 45,823518 Long. E 12,041991

---



il Geologo  
dott. Simone Bortolini

## **TECNICA DI MISURE ED INTERPRETAZIONE HVSR (tramite TROMINO)**

Tale prospezioni sismica si basa sull'acquisizione e sull'analisi del Rumore Sismico Ambientale (Seismic Noise) ovvero la continua vibrazione del suolo dovuta sia a cause antropiche che naturali. Questa tipologia di tecniche (definite metodi sismici passivi), dunque, non ha bisogno di alcuna energizzazione esterna poiché utilizza come sorgente il traffico veicolare, la produzione industriale, il vento, la pioggia e tutto ciò che è in grado di produrre una minima vibrazione sulla superficie del suolo.

In particolar modo con la tecnica a “Stazione Singola” viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero “Horizontal to Vertical Spectral Ratios) (Nakamura, Y. [1989]). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno e individuare la frequenza fondamentale ( $f$ ) di questa vibrazione. Sapendo che in generale esiste una relazione semplice fra  $f$ , lo spessore della parte più soffice del terreno (ovvero la parte di materiali sovrastante il bed-rock) e la velocità media ( $V_s$ ) delle onde sismiche nel sottosuolo, attraverso le misure HVSR è possibile risalire allo spessore di questo strato. Si possono inoltre effettuare delle considerazioni di tipo “qualitativo” molto utili in merito a possibili interferenze tra le frequenze risonanti del suolo e degli edifici sovrastanti.

Per la valutazione del periodo proprio di risonanza del sottosuolo è stata utilizzata la tecnica a stazione singola Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Kanai, 1957; Igarashi 1970; Nakamura 1989) che permette di estrarre informazioni relative alla frequenza di vibrazione del suolo a partire dagli spettri di rumore sismico registrati in sito. La tecnica prevede di calcolare il rapporto, in funzione della frequenza, tra gli spettri di risposta della componente orizzontale e verticale del moto dovuto ai microtremori ambientali. La misura di rumore sismico della durata di 26 minuti per ogni punto di misura è stata eseguita con una frequenza di campionamento a 128 Hz.

### **STRUMENTAZIONE IMPIEGATA**

#### Hardware

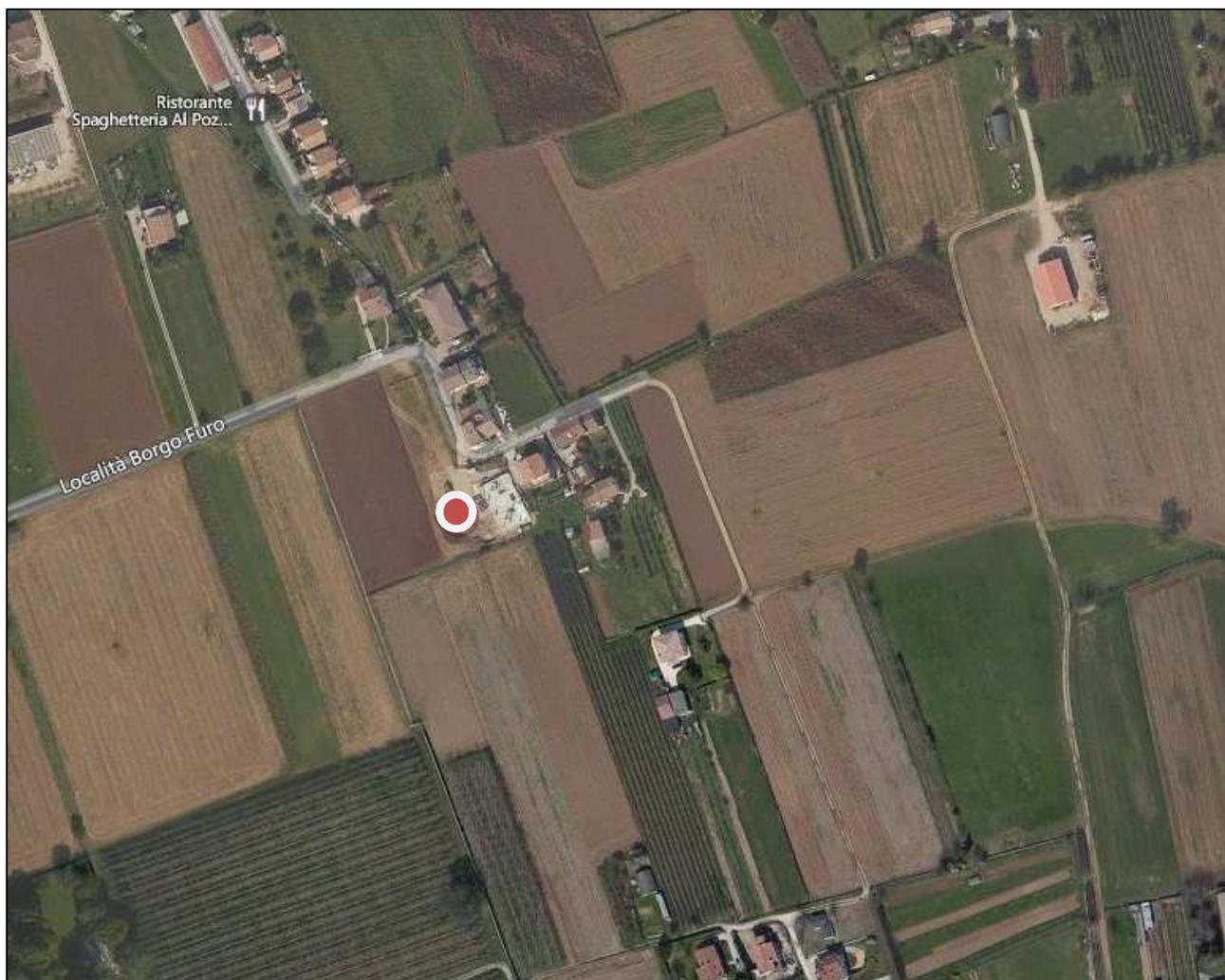
È stato utilizzato un tromografo digitale modello “Tromino” (Micromed srl) avente un intervallo di acquisizione sulle frequenze da 0.1 a 256 Hz, dotato di sistema di acquisizione digitale ad alta risoluzione (24 bit) e primo-processing interno. La livellazione micrometrica dello strumento è stata assicurata per ogni misura tramite bolla di precisione agendo sui tre punti di appoggio (punte) ed orientando uno dei 3 sensori di acquisizione (ortogonali tra loro) verso il N magnetico.

#### Software

Per le analisi dei dati acquisiti è stato adottato l'apposito software Grilla.

## Periodo proprio di risonanza del suolo (HV<sub>13</sub>)

La foto aerea mostra l'ubicazione della indagine denominata HV<sub>13</sub> (  ) indicante il punto di acquisizione di rumore sismico ambientale finalizzata alla definizione del periodo proprio del suolo.



Nello studio specifico degli effetti di sito, la frequenza di campionamento utilizzata è di 128 Hz, con tempi di misura dell'ordine di 26 minuti.

Per la misura, oltre allo spettro H/V, è palesata la trasformata delle singole componenti, l'analisi direzionale e temporale del rumore sismico acquisito.

## Analisi HV<sub>13</sub>

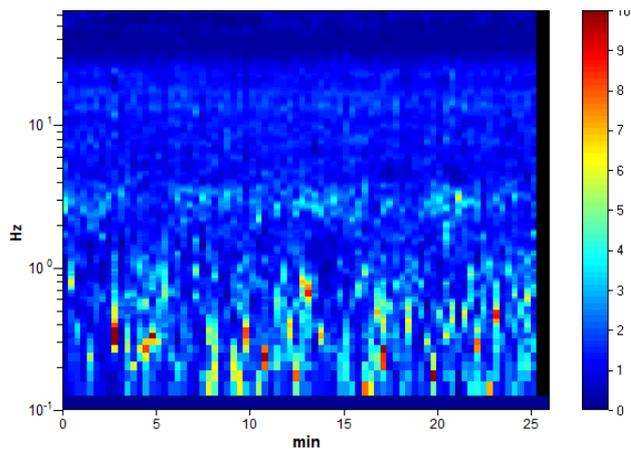


Figura 3.1: analisi temporale del rumore

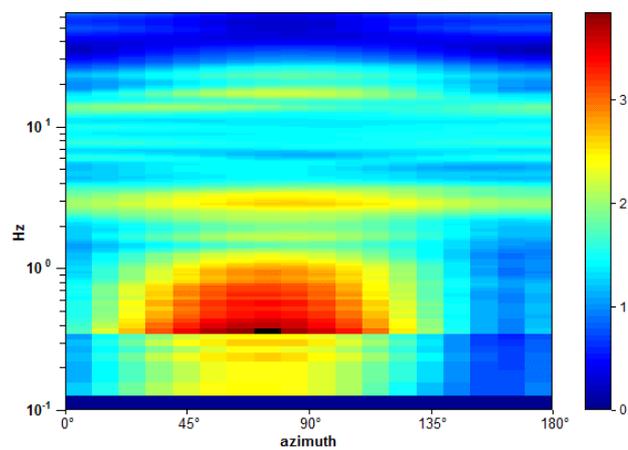


Figura 3.2: analisi direzionale del rumore

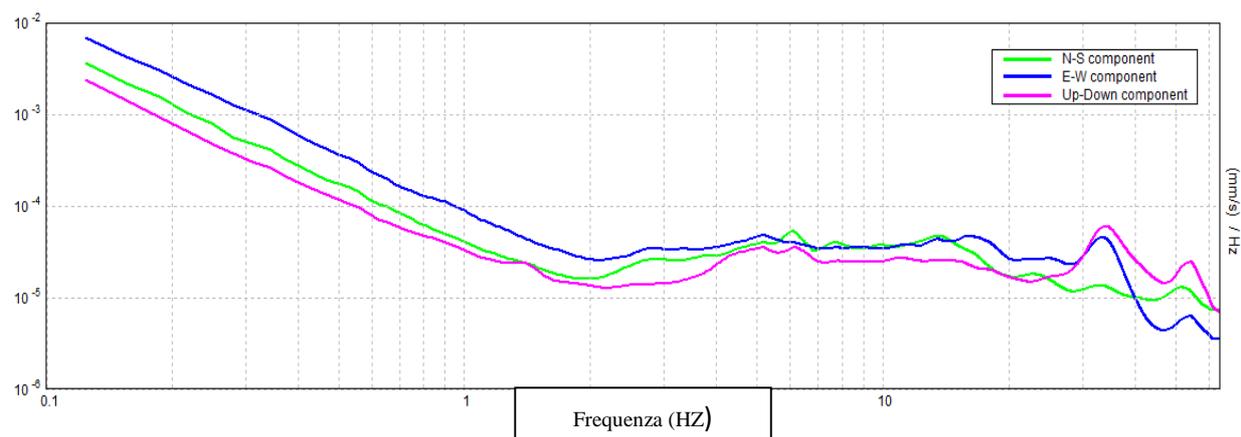


Figura 3.3: spettri delle 3 componenti

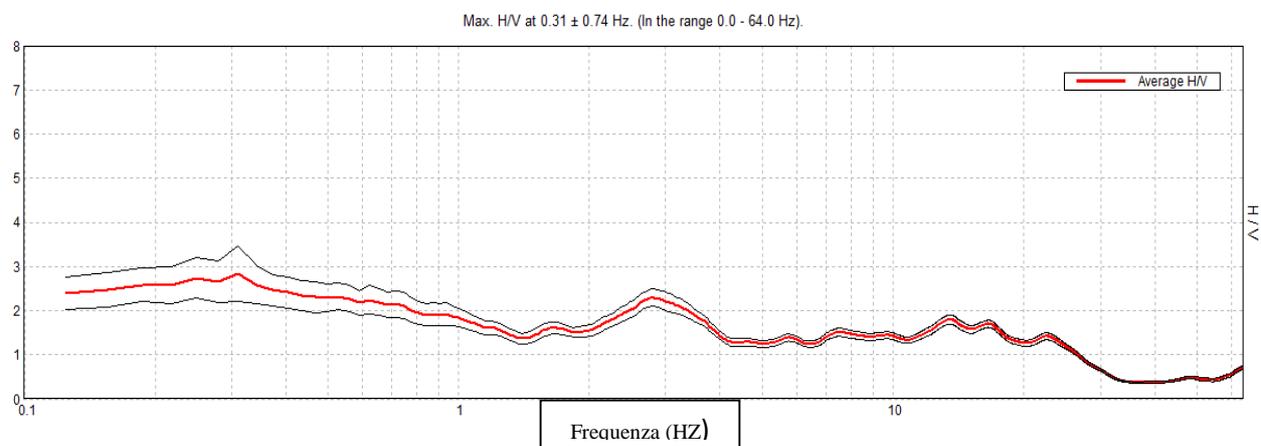


Figura 3.4: rapporto H/V

Una delle misure effettuate (HV) ha subito notevole influenza da rumore antropico. Tutte le tracce escludono la presenza di un netto contrasto di impedenza acustica nel sottosuolo. Non si individuano picchi di risonanza.

In termini di interpretazione del contrasto di impedenza acustica responsabile, eventuali picchi riscontrati, adottando secondo l'ipotesi  $\lambda/4$  una funzione di trasferimento di tipo:

$$F(\omega) = 1/\cos(\omega H/V_s)$$

La frequenza naturale ( $F_n$ ) di vibrazione dello strato di terreno corrisponde ai massimi della funzione di amplificazione:

$$F_n = \omega_n / 2\pi (V_s/4H)$$

con H profondità del rifrattore e  $V_s$  velocità delle onde sismiche di taglio, si può imporre la risonanza del sistema secondo la seguente relazione con T periodo proprio del suolo:

$$T = 2\pi/\omega = 4H/V_s$$

La situazione più pericolosa in termini di fenomeni di amplificazione si verifica quando la frequenza dell'eccitazione armonica ( $\omega$ ) è pari ad una delle frequenze fondamentali dello strato ( $\omega_n$ ). Quando si verifica tale condizione ( $\omega = \omega_n$ ) si ha la risonanza dello strato, ed il fattore di amplificazione è teoricamente infinito. E' quindi di fondamentale importanza porre attenzione ai fenomeni di "doppia risonanza", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei fabbricati.

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

$$\text{Freq. naturale edificio} \approx 10 \text{ Hz} / \text{numero piani}$$

E' la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

$$\text{Freq. naturale edificio} = \text{Freq. fondamentale di risonanza del sito}$$

ad essere particolarmente pericolosa, poiché dà luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.

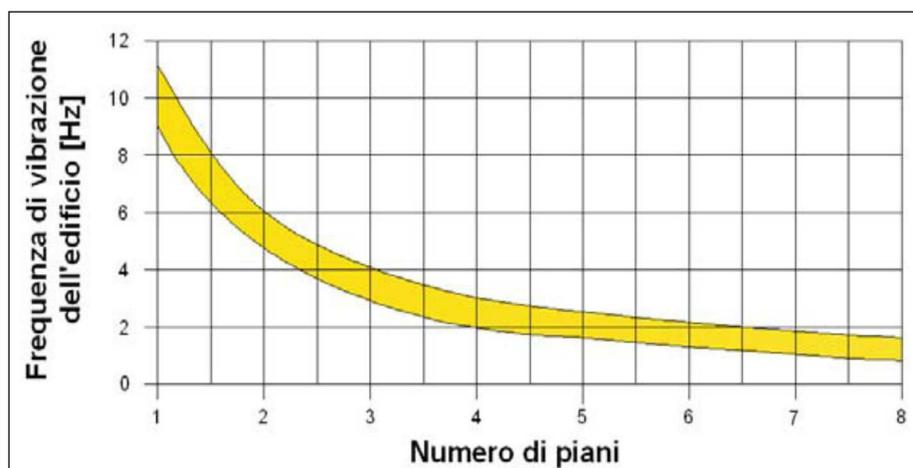


Tabella riassuntiva delle frequenze registrate in un range da 0,0 a 64,0 Hz:

| Sito di indagine | Frequenza max H/V |
|------------------|-------------------|
| HV               | 2,8 Hz            |

### Conclusioni HV<sub>13</sub>

Tutte le misurazioni sono state testate per validarne l'efficacia tramite i parametri suggeriti dal Progetto Europeo SESAME:

**Max. H/V at 0.31 ± 0.74 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).**

#### Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

|                                                                                                                                        |                            |           |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------|-----------|-----------|
| $f_0 > 10 / L_w$                                                                                                                       | 0.31 > 0.50                |           | <b>NO</b> |
| $\Omega_c(f_0) > 200$                                                                                                                  | 487.5 > 200                | <b>OK</b> |           |
| $\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$<br>$\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$ | Exceeded 0 out of 16 times | <b>OK</b> |           |

#### Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

|                                                            |                    |           |           |
|------------------------------------------------------------|--------------------|-----------|-----------|
| Exists $f^-$ in $[f_0/4, f_0]$   $A_{HV}(f^-) < A_0 / 2$   | 0.094 Hz           | <b>OK</b> |           |
| Exists $f^+$ in $[f_0, 4f_0]$   $A_{HV}(f^+) < A_0 / 2$    |                    |           | <b>NO</b> |
| $A_0 > 2$                                                  | 2.84 > 2           | <b>OK</b> |           |
| $f_{\text{peak}}[A_{HV}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$ | $ 2.37724  < 0.05$ |           | <b>NO</b> |
| $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$                              | 0.74289 < 0.0625   |           | <b>NO</b> |
| $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$                              | 0.6374 < 2.5       | <b>OK</b> |           |

|                               |                                                                                                                                     |
|-------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $L_w$                         | window length                                                                                                                       |
| $\Omega_w$                    | number of windows used in the analysis                                                                                              |
| $\Omega_c = L_w \Omega_w f_0$ | number of significant cycles                                                                                                        |
| $f$                           | current frequency                                                                                                                   |
| $f_0$                         | H/V peak frequency                                                                                                                  |
| $\sigma_f$                    | standard deviation of H/V peak frequency                                                                                            |
| $\varepsilon(f_0)$            | threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$                                                           |
| $A_0$                         | H/V peak amplitude at frequency $f_0$                                                                                               |
| $A_{HV}(f)$                   | H/V curve amplitude at frequency $f$                                                                                                |
| $f^-$                         | frequency between $f_0/4$ and $f_0$ for which $A_{HV}(f^-) < A_0/2$                                                                 |
| $f^+$                         | frequency between $f_0$ and $4f_0$ for which $A_{HV}(f^+) < A_0/2$                                                                  |
| $\sigma_A(f)$                 | standard deviation of $A_{HV}(f)$ , $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{HV}(f)$ curve should be multiplied or divided |
| $\sigma_{\log HV}(f)$         | standard deviation of $\log A_{HV}(f)$ curve                                                                                        |
| $\theta(f_0)$                 | threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$                                                             |

#### Threshold values for $\sigma_f$ and $\sigma_A(f_0)$

| Freq. range [Hz]                               | < 0.2      | 0.2 – 0.5 | 0.5 – 1.0  | 1.0 – 2.0  | > 2.0      |
|------------------------------------------------|------------|-----------|------------|------------|------------|
| $\varepsilon(f_0)$ [Hz]                        | 0.25 $f_0$ | 0.2 $f_0$ | 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 $\sigma_{\log HV}(f_0)$ | 0.48       | 0.40      | 0.30       | 0.25       | 0.20       |

La prova si è svolta in condizioni di basso rumore antropico (vicinanza ad una strada con moderato traffico- sorgente primaria antropica di disturbo)

Sulla base di queste considerazioni, il sito in esame presenta picchi di risonanza riscontrabile a **2,8 Hz**; i dati appaiono propri di un graduale e progressivo miglioramento delle condizioni meccaniche del sottosuolo sino a rilevanti profondità.

La frequenza propria del terreno si pone a  $F_0$  **2,8 Hz**.

Cison di Valmarino, 11/04/2015

il Geologo  
dott. Simone Bortolini

**STUDIO TECNICO DI GEOLOGIA APPLICATA ALL'INGEGNERIA**  
dott. geol. SIMONE BORTOLINI via San Vito, 9/A Cison di Valmarino (TV)  
tel. 338-1977870  
e-mail [simonebortolini@libero.it](mailto:simonebortolini@libero.it)

---

## Relazione

### Indagine sismica passiva HVSR

finalizzata all'individuazione delle [frequenze](#) caratteristiche di risonanza di sito.

---

## CDM\_HVSR 14

### CROCETTA DEL MONTELLO

#### Via Lodovico Boschieri

Coordinate WGS84

Lat. N 45,825295 Long. E 12,052105

Coordinate ED50

Lat. N 45,826194 Long. E 12,053105

---



il Geologo  
dott. Simone Bortolini

## **TECNICA DI MISURE ED INTERPRETAZIONE HVSR (tramite TROMINO)**

Tale prospezioni sismica si basa sull'acquisizione e sull'analisi del Rumore Sismico Ambientale (Seismic Noise) ovvero la continua vibrazione del suolo dovuta sia a cause antropiche che naturali. Questa tipologia di tecniche (definite metodi sismici passivi), dunque, non ha bisogno di alcuna energizzazione esterna poiché utilizza come sorgente il traffico veicolare, la produzione industriale, il vento, la pioggia e tutto ciò che è in grado di produrre una minima vibrazione sulla superficie del suolo.

In particolar modo con la tecnica a “Stazione Singola” viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero “Horizontal to Vertical Spectral Ratios) (Nakamura, Y. [1989]). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno e individuare la frequenza fondamentale ( $f$ ) di questa vibrazione. Sapendo che in generale esiste una relazione semplice fra  $f$ , lo spessore della parte più soffice del terreno (ovvero la parte di materiali sovrastante il bed-rock) e la velocità media ( $V_s$ ) delle onde sismiche nel sottosuolo, attraverso le misure HVSR è possibile risalire allo spessore di questo strato. Si possono inoltre effettuare delle considerazioni di tipo “qualitativo” molto utili in merito a possibili interferenze tra le frequenze risonanti del suolo e degli edifici sovrastanti.

Per la valutazione del periodo proprio di risonanza del sottosuolo è stata utilizzata la tecnica a stazione singola Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Kanai, 1957; Igarashi 1970; Nakamura 1989) che permette di estrarre informazioni relative alla frequenza di vibrazione del suolo a partire dagli spettri di rumore sismico registrati in sito. La tecnica prevede di calcolare il rapporto, in funzione della frequenza, tra gli spettri di risposta della componente orizzontale e verticale del moto dovuto ai microtremori ambientali. La misura di rumore sismico della durata di 26 minuti per ogni punto di misura è stata eseguita con una frequenza di campionamento a 128 Hz.

### **STRUMENTAZIONE IMPIEGATA**

#### Hardware

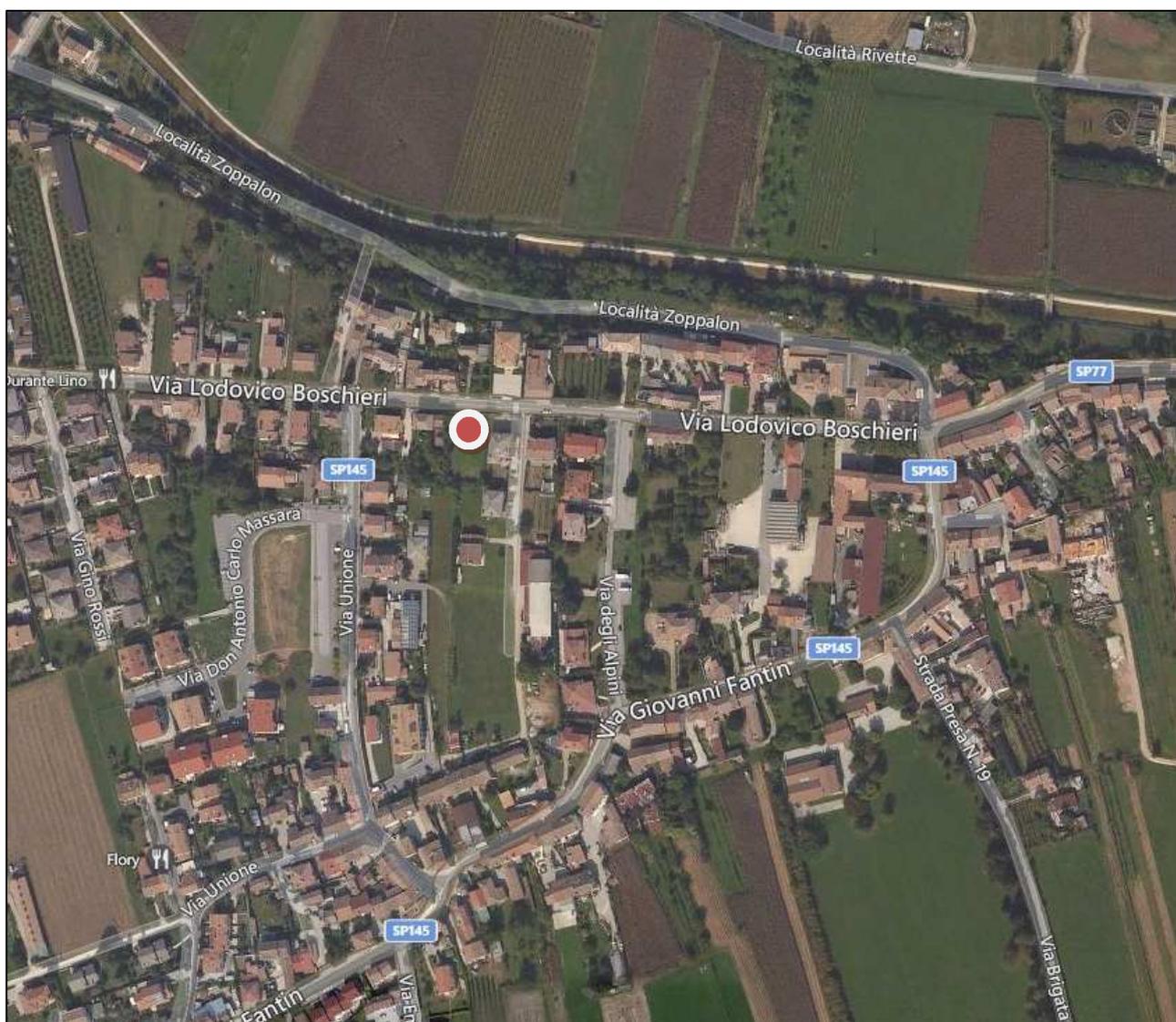
È stato utilizzato un tromografo digitale modello “Tromino” (Micromed srl) avente un intervallo di acquisizione sulle frequenze da 0.1 a 256 Hz, dotato di sistema di acquisizione digitale ad alta risoluzione (24 bit) e primo-processing interno. La livellazione micrometrica dello strumento è stata assicurata per ogni misura tramite bolla di precisione agendo sui tre punti di appoggio (punte) ed orientando uno dei 3 sensori di acquisizione (ortogonali tra loro) verso il N magnetico.

#### Software

Per le analisi dei dati acquisiti è stato adottato l'apposito software Grilla.

## Periodo proprio di risonanza del suolo (HV<sub>14</sub>)

La foto aerea mostra l'ubicazione della indagine denominata HV<sub>14</sub> (  ) indicante il punto di acquisizione di rumore sismico ambientale finalizzata alla definizione del periodo proprio del suolo.



Nello studio specifico degli effetti di sito, la frequenza di campionamento utilizzata è di 128 Hz, con tempi di misura dell'ordine di 26 minuti.

Per la misura, oltre allo spettro H/V, è palesata la trasformata delle singole componenti, l'analisi direzionale e temporale del rumore sismico acquisito.

## Analisi HV<sub>14</sub>

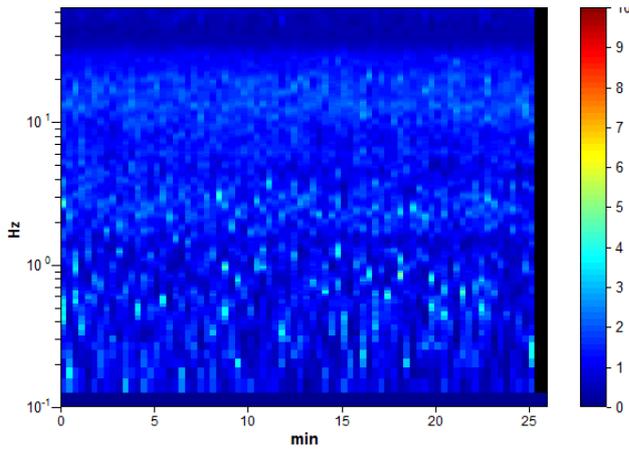


Figura 3.1: analisi temporale del rumore

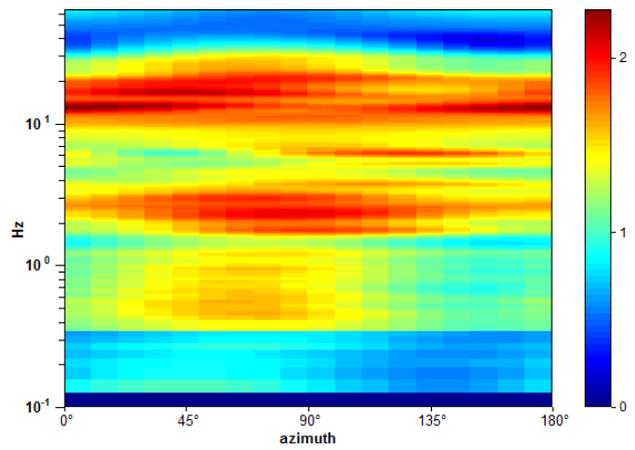


Figura 3.2: analisi direzionale del rumore

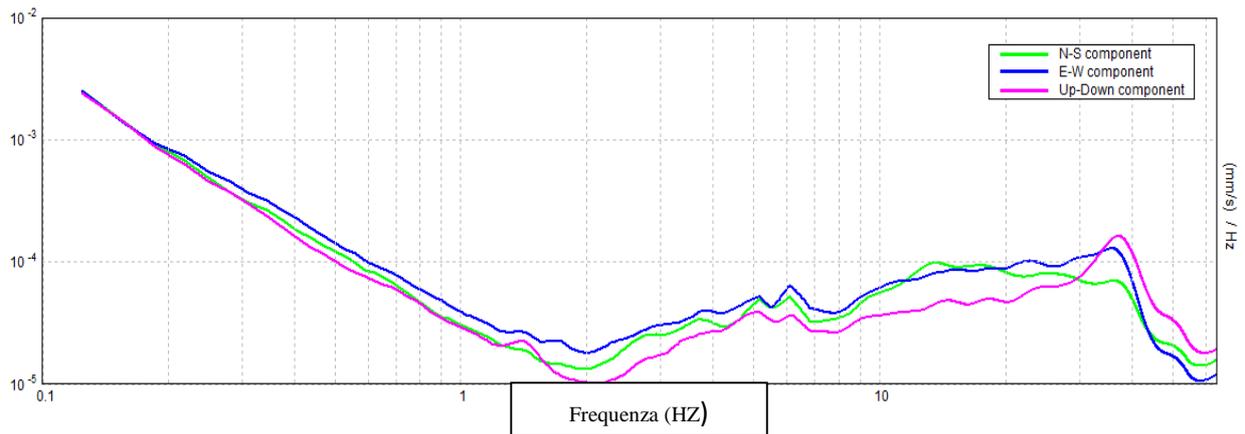


Figura 3.3: spettri delle 3 componenti

Max. H/V at 12.97 ± 4.54 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).

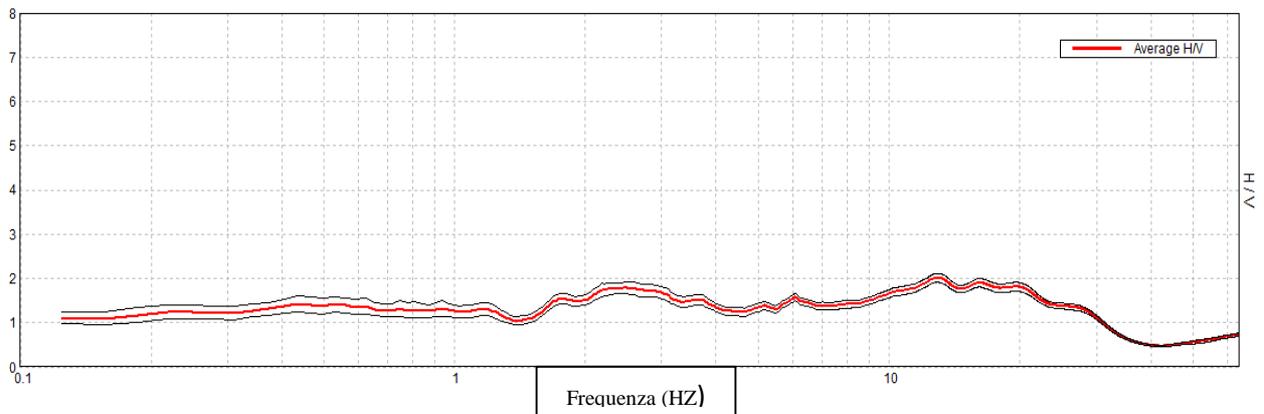


Figura 3.4: rapporto H/V

Una delle misure effettuate (HV) ha subito notevole influenza da rumore antropico. Tutte le tracce escludono la presenza di un netto contrasto di impedenza acustica nel sottosuolo. Non si individuano picchi di risonanza.

In termini di interpretazione del contrasto di impedenza acustica responsabile, eventuali picchi riscontrati, adottando secondo l'ipotesi  $\lambda/4$  una funzione di trasferimento di tipo:

$$F(\omega) = 1/\cos(\omega H/V_s)$$

La frequenza naturale ( $F_n$ ) di vibrazione dello strato di terreno corrisponde ai massimi della funzione di amplificazione:

$$F_n = \omega_n / 2\pi (V_s/4H)$$

con H profondità del rifrattore e  $V_s$  velocità delle onde sismiche di taglio, si può imporre la risonanza del sistema secondo la seguente relazione con T periodo proprio del suolo:

$$T = 2\pi/\omega = 4H/V_s$$

La situazione più pericolosa in termini di fenomeni di amplificazione si verifica quando la frequenza dell'eccitazione armonica ( $\omega$ ) è pari ad una delle frequenze fondamentali dello strato ( $\omega_n$ ). Quando si verifica tale condizione ( $\omega = \omega_n$ ) si ha la risonanza dello strato, ed il fattore di amplificazione è teoricamente infinito. E' quindi di fondamentale importanza porre attenzione ai fenomeni di "doppia risonanza", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei fabbricati.

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

$$\text{Freq. naturale edificio} \approx 10 \text{ Hz} / \text{numero piani}$$

E' la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

$$\text{Freq. naturale edificio} = \text{Freq. fondamentale di risonanza del sito}$$

ad essere particolarmente pericolosa, poiché dà luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.

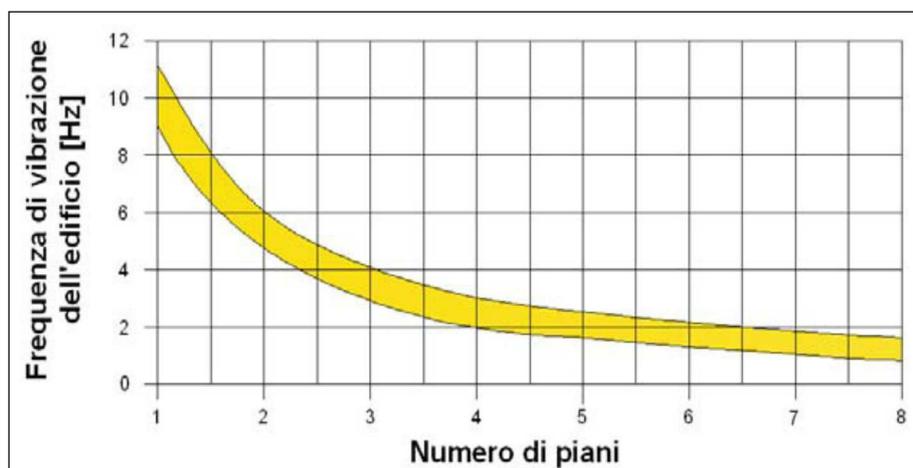


Tabella riassuntiva delle frequenze registrate in un range da 0,0 a 64,0 Hz:

| Sito di indagine | Frequenza max H/V       |
|------------------|-------------------------|
| HV               | 2,5 Hz; 6 Hz e 12,97 Hz |

## Conclusioni HV<sub>14</sub>

Tutte le misurazioni sono state testate per validarne l'efficacia tramite i parametri suggeriti dal Progetto Europeo SESAME:

**Max. H/V at 12.97 ± 4.54 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).**

### Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

|                                                                                                                                        |                             |    |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----|--|
| $f_0 > 10 / L_W$                                                                                                                       | 12.97 > 0.50                | OK |  |
| $n_c(f_0) > 200$                                                                                                                       | 20231.3 > 200               | OK |  |
| $\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$<br>$\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$ | Exceeded 0 out of 624 times | OK |  |

### Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

|                                                            |                    |    |    |
|------------------------------------------------------------|--------------------|----|----|
| Exists $f^-$ in $[f_0/4, f_0] \mid A_{HV}(f^-) < A_0 / 2$  |                    |    | NO |
| Exists $f^+$ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{HV}(f^+) < A_0 / 2$   | 30.969 Hz          | OK |    |
| $A_0 > 2$                                                  | 2.01 > 2           | OK |    |
| $f_{\text{peak}}[A_{HV}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$ | $ 0.34976  < 0.05$ |    | NO |
| $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$                              | 4.53601 < 0.64844  |    | NO |
| $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$                              | 0.1028 < 1.58      | OK |    |

|                           |                                                                                                                                     |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $L_W$                     | window length                                                                                                                       |
| $D_W$                     | number of windows used in the analysis                                                                                              |
| $n_c = L_W D_W f_0$       | number of significant cycles                                                                                                        |
| $f$                       | current frequency                                                                                                                   |
| $f_0$                     | H/V peak frequency                                                                                                                  |
| $\sigma_f$                | standard deviation of H/V peak frequency                                                                                            |
| $\varepsilon(f_0)$        | threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$                                                           |
| $A_0$                     | H/V peak amplitude at frequency $f_0$                                                                                               |
| $A_{HV}(f)$               | H/V curve amplitude at frequency $f$                                                                                                |
| $f^-$                     | frequency between $f_0/4$ and $f_0$ for which $A_{HV}(f^-) < A_0/2$                                                                 |
| $f^+$                     | frequency between $f_0$ and $4f_0$ for which $A_{HV}(f^+) < A_0/2$                                                                  |
| $\sigma_A(f)$             | standard deviation of $A_{HV}(f)$ , $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{HV}(f)$ curve should be multiplied or divided |
| $\sigma_{\log A_{HV}(f)}$ | standard deviation of $\log A_{HV}(f)$ curve                                                                                        |
| $\theta(f_0)$             | threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$                                                             |

### Threshold values for $\sigma_f$ and $\sigma_A(f_0)$

| Freq. range [Hz]                                   | < 0.2      | 0.2 – 0.5 | 0.5 – 1.0  | 1.0 – 2.0  | > 2.0      |
|----------------------------------------------------|------------|-----------|------------|------------|------------|
| $\varepsilon(f_0)$ [Hz]                            | 0.25 $f_0$ | 0.2 $f_0$ | 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 $\sigma_{\log A_{HV}(f_0)}$ | 0.48       | 0.40      | 0.30       | 0.25       | 0.20       |

La prova si è svolta in condizioni di basso rumore antropico (vicinanza ad una strada con moderato traffico- sorgente primaria antropica di disturbo)

Sulla base di queste considerazioni, il sito in esame presenta picchi di risonanza riscontrabili a **2,5 Hz; 6 Hz e 12,97 Hz**; i dati appaiono propri di un graduale e progressivo miglioramento delle condizioni meccaniche del sottosuolo sino a rilevanti profondità.

La frequenza propria del terreno si pone a  $F_0$  **2,5 Hz**.

Cison di Valmarino, 11/04/2015

il Geologo  
dott. Simone Bortolini

**STUDIO TECNICO DI GEOLOGIA APPLICATA ALL'INGEGNERIA**  
dott. geol. SIMONE BORTOLINI via San Vito, 9/A Cison di Valmarino (TV)  
tel. 338-1977870  
e-mail simonebortolini@libero.it

---

## **Relazione**

### **Indagine sismica passiva HVSR**

finalizzata all'individuazione delle [frequenze](#) caratteristiche di risonanza di sito.

---

## **CDM\_HVSR 15**

### **CROCETTA DEL MONTELLO**

#### **Via Gabriele D'Annunzio (Loc. Santa Mama)**

Coordinate WGS84

Lat. N 45,830785 Long. E 12,090049

Coordinate ED50

Lat. N 45,831684 Long. E 12,091048

---



il Geologo  
dott. Simone Bortolini

## **TECNICA DI MISURE ED INTERPRETAZIONE HVSR (tramite TROMINO)**

Tale prospezioni sismica si basa sull'acquisizione e sull'analisi del Rumore Sismico Ambientale (Seismic Noise) ovvero la continua vibrazione del suolo dovuta sia a cause antropiche che naturali. Questa tipologia di tecniche (definite metodi sismici passivi), dunque, non ha bisogno di alcuna energizzazione esterna poiché utilizza come sorgente il traffico veicolare, la produzione industriale, il vento, la pioggia e tutto ciò che è in grado di produrre una minima vibrazione sulla superficie del suolo.

In particolar modo con la tecnica a “Stazione Singola” viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero “Horizontal to Vertical Spectral Ratios) (Nakamura, Y. [1989]). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno e individuare la frequenza fondamentale ( $f$ ) di questa vibrazione. Sapendo che in generale esiste una relazione semplice fra  $f$ , lo spessore della parte più soffice del terreno (ovvero la parte di materiali sovrastante il bed-rock) e la velocità media ( $V_s$ ) delle onde sismiche nel sottosuolo, attraverso le misure HVSR è possibile risalire allo spessore di questo strato. Si possono inoltre effettuare delle considerazioni di tipo “qualitativo” molto utili in merito a possibili interferenze tra le frequenze risonanti del suolo e degli edifici sovrastanti.

Per la valutazione del periodo proprio di risonanza del sottosuolo è stata utilizzata la tecnica a stazione singola Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Kanai, 1957; Igarashi 1970; Nakamura 1989) che permette di estrarre informazioni relative alla frequenza di vibrazione del suolo a partire dagli spettri di rumore sismico registrati in sito. La tecnica prevede di calcolare il rapporto, in funzione della frequenza, tra gli spettri di risposta della componente orizzontale e verticale del moto dovuto ai microtremori ambientali. La misura di rumore sismico della durata di 26 minuti per ogni punto di misura è stata eseguita con una frequenza di campionamento a 128 Hz.

### **STRUMENTAZIONE IMPIEGATA**

#### Hardware

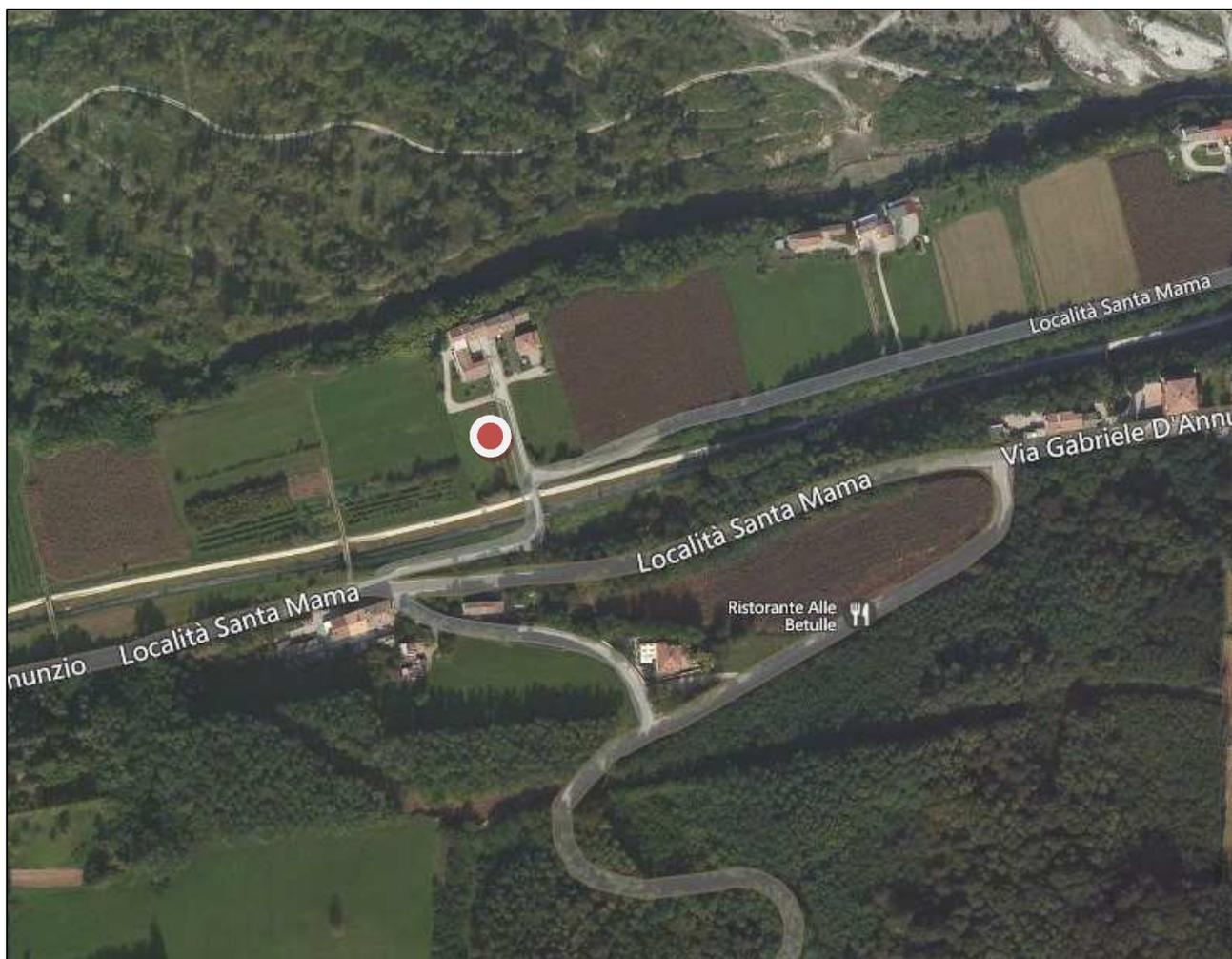
È stato utilizzato un tromografo digitale modello “Tromino” (Micromed srl) avente un intervallo di acquisizione sulle frequenze da 0.1 a 256 Hz, dotato di sistema di acquisizione digitale ad alta risoluzione (24 bit) e primo-processing interno. La livellazione micrometrica dello strumento è stata assicurata per ogni misura tramite bolla di precisione agendo sui tre punti di appoggio (punte) ed orientando uno dei 3 sensori di acquisizione (ortogonali tra loro) verso il N magnetico.

#### Software

Per le analisi dei dati acquisiti è stato adottato l'apposito software Grilla.

## Periodo proprio di risonanza del suolo (HV<sub>15</sub>)

La foto aerea mostra l'ubicazione della indagine denominata HV<sub>15</sub> (  ) indicante il punto di acquisizione di rumore sismico ambientale finalizzata alla definizione del periodo proprio del suolo.



Nello studio specifico degli effetti di sito, la frequenza di campionamento utilizzata è di 128 Hz, con tempi di misura dell'ordine di 26 minuti.

Per la misura, oltre allo spettro H/V, è palesata la trasformata delle singole componenti, l'analisi direzionale e temporale del rumore sismico acquisito.

## Analisi HV<sub>15</sub>

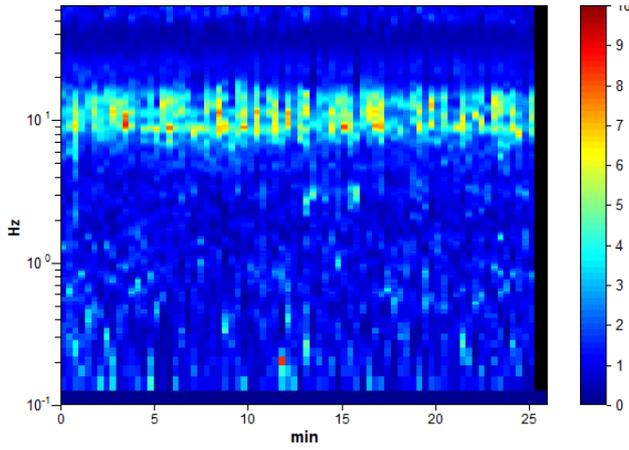


Figura 3.1: analisi temporale del rumore

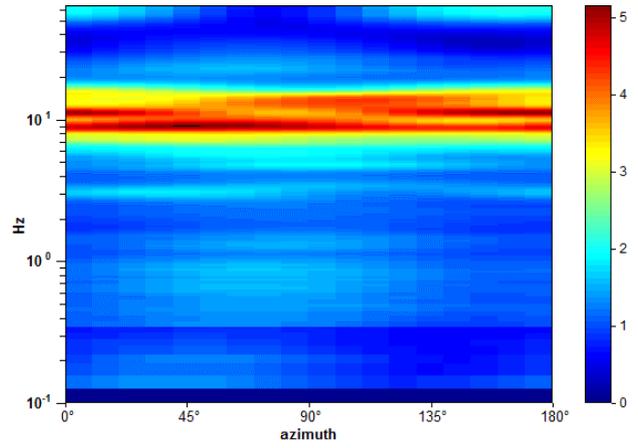


Figura 3.2: analisi direzionale del rumore

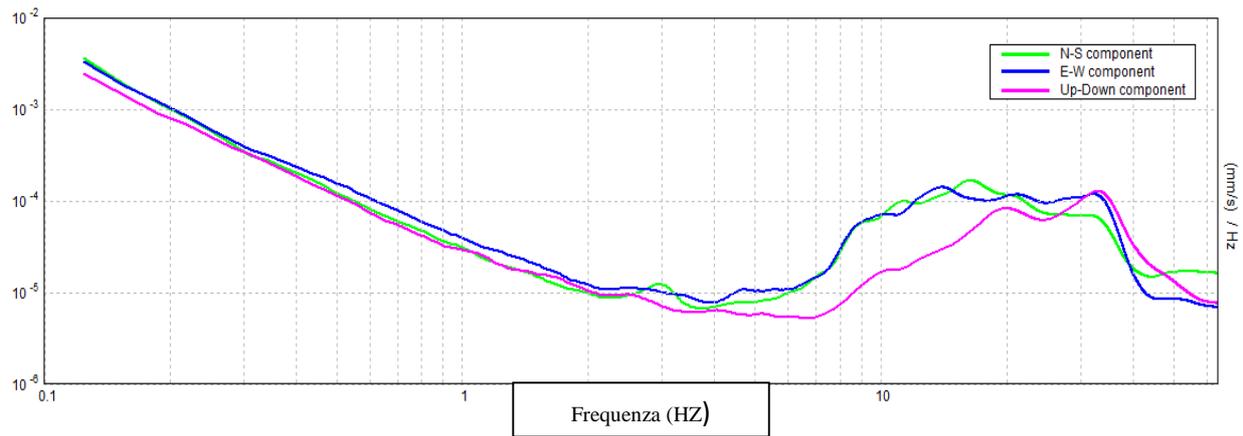


Figura 3.3: spettri delle 3 componenti

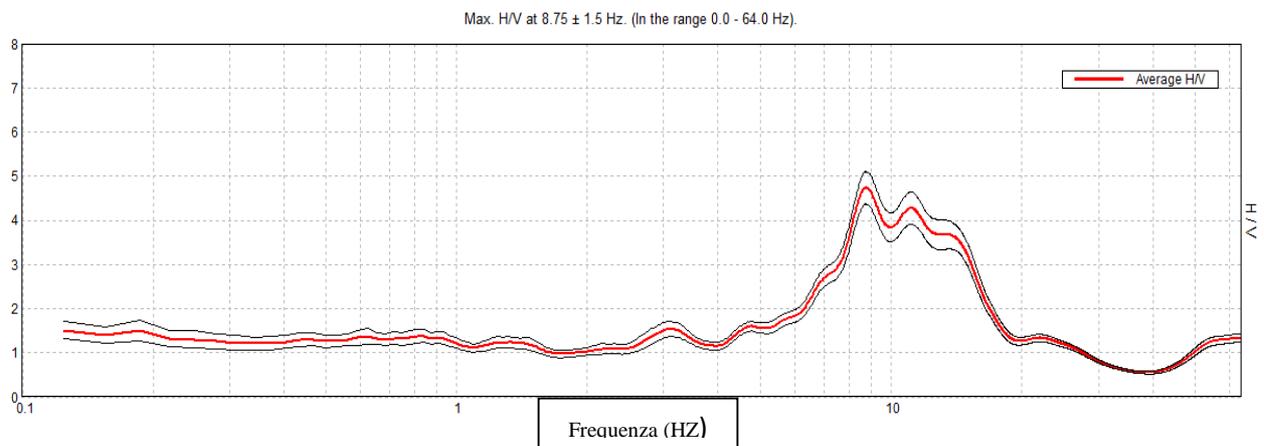


Figura 3.4: rapporto H/V

Una delle misure effettuate (HV) ha subito notevole influenza da rumore antropico. Tutte le tracce escludono la presenza di un netto contrasto di impedenza acustica nel sottosuolo. Non si individuano picchi di risonanza.

In termini di interpretazione del contrasto di impedenza acustica responsabile, eventuali picchi riscontrati, adottando secondo l'ipotesi  $\lambda/4$  una funzione di trasferimento di tipo:

$$F(\omega) = 1/\cos(\omega H/V_s)$$

La frequenza naturale ( $F_n$ ) di vibrazione dello strato di terreno corrisponde ai massimi della funzione di amplificazione:

$$F_n = \omega_n / 2\pi (V_s/4H)$$

con  $H$  profondità del rifrattore e  $V_s$  velocità delle onde sismiche di taglio, si può imporre la risonanza del sistema secondo la seguente relazione con  $T$  periodo proprio del suolo:

$$T = 2\pi/\omega = 4H/V_s$$

La situazione più pericolosa in termini di fenomeni di amplificazione si verifica quando la frequenza dell'eccitazione armonica ( $\omega$ ) è pari ad una delle frequenze fondamentali dello strato ( $\omega_n$ ). Quando si verifica tale condizione ( $\omega = \omega_n$ ) si ha la risonanza dello strato, ed il fattore di amplificazione è teoricamente infinito. E' quindi di fondamentale importanza porre attenzione ai fenomeni di "doppia risonanza", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei fabbricati.

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

$$\text{Freq. naturale edificio} \approx 10 \text{ Hz} / \text{numero piani}$$

E' la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

$$\text{Freq. naturale edificio} = \text{Freq. fondamentale di risonanza del sito}$$

ad essere particolarmente pericolosa, poiché dà luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.

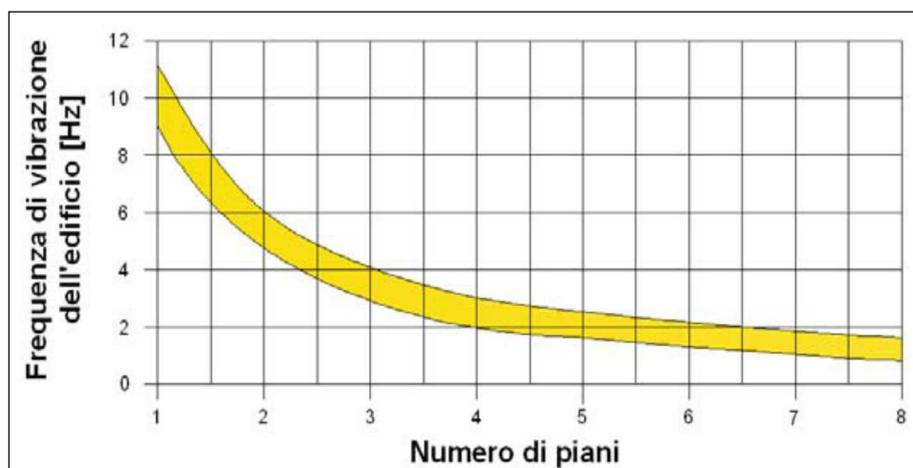


Tabella riassuntiva delle frequenze registrate in un range da 0,0 a 64,0 Hz:

| Sito di indagine | Frequenza max H/V |
|------------------|-------------------|
| HV               | 3 Hz e 8, 57 Hz   |

## Conclusioni HV<sub>15</sub>

Tutte le misurazioni sono state testate per validarne l'efficacia tramite i parametri suggeriti dal Progetto Europeo SESAME:

**Max. H/V at 8.75 ± 1.5 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).**

### Criteria for a reliable H/V curve

[All 3 should be fulfilled]

|                                                                                                                                        |                             |    |  |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----|--|
| $f_0 > 10 / L_w$                                                                                                                       | 8.75 > 0.50                 | OK |  |
| $n_c(f_0) > 200$                                                                                                                       | 13650.0 > 200               | OK |  |
| $\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$<br>$\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$ | Exceeded 0 out of 421 times | OK |  |

### Criteria for a clear H/V peak

[At least 5 out of 6 should be fulfilled]

|                                                            |                    |    |    |
|------------------------------------------------------------|--------------------|----|----|
| Exists $f^-$ in $[f_0/4, f_0]$   $A_{HV}(f^-) < A_0 / 2$   | 6.656 Hz           | OK |    |
| Exists $f^+$ in $[f_0, 4f_0]$   $A_{HV}(f^+) < A_0 / 2$    | 16.219 Hz          | OK |    |
| $A_0 > 2$                                                  | 4.75 > 2           | OK |    |
| $f_{\text{peak}}[A_{HV}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$ | $ 0.17197  < 0.05$ |    | NO |
| $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$                              | $1.50472 < 0.4375$ |    | NO |
| $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$                              | $0.3692 < 1.58$    | OK |    |

|                           |                                                                                                                                     |
|---------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $L_w$                     | window length                                                                                                                       |
| $D_w$                     | number of windows used in the analysis                                                                                              |
| $n_c = L_w D_w f_0$       | number of significant cycles                                                                                                        |
| $f$                       | current frequency                                                                                                                   |
| $f_0$                     | H/V peak frequency                                                                                                                  |
| $\sigma_f$                | standard deviation of H/V peak frequency                                                                                            |
| $\varepsilon(f_0)$        | threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$                                                           |
| $A_0$                     | H/V peak amplitude at frequency $f_0$                                                                                               |
| $A_{HV}(f)$               | H/V curve amplitude at frequency $f$                                                                                                |
| $f^-$                     | frequency between $f_0/4$ and $f_0$ for which $A_{HV}(f^-) < A_0/2$                                                                 |
| $f^+$                     | frequency between $f_0$ and $4f_0$ for which $A_{HV}(f^+) < A_0/2$                                                                  |
| $\sigma_A(f)$             | standard deviation of $A_{HV}(f)$ , $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{HV}(f)$ curve should be multiplied or divided |
| $\sigma_{\log A_{HV}(f)}$ | standard deviation of $\log A_{HV}(f)$ curve                                                                                        |
| $\theta(f_0)$             | threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$                                                             |

### Threshold values for $\sigma_f$ and $\sigma_A(f_0)$

| Freq. range [Hz]                                   | < 0.2      | 0.2 – 0.5 | 0.5 – 1.0  | 1.0 – 2.0  | > 2.0      |
|----------------------------------------------------|------------|-----------|------------|------------|------------|
| $\varepsilon(f_0)$ [Hz]                            | 0.25 $f_0$ | 0.2 $f_0$ | 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 $\sigma_{\log A_{HV}(f_0)}$ | 0.48       | 0.40      | 0.30       | 0.25       | 0.20       |

La prova si è svolta in condizioni di basso rumore antropico (vicinanza ad una strada con moderato traffico- sorgente primaria antropica di disturbo)

Sulla base di queste considerazioni, il sito in esame presenta picchi di risonanza riscontrabili a **3 Hz** e **8, 57 Hz**; i dati appaiono propri di un graduale e progressivo miglioramento delle condizioni meccaniche del sottosuolo sino a rilevanti profondità.

La frequenza propria del terreno si pone a  $F_0$  **3 Hz**.

Cison di Valmarino, 11/04/2015

il Geologo  
dott. Simone Bortolini

**STUDIO TECNICO DI GEOLOGIA APPLICATA ALL'INGEGNERIA**  
dott. geol. SIMONE BORTOLINI via San Vito, 9/A Cison di Valmarino (TV)  
tel. 338-1977870  
e-mail simonebortolini@libero.it

---

## **Relazione**

### **Indagine sismica passiva HVSR**

finalizzata all'individuazione delle [frequenze](#) caratteristiche di risonanza di sito.

---

## **CDM\_HVSR 16**

### **CROCETTA DEL MONTELLO**

#### **Località Rivette**

Coordinate WGS84

Lat. N 45,828928 Long. E 12,049073

Coordinate ED50

Lat. N 45,829827 Long. E 12,050073

---



il Geologo  
dott. Simone Bortolini

## **TECNICA DI MISURE ED INTERPRETAZIONE HVSR (tramite TROMINO)**

Tale prospezioni sismica si basa sull'acquisizione e sull'analisi del Rumore Sismico Ambientale (Seismic Noise) ovvero la continua vibrazione del suolo dovuta sia a cause antropiche che naturali. Questa tipologia di tecniche (definite metodi sismici passivi), dunque, non ha bisogno di alcuna energizzazione esterna poiché utilizza come sorgente il traffico veicolare, la produzione industriale, il vento, la pioggia e tutto ciò che è in grado di produrre una minima vibrazione sulla superficie del suolo.

In particolar modo con la tecnica a “Stazione Singola” viene valutato il rapporto di ampiezza fra le componenti orizzontali e verticali del moto (metodo HVSR ovvero “Horizontal to Vertical Spectral Ratios) (Nakamura, Y. [1989]). Analizzando misure di questo tipo è possibile identificare le modalità di vibrazione del terreno e individuare la frequenza fondamentale ( $f$ ) di questa vibrazione. Sapendo che in generale esiste una relazione semplice fra  $f$ , lo spessore della parte più soffice del terreno (ovvero la parte di materiali sovrastante il bed-rock) e la velocità media ( $V_s$ ) delle onde sismiche nel sottosuolo, attraverso le misure HVSR è possibile risalire allo spessore di questo strato. Si possono inoltre effettuare delle considerazioni di tipo “qualitativo” molto utili in merito a possibili interferenze tra le frequenze risonanti del suolo e degli edifici sovrastanti.

Per la valutazione del periodo proprio di risonanza del sottosuolo è stata utilizzata la tecnica a stazione singola Horizontal to Vertical Spectral Ratio (Kanai, 1957; Igarashi 1970; Nakamura 1989) che permette di estrarre informazioni relative alla frequenza di vibrazione del suolo a partire dagli spettri di rumore sismico registrati in sito. La tecnica prevede di calcolare il rapporto, in funzione della frequenza, tra gli spettri di risposta della componente orizzontale e verticale del moto dovuto ai microtremori ambientali. La misura di rumore sismico della durata di 26 minuti per ogni punto di misura è stata eseguita con una frequenza di campionamento a 128 Hz.

### **STRUMENTAZIONE IMPIEGATA**

#### Hardware

È stato utilizzato un tromografo digitale modello “Tromino” (Micromed srl) avente un intervallo di acquisizione sulle frequenze da 0.1 a 256 Hz, dotato di sistema di acquisizione digitale ad alta risoluzione (24 bit) e primo-processing interno. La livellazione micrometrica dello strumento è stata assicurata per ogni misura tramite bolla di precisione agendo sui tre punti di appoggio (punte) ed orientando uno dei 3 sensori di acquisizione (ortogonali tra loro) verso il N magnetico.

#### Software

Per le analisi dei dati acquisiti è stato adottato l'apposito software Grilla.

## Periodo proprio di risonanza del suolo (HV<sub>16</sub>)

La foto aerea mostra l'ubicazione della indagine denominata HV<sub>16</sub> (  ) indicante il punto di acquisizione di rumore sismico ambientale finalizzata alla definizione del periodo proprio del suolo.



Nello studio specifico degli effetti di sito, la frequenza di campionamento utilizzata è di 128 Hz, con tempi di misura dell'ordine di 26 minuti.

Per la misura, oltre allo spettro H/V, è palesata la trasformata delle singole componenti, l'analisi direzionale e temporale del rumore sismico acquisito.

## Analisi HV<sub>16</sub>

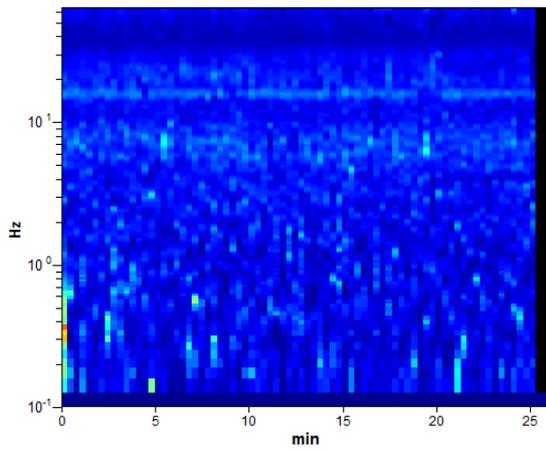


Figura 3.1: analisi temporale del rumore

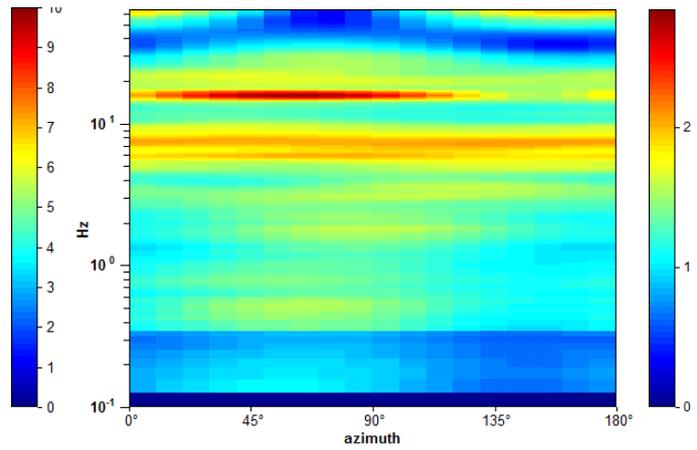


Figura 3.2: analisi direzionale del rumore

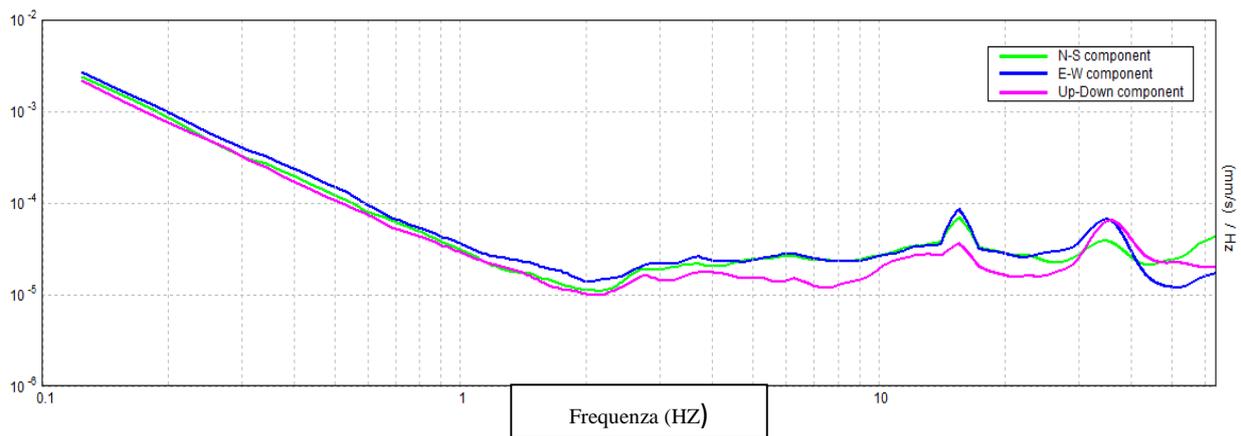


Figura 3.3: spettri delle 3 componenti

Max. H/V at 15.56 ± 4.59 Hz. (In the range 0.0 - 64.0 Hz).

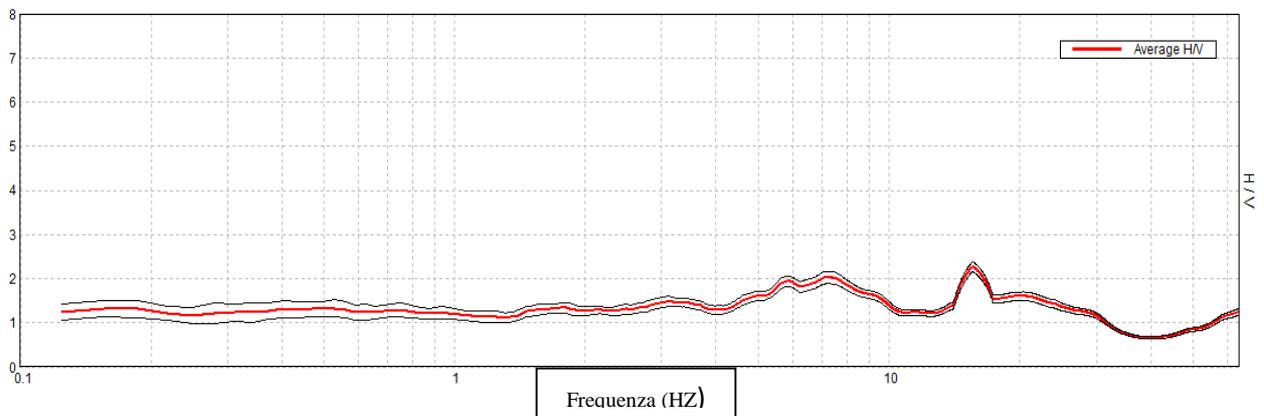


Figura 3.4: rapporto H/V

Una delle misure effettuate (HV) ha subito notevole influenza da rumore antropico. Tutte le tracce escludono la presenza di un netto contrasto di impedenza acustica nel sottosuolo. Non si individuano picchi di risonanza.

In termini di interpretazione del contrasto di impedenza acustica responsabile, eventuali picchi riscontrati, adottando secondo l'ipotesi  $\lambda/4$  una funzione di trasferimento di tipo:

$$F(\omega) = 1/\cos(\omega H/V_s)$$

La frequenza naturale ( $F_n$ ) di vibrazione dello strato di terreno corrisponde ai massimi della funzione di amplificazione:

$$F_n = \omega_n / 2\pi (V_s/4H)$$

con H profondità del rifrattore e  $V_s$  velocità delle onde sismiche di taglio, si può imporre la risonanza del sistema secondo la seguente relazione con T periodo proprio del suolo:

$$T = 2\pi/\omega = 4H/V_s$$

La situazione più pericolosa in termini di fenomeni di amplificazione si verifica quando la frequenza dell'eccitazione armonica ( $\omega$ ) è pari ad una delle frequenze fondamentali dello strato ( $\omega_n$ ). Quando si verifica tale condizione ( $\omega = \omega_n$ ) si ha la risonanza dello strato, ed il fattore di amplificazione è teoricamente infinito. E' quindi di fondamentale importanza porre attenzione ai fenomeni di "doppia risonanza", cioè la corrispondenza tra le frequenze fondamentali del segnale sismico così come trasmesso in superficie e quelle dei fabbricati.

Dal punto di vista empirico, è noto che la frequenza di risonanza di un edificio è governata principalmente dall'altezza e può essere pertanto calcolata, in prima approssimazione, secondo la formula (cfr. Es. Pratt):

$$\text{Freq. naturale edificio} \approx 10 \text{ Hz} / \text{numero piani}$$

E' la coincidenza di risonanza tra terreno e struttura:

$$\text{Freq. naturale edificio} = \text{Freq. fondamentale di risonanza del sito}$$

ad essere particolarmente pericolosa, poiché dà luogo alla massima amplificazione e deve quindi essere oggetto di studi approfonditi.

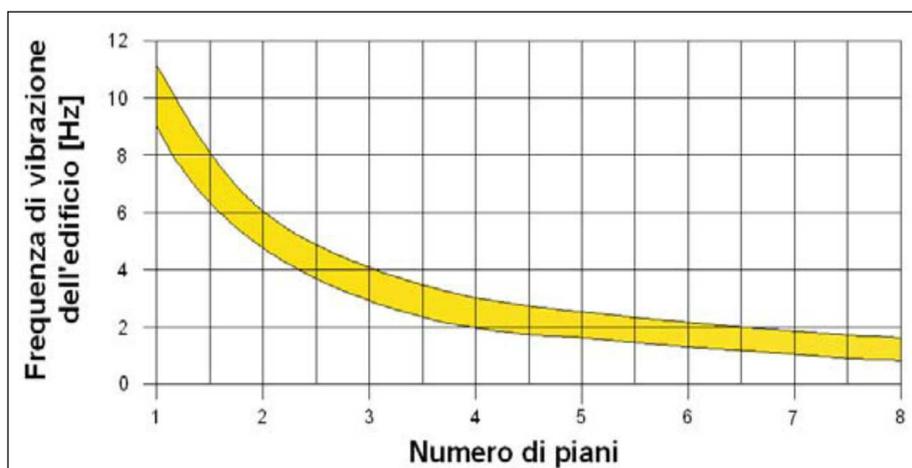


Tabella riassuntiva delle frequenze registrate in un range da 0,0 a 64,0 Hz:

| Sito di indagine | Frequenza max H/V |
|------------------|-------------------|
| HV               | 7 Hz e 15,56 Hz   |

## Conclusioni HV<sub>16</sub>

Tutte le misurazioni sono state testate per validarne l'efficacia tramite i parametri suggeriti dal Progetto Europeo SESAME:

**Max. H/V at 15.56 ± 4.59 Hz (in the range 0.0 - 64.0 Hz).**

| <b>Criteria for a reliable H/V curve</b><br>[All 3 should be fulfilled]                                                                |                             |    |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|----|----|
| $f_0 > 10 / L_w$                                                                                                                       | 15.56 > 0.50                | OK |    |
| $n_c(f_0) > 200$                                                                                                                       | 24277.5 > 200               | OK |    |
| $\sigma_A(f) < 2$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 > 0.5\text{Hz}$<br>$\sigma_A(f) < 3$ for $0.5f_0 < f < 2f_0$ if $f_0 < 0.5\text{Hz}$ | Exceeded 0 out of 748 times | OK |    |
| <b>Criteria for a clear H/V peak</b><br>[At least 5 out of 6 should be fulfilled]                                                      |                             |    |    |
| Exists $f^-$ in $[f_0/4, f_0] \mid A_{HV}(f^-) < A_0 / 2$                                                                              |                             |    | NO |
| Exists $f^+$ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{HV}(f^+) < A_0 / 2$                                                                               | 30.313 Hz                   | OK |    |
| $A_0 > 2$                                                                                                                              | 2.27 > 2                    | OK |    |
| $f_{\text{peak}}[A_{HV}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$                                                                             | $ 0.29486  < 0.05$          |    | NO |
| $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$                                                                                                          | 4.58879 < 0.77813           |    | NO |
| $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$                                                                                                          | 0.1115 < 1.58               | OK |    |

|                       |                                                                                                                                     |
|-----------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $L_w$                 | window length                                                                                                                       |
| $N_w$                 | number of windows used in the analysis                                                                                              |
| $n_c = L_w N_w f_0$   | number of significant cycles                                                                                                        |
| $f$                   | current frequency                                                                                                                   |
| $f_0$                 | H/V peak frequency                                                                                                                  |
| $\sigma_f$            | standard deviation of H/V peak frequency                                                                                            |
| $\varepsilon(f_0)$    | threshold value for the stability condition $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$                                                           |
| $A_0$                 | H/V peak amplitude at frequency $f_0$                                                                                               |
| $A_{HV}(f)$           | H/V curve amplitude at frequency $f$                                                                                                |
| $f^-$                 | frequency between $f_0/4$ and $f_0$ for which $A_{HV}(f^-) < A_0/2$                                                                 |
| $f^+$                 | frequency between $f_0$ and $4f_0$ for which $A_{HV}(f^+) < A_0/2$                                                                  |
| $\sigma_A(f)$         | standard deviation of $A_{HV}(f)$ , $\sigma_A(f)$ is the factor by which the mean $A_{HV}(f)$ curve should be multiplied or divided |
| $\sigma_{\log HV}(f)$ | standard deviation of $\log A_{HV}(f)$ curve                                                                                        |
| $\theta(f_0)$         | threshold value for the stability condition $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$                                                             |

| Threshold values for $\sigma_f$ and $\sigma_A(f_0)$ |            |           |            |            |            |
|-----------------------------------------------------|------------|-----------|------------|------------|------------|
| Freq. range [Hz]                                    | < 0.2      | 0.2 – 0.5 | 0.5 – 1.0  | 1.0 – 2.0  | > 2.0      |
| $\varepsilon(f_0)$ [Hz]                             | 0.25 $f_0$ | 0.2 $f_0$ | 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 $\sigma_{\log HV}(f_0)$      | 0.48       | 0.40      | 0.30       | 0.25       | 0.20       |

La prova si è svolta in condizioni di basso rumore antropico (vicinanza ad una strada con moderato traffico- sorgente primaria antropica di disturbo)

Sulla base di queste considerazioni, il sito in esame presenta picchi di risonanza riscontrabili a **7 Hz** e **15,56 Hz**; i dati appaiono propri di un graduale e progressivo miglioramento delle condizioni meccaniche del sottosuolo sino a rilevanti profondità.

La frequenza propria del terreno si pone a  $F_0$  **7 Hz**.

Cison di Valmarino, 11/04/2015

il Geologo  
dott. Simone Bortolini