

POLITECNICO DI MILANO  
Facoltà di Ingegneria Civile, Ambientale e Territoriale  
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile  
Infrastrutture di trasporto



**Indagini HVSR e di sismica a rifrazione nello  
studio della frana di Piuro (SO)**

Relatore: Prof. Maurizio Lualdi

Correlatore: Federico Lombardi

Tesi di Laurea di:  
Rampellini Mattia  
Matricola 918657

Anno Accademico 2019/2020





# Ringraziamenti

Tengo particolarmente a ringraziare innanzitutto il mio relatore, Prof. Maurizio Lualdi per la sua disponibilità a seguirmi nel percorso di redazione di questo lavoro, per i suoi consigli, la sua pazienza e la sua puntualità negli aggiornamenti settimanali sul proseguo dell'elaborato. Il tutto a distanza, perché in periodo Covid, non potendo incontrarci è stata l'unica soluzione.

Un grazie è rivolto a Federico Lombardi per la supervisione del lavoro.

Vorrei ringraziare Anna Zinetti, per il passaggio di testimone del suo studio svolto sulla frana di Piuro essendosene occupata nella sua tesi.

Grazie ai Professori dell'Università Statale di Milano e del Politecnico di Milano per la collaborazione in questo lavoro.

Ringrazio la mia famiglia per avermi permesso di intraprendere un sereno percorso di studi. Nonni, zii, cugini grazie anche a voi per il supporto, non riesco a nominarvi tutti quanti altrimenti il testo verrebbe troppo lungo dato che siete tantissimi.

Un grazie ai miei compagni delle superiori, amici di vecchia data e anche ai nuovi conosciuti a Milano nel periodo della Magistrale.

# Indice dei contenuti

<b>RINGRAZIAMENTI.....</b>	<b>4</b>
<b>INDICE DEI CONTENUTI .....</b>	<b>5</b>
<b>INDICE DELLE FIGURE.....</b>	<b>7</b>
<b>INDICE DELLE TABELLE.....</b>	<b>10</b>
<b>CAPITOLO 1 INTRODUZIONE.....</b>	<b>11</b>
1.1 LA FRANA DI PIURO .....	12
1.1.1 <i>Inquadramento storico</i> .....	12
1.1.2 <i>Inquadramento geologico</i> .....	14
1.2 STUDI GIÀ EFFETTUATI SULLA FRANA DI PIURO .....	16
1.3 DUPLICE OBIETTIVO DELL'ELABORATO: VALUTAZIONE PROFONDITÀ DEL BEDROCK E STUDIO SUPERFICIALE DELLA FRANA.....	17
<b>CAPITOLO 2 LE ONDE SISMICHE.....</b>	<b>18</b>
2.1 ONDE DI VOLUME .....	18
2.2 ONDE DI SUPERFICIE.....	21
2.3 ATTENUAZIONE GEOMETRICA DELLE ONDE SISMICHE.....	23
<b>CAPITOLO 3 RUMORE SISMICO E METODO H/V .....</b>	<b>26</b>
3.1 IL RUMORE SISMICO.....	26
3.2 LA TEORIA ALLA BASE DEL METODO .....	27
3.3 CRITERI SESAME E ORIZZONTALITÀ DEI LAYER.....	30
<b>CAPITOLO 4 STIMA PROFONDITÀ DEL BEDROCK.....</b>	<b>34</b>
4.1 DATI A DISPOSIZIONE.....	34
4.2 ELABORAZIONE DELLE ACQUISIZIONI MEDIANTE SOFTWARE GEOPSY .....	36
4.3 RISULTATI OTTENUTI .....	38
4.4 IMPORTAZIONE DEI RISULTATI SU SOFTWARE QGIS .....	46
4.5 VALUTAZIONI FINALI SULLA DISPOSIZIONE DELLE FREQUENZE DI RISONANZA NEL SITO .....	54
4.6 CONCLUSIONI SULL'ANDAMENTO DEL BEDROCK IN BASE AI RISULTATI OTTENUTI .....	56
<b>CAPITOLO 5 CARATTERIZZAZIONE DEL CORPO DI FRANA.....</b>	<b>61</b>

---

5.1 REALIZZAZIONE DI UN CAROTAGGIO .....	61
5.2 SISMICA A RIFRAZIONE .....	63
5.3 IL METODO APPLICATO AL CONTESTO DI PIURO .....	64
5.4 RISULTATI OTTENUTI.....	66
<b>CAPITOLO 6 CONCLUSIONI.....</b>	<b>70</b>
6.1 BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA.....	72
6.2 APPENDICE: RILIEVI MISURE HVSR.....	74

# Indice delle figure

FIGURA 1.1. PANORAMICA E LOCALIZZAZIONE DI PIURO. ....	11
FIGURA 1.2. AFFRESCO RAPPRESENTANTE IL BORGO PRIMA DELLA CATASTROFE. DA .....	13
FIGURA 1.3. RICOSTRUZIONE PLASTIGRAFICA DI PIURO PRIMA DELL'EVENTO FRANOSO. ....	14
FIGURA 1.4. RICOSTRUZIONE PLASTIGRAFICA DI PIURO IN SEGUITO ALL'EVENTO FRANOSO. ....	15
FIGURA 2.1. RAPPRESENTAZIONE MODULO DI BULK E MODULO DI TAGLIO. DA: “P.ROBUSTINI/GEOLOGIA/ELEMENTI DI GEODINAMICA/I MODULI ELASTICI/” .....	19
FIGURA 2.2. MOTO DI PROPAGAZIONE ONDE P. ....	20
FIGURA 2.3. MOTO DI PROPAGAZIONE ONDE S. ....	21
FIGURA 2.4. MOTO DI PROPAGAZIONE ONDE L. ....	22
FIGURA 2.5. MOTO DI PROPAGAZIONE ONDE R. ....	23
FIGURA 2.6. PRINCIPALI FRONTI D'ONDA. DA: “DISPENSA PROF. C. MADI AI CORSO DI ING. GEOTECNICA SISMICA- RICHIAMI PROPAGAZIONE ONDE-UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FIRENZE” .....	24
FIGURA 2.7. ATTENUAZIONE DELLE ONDE. DA: “DISPENSA PROF. C. MADI AI CORSO DI ING. GEOTECNICA SISMICA- RICHIAMI PROPAGAZIONE ONDE-UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FIRENZE” .....	25
FIGURA 3.1. STRUTTURA GEOLOGICA DI RIFERIMENTO .....	28
FIGURA 3.2. ESEMPI DI CURVE H/V. DA “CARATTERIZZAZIONE DINAMICA DEL SOTTOSUOLO AI FINI DELL'INGEGNERIA SISMICA, S.CASTELLARO” .....	29
FIGURA 3.3. SPETTRI DELLE SINGOLE COMPONENTI DEL MOTO. DA “CARATTERIZZAZIONE DINAMICA DEL SOTTOSUOLO AI FINI DELL'INGEGNERIA SISMICA, S.CASTELLARO” .....	30
FIGURA 4.1. SISMOMETRO, BATTERIA, DIGITALIZZATORE, ANTENNA GPS. DA “ANALISI DI FATTIBILITÀ SULL'UTILIZZO DI METODI GEOFISICI PER LO STUDIO DELLA FRANA DI PIURO (SO)” TESI DI ANNA ZINETTI. ....	35
FIGURA 4.2. MISURE HVSR REALIZZATE DA POLIMI. DA “ANALISI DI FATTIBILITÀ SULL'UTILIZZO DI METODI GEOFISICI PER LO STUDIO DELLA FRANA DI PIURO (SO)” TESI DI ANNA ZINETTI. ....	35
FIGURA 4.3. LE TRE COMPONENTI DEL RUMORE AMBIENTALE IMPORTATE IN GEOPSY. ....	36
FIGURA 4.4. ESEMPIO DI SUDDIVISIONE IN FINESTRE TEMPORALI DEL RUMORE REGISTRATO. ....	37
FIGURA 4.5. RAPPRESENTAZIONE DELLA TOTALITÀ DEI DATI SUDDIVISI PER BANDE DI FREQUENZA. ....	40
FIGURA 4.6. CRITERI SESAME RISPETTATI. ....	41

FIGURA 4.7. <i>PICCO CHE VERIFICA TUTTI I CRITERI SESAME.</i> .....	42
FIGURA 4.8. <i>PICCO CHE VERIFICA QUATTRO CRITERI SU SEI.</i> .....	42
FIGURA 4.9. <i>PICCO CHE VERIFICA TRE CRITERI SU SEI.</i> .....	43
FIGURA 4.10. <i>PICCO CHE VERIFICA DUE SOLI CRITERI.</i> .....	43
FIGURA 4.11. <i>DISTRIBUZIONE FREQUENZE CHE SODDISFANO 5 E 6 CRITERI SESAME.</i> .....	44
FIGURA 4.12. <i>DISTRIBUZIONE FREQUENZE CHE SODDISFANO 4 CRITERI SESAME.</i> .....	44
FIGURA 4.13. <i>DISTRIBUZIONE FREQUENZE CHE SODDISFANO 3 CRITERI SESAME.</i> .....	45
FIGURA 4.14. <i>DISTRIBUZIONE FREQUENZE CHE SODDISFANO 1 E 2 CRITERI SESAME.</i> .....	45
FIGURA 4.15. <i>RIASSUNTO DELLA TOTALITÀ DEI DATI. FREQUENZE – CRITERI SODDISFATTI.</i> .....	46
FIGURA 4.16. <i>BORGONUOVO DI PIURO: LE QUATTRO AREE CONSIDERATE. FONTE GOOGLE MAPS.</i> ....	48
FIGURA 4.17. <i>FREQUENZE ATTENDIBILI: DA 1,4 A 2,2 HZ. FONTE GOOGLE MAPS.</i> .....	49
FIGURA 4.18. <i>FREQUENZE ATTENDIBILI E MENO: DA 1,4 A 2,2 HZ. FONTE GOOGLE MAPS.</i> .....	49
FIGURA 4.19. <i>FREQUENZE ATTENDIBILI E MENO: DA 2,2 A 3 HZ. FONTE GOOGLE MAPS.</i> .....	50
FIGURA 4.20. <i>FREQUENZE ATTENDIBILI E MENO: DA 2,2 A 10 HZ. FONTE GOOGLE MAPS.</i> .....	51
FIGURA 4.21. <i>GRAFICO RELATIVO AL CAMPO ELETTROMAGNETICO AL SUOLO. DA “RUMORI ELETTROMAGNETICI DI ORIGINE NATURALE E ANTROPICA” C. BIANCHI, A. MELONI.</i> .....	52
FIGURA 4.22. <i>TRACCIATO LINEA ELETTRICA AEREA. FONTE GOOGLE MAPS E GEO PORTALE PROVINCIA DI SONDRIO.</i> .....	52
FIGURA 4.23. <i>FREQUENZE SUPERIORI AI 2,2 HZ IN PROSSIMITÀ DELLA LINEA. FONTE GOOGLE MAPS.</i> .....	53
FIGURA 4.24. <i>TOTALITÀ DELLE FREQUENZE (BASSE E ALTE) INFLUENZATE DALLA LINEA. FONTE GOOGLE MAPS.</i> .....	53
FIGURA 4.25. <i>PROSPETTO DEFINITIVO DELLE MISURE RITENUTE VALIDE. FONTE GOOGLE MAPS.</i> ....	54
FIGURA 4.26. <i>PROSPETTO DELLE MISURE RITENUTE VALIDE E DI QUELLE SCARTATE. FONTE GOOGLE MAPS.</i> .....	55
FIGURA 4.27. <i>DISTRIBUZIONE FREQUENZE IN RIFERIMENTO A TUTTI I DATI ATTENDIBILI.</i> .....	55
FIGURA 4.28. <i>DISTRIBUZIONE FREQUENZE IN RIFERIMENTO AI DATI SCARTATI PER VICINANZA LINEA ELETTRICA.</i> .....	56
FIGURA 4.29. <i>SEZIONE TIPO DI UNA VALLE: BEDROCK E MATERIALE DI RICOPRIMENTO.</i> .....	57
FIGURA 4.30. <i>LE DUE POSSIBILI FORME DELLA VALLE</i> .....	58
FIGURA 4.31. <i>RIEPILOGO MISURE E LINEE DI SEZIONE DELLA VALLE.</i> .....	58
FIGURA 4.32. <i>RICOSTRUZIONE 3D DELLA VALLE (VISTA TRASVERSALE).</i> .....	59
FIGURA 4.33. <i>RICOSTRUZIONE 3D DELLA VALLE (VISTA LONGITUDINALE).</i> .....	60
FIGURA 5.1. <i>LOCALIZZAZIONE DEL PUNTO IN CUI È STATO REALIZZATO IL POZZO.</i> .....	62
FIGURA 5.2. <i>PERFORAZIONE ESEGUITA TRAMITE SONDA A ROTAZIONE CON L’UTILIZZO DI DOPPIO CAROTIERE. DA “ANALISI DI FATTIBILITÀ SULL’UTILIZZO DI METODI GEOFISICI PER LO STUDIO DELLA FRANA DI PIURO (SO)” TESI DI ANNA ZINETTI.</i> .....	63



FIGURA 5.3. LOCALIZZAZIONE DEI QUATTRO STENDIMENTI PER SISMICA A RIFRAZIONE.....	64
FIGURA 5.4. SCHEMA DELLO STENDIMENTO 1. ....	65
FIGURA 5.5. MAZZA COME SORGENTE DI ONDE SISMICHE: DA <i>HTTP://WWW.STUDIOGEOLOGIABOSCO.IT/MICROZONAZIONE-SISMICA.....</i>	65
FIGURA 5.6. REGISTRAZIONI AI GEOFONI, PUNTO DI BATTUTA 4 M PRIMA DEL GEOFONO G1.....	66
FIGURA 5.7. REGISTRAZIONI AI GEOFONI, PUNTO DI BATTUTA TRA I GEOFONI G6 E G7.....	66
FIGURA 5.8. REGISTRAZIONI AI GEOFONI, PUNTO DI BATTUTA TRA I GEOFONI G12 E G13.....	66
FIGURA 5.9. ZOOM SUI SEGNALI: IN ROSSO L'ISTANTE DI PRIMO ARRIVO REGISTRATO DAI GEOFONI.	67
FIGURA 5.10. DROMOCRONE STENDIMENTO 1 (A SINISTRA), SELEZIONE DELLE DROMOCRONE PER I <i>DIVERSI LAYER, (A DESTRA). ....</i>	67
FIGURA 5.11. STRATIGRAFIA RELATIVA ALLO STENDIMENTO 1.....	68
FIGURA 5.12. STRATIGRAFIA RELATIVA ALLO STENDIMENTO 2.....	68
FIGURA 5.13. STRATIGRAFIA RELATIVA ALLO STENDIMENTO 3.....	69
FIGURA 5.14. STRATIGRAFIA RELATIVA ALLO STENDIMENTO 4.....	69

---

## Indice delle tabelle

TABELLA 2.1. <i>VELOCITÀ DELLE ONDE SISMICHE IN ALCUNI TERRENI. DA: "DISPENSA PROF. C. MADI AI CORSO DI ING. GEOTECNICA SISMICA-RICHIAMI PROPAGAZIONE ONDE-UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI FIRENZE"</i> .....	23
TABELLA 3.1. <i>QUADRO RIASSUNTIVO DEI CRITERI SESAME</i> .....	32
TABELLA 6.1. <i>PUNTI RILEVATI: COORDINATE, NUMERO CRITERI SESAME RISPETTATI, FREQUENZA DI RISONANZA</i> .....	74
TABELLA 6.2. <i>PUNTI RILEVATI: COORDINATE, NUMERO CRITERI SESAME RISPETTATI, FREQUENZA DI RISONANZA</i> .....	75
TABELLA 6.3. <i>PUNTI RILEVATI: COORDINATE, NUMERO CRITERI SESAME RISPETTATI, FREQUENZA DI RISONANZA</i> .....	76

# CAPITOLO 1

## INTRODUZIONE

*"Veritiera e spaventosa cronaca dell'improvvisa distruzione di Piuro, borgo ben noto della Val Bregaglia, nelle Comuni Tre Leghe. Una improvvisa frana, precipitata dal fianco della montagna, in un batter d'occhio ha sorpreso l'intero borgo, lo ha annientato, sommerso, sconvolto, distrutto." (Cronaca del 1618).*



Figura 1.1. Panoramica e localizzazione di Piuro.

## 1.1 La frana di Piuro

La sera del 4 settembre del 1618 (corrispondente al 25 agosto dell'antico calendario) ebbe luogo la frana che distrusse e seppellì completamente il fiorentino borgo di Piuro (SO). Lo smottamento si staccò dal versante settentrionale del Mottaccio, poco ad Est della località Prato del Conte, a Sud dell'abitato, ed era costituito da circa 4 milioni di metri cubi di materiale vario: massi, blocchi e terriccio; raggiunse e colpì la frazione di Scilano e il borgo di Piuro, devastando quasi 200 edifici e provocando la morte di un migliaio di persone. Durante il disastro morirono tutti gli abitanti, eccetto pochi sopravvissuti: l'oste Francesco Forno, il muratore Simone Ramada, Battista Planta, Giovan Pietro Vertemate Franchi, una donna e due bambini e il fratello del signor Podestà, che al momento della frana si trovavano poco fuori dal borgo.

L'evento catastrofico suscitò profonda eco in tutta Europa, sia per l'alto numero di vittime, sia perché erano numerosi i piuraschi che erano emigrati in vari stati europei alla ricerca di fortuna e avevano spesso guadagnato posizioni di prestigio. A testimonianza di ciò è l'ottantina di relazioni sulla tragedia pubblicate in tutta Europa nel corso del Seicento tanto che Piuro venne definita la "Pompei delle Alpi".

### 1.1.1 Inquadramento storico

Il borgo di Piuro sorgeva a Sud dell'attuale frazione Borgonuovo. Provenendo da Chiavenna si incontrava all'inizio del paese, a sinistra della strada, la chiesa collegiata di San Cassiano. Dietro a questa era il palazzo di residenza della famiglia Vertemate Franchi, la più potente di Piuro. Il palazzo era caratterizzato da colonnati, cortili, giardini, un acquario, statue e fontane con giochi d'acqua.

Il ponte maggiore, di fronte al palazzo, portava al Pretorio e, più oltre, alla chiesa di Santa Maria. Poco dopo il ponte, a sinistra, una strada saliva verso la collina di Scilano, sulla quale si ergeva la chiesa di San Giovanni Battista e il castello. Altri palazzi appartenevano ai Beccaria e ai Brocchi, altre famiglie importanti e dedite al commercio. Palazzi più piccoli erano quelli delle famiglie Scandolera, Lumaga, Camogli, Rota, Giulini, e ancora Losio, Mora, Buttintrocchi, Serta ecc.

Nel borgo vi erano anche alcune osterie, un albergo, due macelli e, poco fuori dal centro, i crotti, luoghi caratteristici della Valchiavenna e dove venivano conservati il vino e gli altri prodotti alimentari.

In paese una delle famiglie più prestigiose era quella dei Vertemate, grandi proprietari che possedevano sette palazzi prima della catastrofe. Palazzo Belfort non venne completamente distrutto dalla frana ma lo spostamento d'aria lo danneggiò comunque gravemente, solo il palazzo Vertemate si salvò poiché distante dal luogo in cui cadde la frana e attualmente il palazzo è considerato come una casa museo, al cui interno viene conservata una tela seicentesca che raffigura il paese prima della frana visibile in Figura 1.2. Il pittore non aveva mai visitato la cittadina, rappresentò il borgo basandosi sui ricordi dei pochi sopravvissuti.

Il dipinto è risultato molto utile per differenti studi che si sono basati su ciò che era raffigurato per procedere con scavi e analizzare il territorio tramite laser-scanner in modo tale da geo referenziare il materiale e realizzare una ricostruzione tridimensionale.

Attualmente è stata riportata alla luce solo una piccola parte dell'antico borgo grazie agli scavi dell'Associazione italo-svizzera per gli scavi di Piuro.



Figura 1.2. Affresco rappresentante il borgo prima della catastrofe. Da "<http://www.infopiuro.it/it/storia-e-cultura/storia/la-storia-di-piuro>".

### 1.1.2 Inquadramento geologico

La settimana precedente lo smottamento si registrarono importanti precipitazioni che provocarono l'ingrossamento del fiume Mera e dei torrenti della valle e causarono l'apertura di fessure nel terreno. In seguito, la notte del 4 settembre la frana si staccò dal pendio ed investì il borgo in pochi minuti. L'evento può essere classificato come frana complessa, ovvero caratterizzata da un movimento di materiale derivato dalla combinazione di due o più tipologie di movimenti principali. Inizialmente si manifestò il distacco e lo scorrimento del materiale, per poi proseguire più rapidamente sotto forma di colata di terreno, detriti e roccia fratturata. Il movimento proseguì per un dislivello di quasi 1200 m con una velocità tale da generare spostamenti d'aria così potenti da provocare danni a edifici delle zone limitrofe, anche se non direttamente colpite dallo smottamento.

Il materiale crollato sbarrò il fiume Mera spaventando gli abitanti della valle. Fortunatamente non causò inondazione, ma formò un lago provvisorio che, una volta raggiunta la quota di massimo invaso, iniziò a straripare verso valle senza però causare danni. Tramite un carotaggio di 75 m si è notata l'omogeneità del corpo di frana prevalentemente composto da ghiaia sabbiosa limosa ed è esclusa la presenza di contrasti meccanici significativi tra materiali differenti. Nel campione è emersa la presenza di ortogneiss, ma le condizioni di omogeneità rilevate da questa indagine distruttiva puntuale impediscono di trarre conclusioni sulla disposizione dei diversi strati.

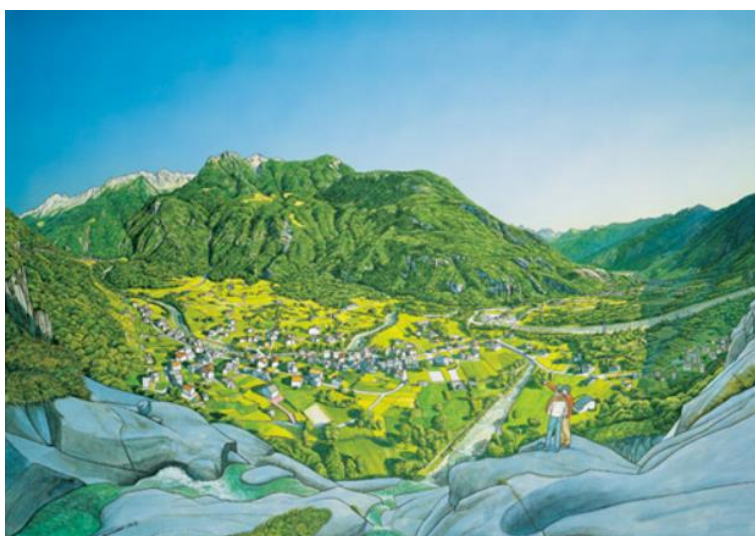


Figura 1.3. Ricostruzione plastigrafica di Piuro prima dell'evento franoso.





Figura 1.4. Ricostruzione plastigrafica di Piuro in seguito all'evento franoso.

Per le due ricostruzioni modellate nelle figure 1.3 e 1.4, le varie testimonianze dell'epoca e altri dati sulla catastrofe si rimanda alla pagina web legata all'Associazione Italo-Svizzera per gli scavi di Piuro.

Si riportano, brevemente, i risultati ottenuti secondo una relazione geologica redatta da Depoli dott. Claudio in seguito alle interpretazioni delle indagini sismiche effettuate.

“Il settore di edificazione è caratterizzato dalla presenza di depositi antichi di paleofrana impostati su probabili coltri preesistenti alluvionali (Fiume Mera) che si sono ulteriormente sovrapposte successivamente all'evento di frana del 1618. Questi depositi sono caratterizzati da granulometria estremamente variabile, in genere si tratta di depositi ghiaiosi ciottolosi, in cui la frazione fine sabbiosa è variabilmente distribuita sino a predominare in superficie (coltri del pregresso invasivo creatosi dopo la frana).

In seguito alle indagini effettuate nell'area, i risultati hanno portato a definire la presenza di terreni con caratteristiche geomeccaniche da buone ad eccellenti, con bassissimo grado di comprimibilità. Gli angoli di attrito interno calcolati presentano valori superiori a  $30/32^\circ$ ”.

- 
- Primo orizzonte costituito da terreno naturale e/o parte di riporto (terre da coltivo) di esiguo spessore (1 – 2 m)
  - Secondo orizzonte di spessore variabile (max 6 – 8 m) ascrivibile alla presenza di deposito di paleofrana
  - Terzo orizzonte assimilabile a deposito alluvionale antico

## 1.2 Studi già effettuati sulla frana di Piuro

È stato eseguito un transetto di misure passive HVSR e per tutti i punti di misura sono state ricavate le curve di ellitticità H/V che hanno rivelato picchi netti. Il sensibile aumento del rapporto H/V ha dimostrato infatti la presenza di fenomeni di risonanza nel sottosuolo. Nonostante ciò, non è stato possibile determinare gli spessori dei livelli di frana e le caratteristiche meccaniche del materiale coinvolto per mancanza di informazioni a supporto del metodo.

Infatti, nel medesimo sito in cui sono state svolte le prove di sismica passiva, è stato eseguito un carotaggio (come anticipato nel capitolo precedente) con l'obiettivo di localizzare il bedrock e ricavare le caratteristiche meccaniche del materiale. La prova ha raggiunto la profondità di 75 metri senza però aver intercettato la base rocciosa. L'analisi stratigrafica del campione ha rilevato la presenza di materiale omogeneo, prevalentemente ghiaia sabbiosa limosa, mettendo in luce l'assenza di contrasti nel sottosuolo. La constatazione è stata confermata dalle prove di Down-Hole e MASW che hanno rimarcato la difficoltà di indagare il corpo di frana.

Fenomeni di riflessione e contrasti non sono stati rilevati neppure con l'analisi VSP a causa dell'energizzazione insufficiente del segnale prodotto. La sorgente utilizzata (una massa da 10 kg) ha infatti generato onde sismiche in superficie che hanno percorso lunghe distanze per raggiungere lo strato riflettente e successivamente il geofono calato nel pozzo. L'assorbimento è risultato tale da non rendere visibile alcun contrasto significativo. Più precise informazioni sono reperibili all'interno dell'elaborato di tesi di Anna Zinetti, "*Analisi di fattibilità sull'utilizzo di metodi geofisici per lo studio della frana di Piuro (SO)*", Politecnico di Milano.

Tutte le tecniche di misura menzionate sopra verranno esposte più avanti.



### **1.3 Duplice obiettivo dell'elaborato: valutazione profondità del bedrock e studio superficiale della frana**

Il primo obiettivo dello studio sulla frana di Piuro consiste nel valutare la profondità del bedrock geologico o substrato.

In geologia, questo termine si applica alla roccia inalterata che si trova al di sotto del suolo o di altre coperture superficiali inconsolidate. La profondità del substrato rispetto alla copertura, o meglio rispetto alla quota del piano campagna, è variabile e può andare da pochi metri fino a centinaia di metri, a seconda dei contesti sedimentari e tettonici della zona.

Il corpo che sovrasta il bedrock deriva dal trasporto di rocce e materiali che durante le ere geologiche si sono depositati a partire dal fondovalle. Tra questi è presente l'evento del 1618 che distrusse Piuro. Lo studio del corpo di frana verrà analizzato più avanti nel proseguo del testo e consiste nel secondo obiettivo che si vuole raggiungere. Tramite l'analisi di misure HVSR si cercherà di trarre informazioni in profondità mentre per la frana vera e propria si tratteranno misure di sismica a rifrazione. Le tipologie di investigazioni del sottosuolo verranno spiegate nel dettaglio nel proseguo del testo.

## **CAPITOLO 2**

# **LE ONDE SISMICHE**

Le onde sismiche sono una tipologia di onde elastiche, definite così perché la loro propagazione a distanza è affidata alle forze elastiche che si esercitano fra le particelle del mezzo materiale dove esse viaggiano. La propagazione di un'onda è accompagnata dal trasporto di energia anche a notevole distanza e la velocità di propagazione dipende in generale da due fattori: un fattore elastico che rappresenta appunto l'interazione elastica fra le particelle del mezzo e un fattore inerziale che dipende dalla massa delle particelle coinvolte nella propagazione dell'onda. Il primo contribuisce ad aumentare la velocità, il secondo a rallentarla.

L'energia prodotta dalla sorgente si propaga nel mezzo producendo onde di volume e onde di superficie.

### **2.1 Onde di volume**

Le onde di volume sono generate da una sorgente meccanica interna al mezzo e si propagano all'interno di esso con fronti d'onda sferici o semisferici (a seconda che la sorgente sia completamente interna o sulla frontiera) di raggio sempre più ampio. Se il mezzo considerato è semi infinito (come nel caso del terreno), l'impatto delle onde di volume con la superficie libera è accompagnato dalla generazione di nuove onde, denominate onde di superficie perché interessano solo la parte più superficiale del suolo.

Le tipologie di onde di volume che si vengono a generare possono essere longitudinali (onde P) oppure trasversali (onde S).

- Onde P (primarie)

Vengono definite con questa lettera poiché sono le onde più veloci, quindi le prime a giungere in superficie ed essere registrate dai sismografi. La velocità di propagazione varia indicativamente tra 1500 e 5000 m/s a seconda del materiale attraversato e hanno la peculiarità di propagarsi anche nei fluidi. Esse producono vibrazioni polarizzate nella direzione di propagazione (in altre parole le particelle del mezzo attraversato si muovono nella medesima direzione dell'onda) e successive deformazioni di compressione ed estensione, rappresentate in figura 2.2. Si riporta l'equazione (1) per il calcolo della loro velocità.

$$V_p = \sqrt{\frac{k + \frac{4}{3}G}{\rho}} \quad (1)$$

Dove  $k$  rappresenta il modulo di compressibilità (o modulo di Bulk) cioè l'aumento della densità provocato da una compressione o in altre parole il cambiamento di volume a seguito di una deformazione, ricavabile dalla (2) riportata sotto:

$$k = \frac{F/A}{\Delta V/V_0} \quad (2)$$

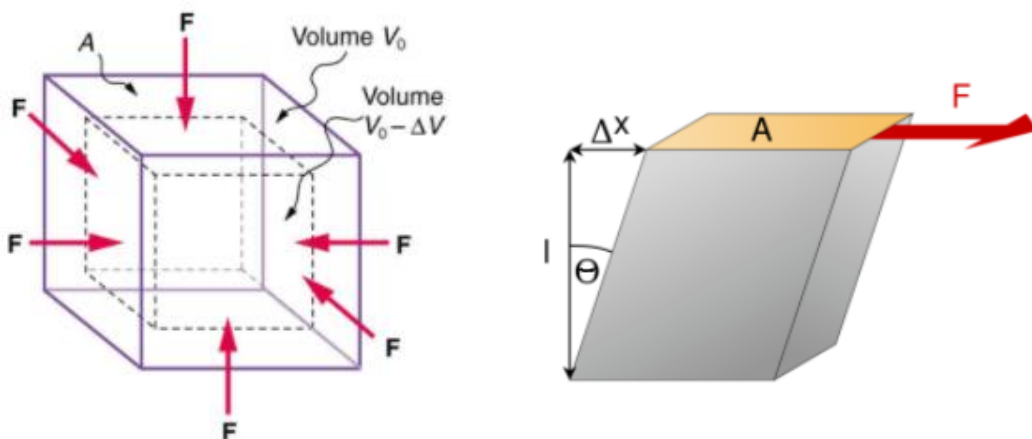


Figura 2.1. Rappresentazione modulo di Bulk e modulo di taglio. Da: "P.Robustini/geologia/elementi di geodinamica/i moduli elastici/"

Mentre  $G$  rappresenta il modulo di taglio cioè l'abilità di un materiale a resistere a deformazioni trasversali e più precisamente a cambiamenti di forma o in altre parole

è il rapporto tra lo sforzo di taglio  $\tau$  e la deformazione di taglio (è noto anche come 2<sup>a</sup> costante di Lamé), definito dalla (3):

$$G = \frac{F/A}{\Delta x/l} = \frac{\tau}{tg(\theta)} \quad (3)$$

Esprimibile anche in relazione al modulo di Young ( $E$ ) e dal coefficiente di Poisson ( $\nu$ ) dalla formula (4):

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (4)$$

Infine,  $\rho$  rappresenta la densità del mezzo.

La velocità delle onde P è influenzata dalla porosità del mezzo (rapporto tra volume dei vuoti e volume totale), in particolare si riduce quando l'onda attraversa un mezzo poroso, diminuzione del modulo di Bulk e di taglio quindi del numeratore della (1). Altro aspetto da considerare è la profondità dei materiali non porosi, infatti la velocità delle onde primarie aumenta con l'aumento di essa. Come è noto, negli strati prossimi alla superficie la compattazione degli stessi è minore rispetto a quelli in profondità, che presentano quindi un valore del modulo di taglio maggiore.

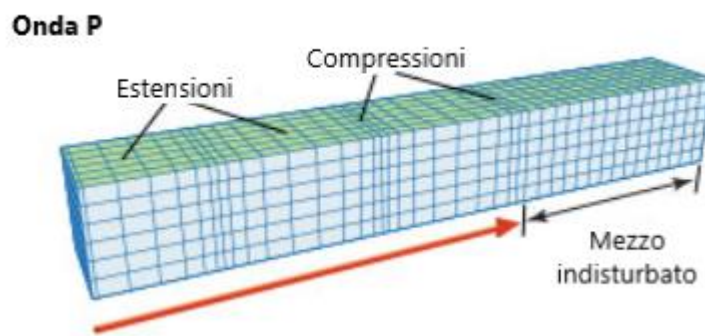


Figura 2.2. Moto di propagazione onde P.

- Onde S (secondarie)

Tali onde sopraggiungono in superficie con un certo ritardo temporale rispetto alle onde P (data la minore velocità di propagazione che si aggira mediamente tra 100 e 2000 m/s). Esse generano deformazioni di taglio e vibrazioni polarizzate su un piano passante per la direzione di propagazione, ovvero le particelle si muovono in un piano che contiene la direzione di propagazione dell'onda. Al contrario di quelle primarie, non si trasmettono nei fluidi dato che questi non oppongono una resistenza al taglio.

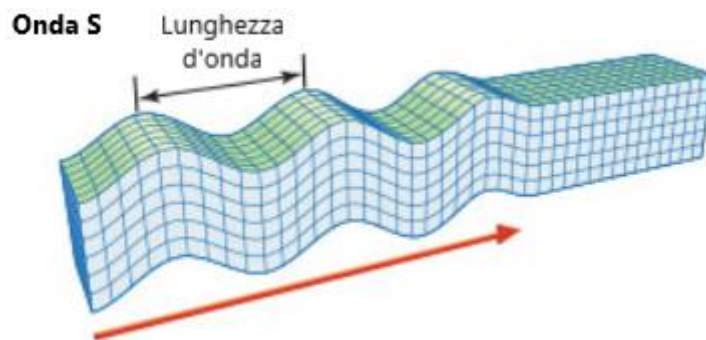


Figura 2.3. Moto di propagazione onde S.

Il piano su cui sono polarizzate le onde S può essere orizzontale o verticale a seconda delle sollecitazioni che le produce, in figura 2.3 viene mostrata un'onda S polarizzata sul piano verticale. Si faccia riferimento all'equazione (5) per il calcolo della loro velocità.

$$V_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (5)$$

Come nelle onde P, i materiali compatti, non porosi, presentano una velocità di propagazione superiore poiché il modulo di taglio in questi mezzi è maggiore. Per quanto riguarda le rocce porose o fratturate, assume notevole importanza il riempimento dei vuoti.  $V_s$  diminuisce quando i vuoti del materiale risultano essere riempiti con dell'argilla o con del fluido. In entrambi i casi, il modulo di taglio rimane pressoché costante, mentre la densità  $\rho$  aumenta, causando così un incremento del denominatore dell'equazione (5)

## 2.2 Onde di superficie

Le onde superficiali si originano quando le onde longitudinali e trasversali, giunte sulla superficie terrestre, interagiscono con essa. Queste si propagano appunto in superficie e nel caso di un sisma sono responsabili dei danni maggiori. Si descrivono qui sotto le due tipologie.

- Onde L (di Love)

Le onde di Love, rappresentate in figura 2.4, provocano deformazioni di taglio e oscillazioni delle particelle del mezzo, trasversali alla direzione di propagazione, ma solo nel piano orizzontale, parallelo alla superficie terrestre. Presentano una velocità media di circa 3 km/s.

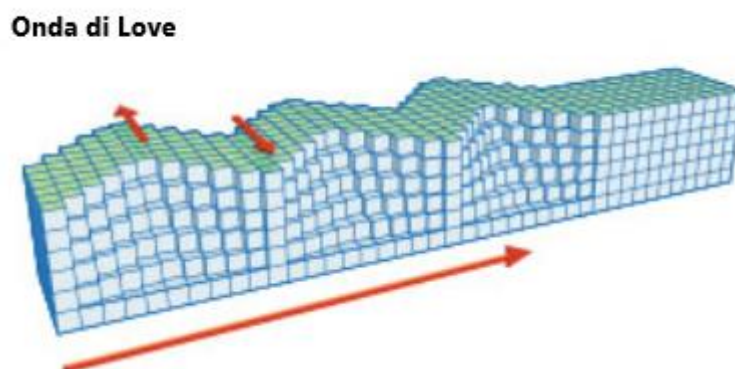


Figura 2.4. Moto di propagazione onde L.

- Onde R (di Rayleigh)

Producono oscillazioni che sono la risultante di una vibrazione polarizzata su un piano verticale, in direzione parallelo alla direzione di propagazione, e di una vibrazione orizzontale polarizzata lungo la medesima direzione. Il moto risultante (sul piano verticale) è ellittico retrogrado, come si evince in figura 2.5, mentre la deformazione indotta è sia di taglio che di compressione. Le proprietà da cui dipendono sono le stesse delle onde S, infatti le due tipologie hanno alcuni aspetti in comune e simili. Entrambe sono legate al parametro di deformazione di forma, fondamentale per la caratterizzazione meccanica del mezzo ed inoltre queste onde assumono un ruolo fondamentale nelle “misure sismiche di superficie”.

La loro velocità si ricava dalla formula (6) che coinvolge la velocità delle onde S e il coefficiente di Poisson.

$$V_R = \frac{0,862 + 1,14 \nu}{1 + \nu} V_S \quad (6)$$

### Onda di Rayleigh

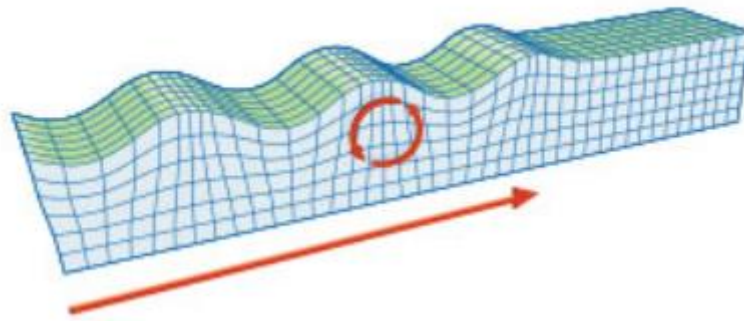


Figura 2.5. Moto di propagazione onde R.

Riassumendo, nella tabella 2.1, si riportano le velocità delle onde sismiche in alcuni materiali:

Tipo di terreno	$V_p$ [m/s]	$V_s$ [m/s]
Argilla satura	1500	100 ÷ 250
Sabbia fine e media	300 ÷ 500	120 ÷ 200
Sabbia densa	400 ÷ 600	200 ÷ 400
Ghiaia	500 ÷ 750	300 ÷ 600
Arenaria	1500 ÷ 4500	700 ÷ 1500
Marna	1500 ÷ 4500	600 ÷ 1500

Tabella 2.1. Velocità delle onde sismiche in alcuni terreni. Da: "Dispensa Prof. C. Madiati corso di Ing. Geotecnica Sismica-Richiami propagazione onde-Università degli Studi di Firenze".

## 2.3 Attenuazione geometrica delle onde sismiche

Le onde P ed S si propagano secondo fronti d'onda sferici mentre le onde R con fronti d'onda cilindrici. Poiché le onde investono volumi di terreno sempre maggiori, il loro contenuto energetico diminuisce man mano ci si allontana dalla sorgente e con esso anche l'ampiezza dello spostamento indotto nelle particelle del mezzo attraversato. Quelle di volume si attenuano con legge  $1/r$  all'interno del mezzo e con

$1/r^2$  sulla superficie mentre le onde di Rayleigh si attenuano con legge  $1/\sqrt{r}$  risultando predominanti su quelle di volume allontanandosi dalla sorgente. Si faccia riferimento alla schematizzazione riportata in figura 2.6.

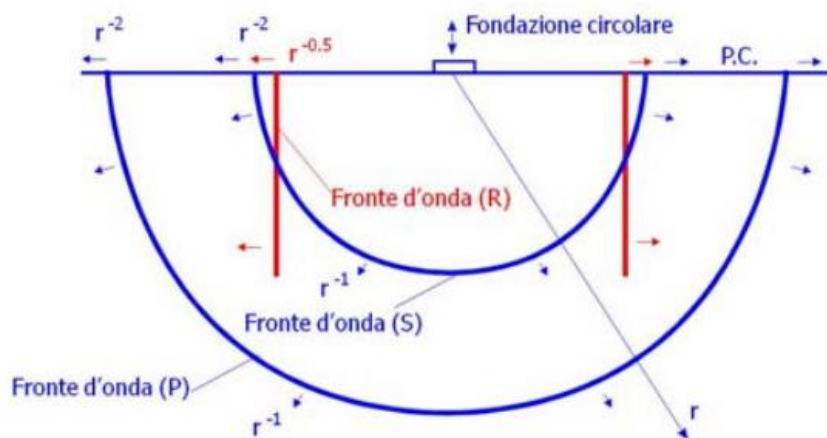


Figura 2.6. *Principali fronti d'onda. Da: "Dispensa Prof. C. Madiati corso di Ing. Geotecnica Sismica- Richiami propagazione onde-Università degli Studi di Firenze"*

Come già accennato, le onde superficiali si mantengono nei primi strati del terreno e la loro ampiezza decade esponenzialmente con la profondità, come mostrato nella figura sottostante. Onde di volume e onde superficiali hanno quindi molte differenze che le rendono più o meno adatte a diversi ambiti. In particolar modo quelle volumetriche si adattano meglio per studiare gli strati profondi mentre per i primi layer di terreno si preferisce l'utilizzo delle onde L e R poiché dotate di più energia e con un decadimento (in direzione parallela all'interfaccia) minore.



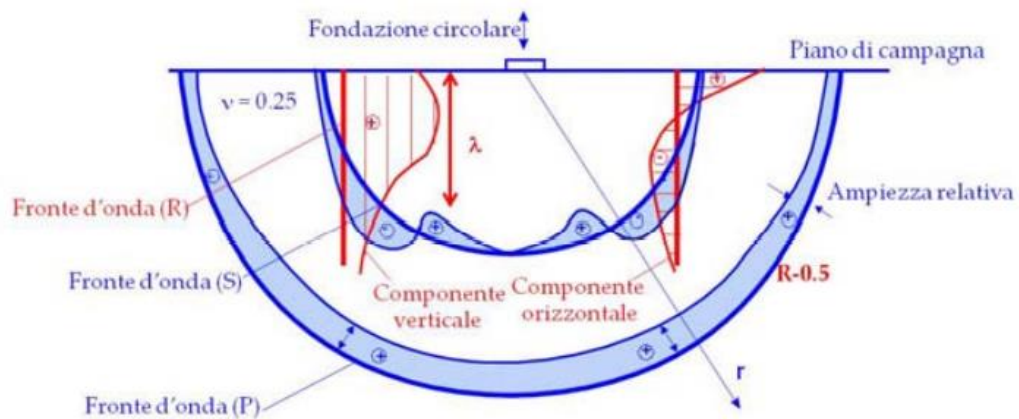


Figura 2.7. Attenuazione delle onde. Da: "Dispensa Prof. C. Madiati corso di Ing. Geotecnica Sismica- Richiami propagazione onde-Università degli Studi di Firenze"

Come si evince nella figura 2.7, l'ampiezza delle onde P è sempre dello stesso segno e all'incirca costante lungo il fronte d'onda considerato mentre quella delle onde S è variabile in ampiezza e segno. La componente verticale delle onde R ha segno costante invece quella orizzontale cambia segno con la profondità.

## CAPITOLO 3

# RUMORE SISMICO E METODO H/V

La registrazione del rumore ambientale presente in natura e la sua analisi permette di determinare e valutare aspetti molto importanti tra le quali la frequenza di risonanza di un sito e la presenza di sedimenti poggianti su di un substrato roccioso.

### 3.1 Il rumore sismico

Con il termine “rumore sismico” si fa riferimento alle vibrazioni generate dai fenomeni atmosferici (onde oceaniche, vento, condizioni atmosferiche in generale) ed è presente ovunque sulla superficie terrestre. Viene definito anche microtremore poiché riguarda oscillazioni molto più piccole di quelle indotte dai terremoti nel campo prossimo all’epicentro. A questo rumore di fondo, si sovrappongono le sorgenti locali antropiche come il traffico veicolare, le industrie e persino i movimenti delle persone. I microtremori sono solo in parte costituiti da onde di volume, P o S poiché in essi giocano un ruolo fondamentale le onde superficiali, che hanno velocità prossima a quella delle onde S in modo particolare le onde di Rayleigh.

Dai primi studi di Kanai (1957) in poi, diversi metodi sono stati proposti per estrarre l’informazione relativa al sottosuolo dal rumore sismico registrato in un sito. Tra questi, la tecnica che si è maggiormente consolidata nell’uso è quella dei rapporti spettrali tra le componenti del moto orizzontale e quella verticale (Horizontal to Vertical Spectral Ratio, HVSR o H/V), proposta da Nogoshi e Igarashi (1970) e perfezionata successivamente da Nakamura. La tecnica è universalmente riconosciuta

come efficace nel fornire stime affidabili della frequenza fondamentale di risonanza del sottosuolo.

## 3.2 La teoria alla base del metodo

La tecnica dei rapporti spettrali HVSR o metodo di Nakamura è totalmente non invasiva, molto rapida e si può applicare ovunque dato che non necessita di nessun tipo di perforazione, né di stendimenti di cavi e tantomeno di energizzazioni dovute a sorgenti esterne diverse dal rumore ambientale. Per questi motivi è stata adottata per lo studio della frana di Piuro in Valchiavenna. È importante sottolineare che quel “debole rumore sismico” che viene tradizionalmente scartato dalla sismologia classica (metodi di indagine a rifrazione e a riflessione) viene sfruttato da questa tecnica poiché contiene importanti informazioni.

Lo strumento utilizzato per le acquisizioni prende il nome di tromometro ovvero un geofono a 3 componenti (due orizzontali N-S, E-W ed una verticale U-D) capace di registrare i microtremori ambientali in intervalli di frequenze, indicativamente comprese tra 0,1 e 200 Hz. I dati acquisiti vengono elaborati attraverso l'impiego del software Geopsy al fine di definire le curve H/V per l'analisi degli effetti di sito e la determinazione della frequenza di risonanza.

Dal momento che le misure di microtremore dimostrano che in un terreno rigido non si verifica amplificazione in alcun range di frequenze e in alcuna direzione, l'attenzione è stata rivolta alla condizione di terreno soffice sovrastante un terreno rigido o bedrock (condizione stratigrafica che si appresta bene alla frana di Piuro).

In questa situazione si verifica un'amplificazione in ampiezza della componente orizzontale in un determinato range di frequenze che non interessa la componente verticale. Questo fenomeno prende il nome di riflessione multipla o risonanza. Come detto precedentemente, il campo del microtremore è costituito principalmente dalle onde di superficie in particolare dalle onde di Rayleigh, la relazione che lega questa misura alla frequenza di risonanza dell'onda di volume SH, sta nel fatto che un picco H/V ad una determinata frequenza  $f_0$  è dato da un minimo locale della componente verticale dell'onda di Rayleigh e ciò si verifica ad una frequenza,  $f_0$  per l'appunto, che è prossima a quella di risonanza dell'onda SH. Per comprendere meglio questo ragionamento consideriamo la figura 3.1.

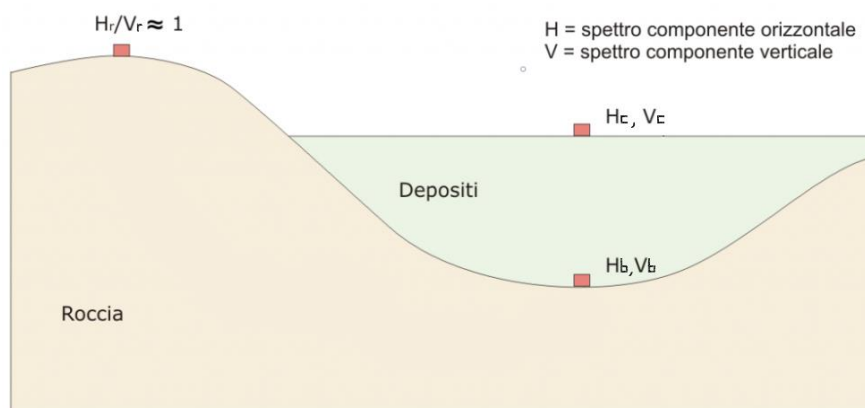


Figura 3.1. *Struttura geologica di riferimento*

Come si evince è presente uno strato soffice, che chiameremo copertura, poggiante su di uno rigido alla base. Nakamura considerò le componenti orizzontali e verticali delle vibrazioni in superficie e alla base rispettivamente  $H_c(f)$   $V_c(f)$  e  $H_b(f)$   $V_b(f)$  per determinare l'effetto delle onde di Rayleigh sulla componente orizzontale tramite il rapporto dato dalla (7):

$$R_h(f) = \frac{H_c(f)}{H_b(f)} \quad (7)$$

E allo stesso modo è possibile determinare tramite la (8) quello riferito alla componente verticale:

$$R_v(f) = \frac{V_c(f)}{V_b(f)} \quad (8)$$

$R_h$  dipende sia dalla sorgente che dall'effetto di amplificazione dovuto allo strato soffice, mentre  $R_v$  risente unicamente degli effetti della sorgente. Rapportando le componenti orizzontali a quelle verticali del rumore ambientale si ottiene lo spettro H/V dato dall'equazione (9):

$$\frac{R_h(f)}{R_v(f)} = \frac{H_c(f)}{H_b(f)} \cdot \frac{V_b(f)}{V_c(f)} \quad (9)$$

Una delle ipotesi di Nakamura prevede che il rapporto tra componente orizzontale e verticale (delle vibrazioni) alla base tende all'unità, l'espressione precedente si

semplifica, andando a considerare unicamente le componenti riferite alla copertura, come mostra la (10):

$$\frac{Rh(f)}{Rv(f)} = \frac{Hc(f)}{Vc(f)} \quad (10)$$

Per comprendere meglio il significato della curva H/V si faccia riferimento all'esempio seguente (non legato ai rilievi di Piuro svolte in questo elaborato) in cui si evince con chiarezza il valore della frequenza fondamentale di sito, ovvero quella in corrispondenza della quale si verifica un picco della curva H/V o in altre parole si ha un minimo della componente verticale delle onde R. In figura 3.2 sono riportate in rosso e in nero due curve H/V. Nella curva in nero (sito 1) emerge una risonanza a 6 Hz legata alla presenza di un livello di ghiaie a 12 m di profondità che è assente nel sito 2 (in rosso). Nel dominio delle medio-basse frequenze le curve sono statisticamente uguali e presentano entrambe un picco a circa 1,2 Hz.

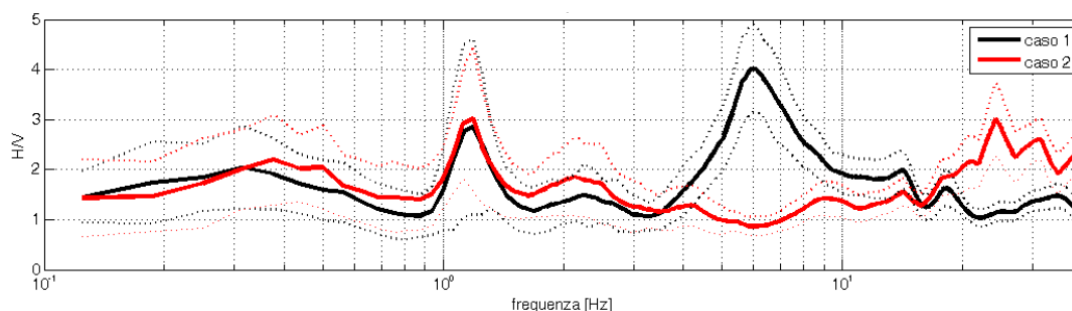


Figura 3.2. Esempi di curve H/V. Da “Caratterizzazione dinamica del sottosuolo ai fini dell’Ingegneria Sismica, S.Castellaro”

Qui sotto, in figura 3.3 sono rappresentati gli spettri delle singole componenti del moto (N-S, E-W e Z) registrati nel primo sito (curva nera sopra). Le frecce evidenziano le forme “a ogiva” caratterizzate da un minimo locale della componente verticale che mostrano le risonanze di natura stratigrafica rispettivamente a 1,2 e 6 Hz.

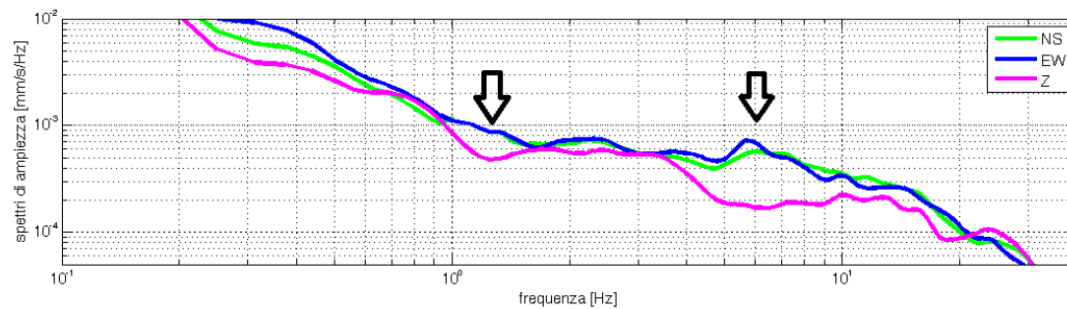


Figura 3.3. Spettri delle singole componenti del moto. Da “Caratterizzazione dinamica del sottosuolo ai fini dell’Ingegneria Sismica, S.Castellaro”

### 3.3 Criteri SESAME e orizzontalità dei layer

“Site Effects Assessment Using Ambient Excitations” o più semplicemente SESAME rappresenta il progetto europeo che dal 2005 fornisce strumenti per l’elaborazione delle vibrazioni ambientali con lo scopo di caratterizzare il sito oggetto di indagine. Il documento stabilisce le linee guida per l’esecuzione di indagini HVSR e indica una serie di criteri che la curva risultante dall’indagine e l’area circostante la frequenza di picco, o  $f_0$ , dovrebbero soddisfare, noti come criteri SESAME.

Premettiamo il fatto che se tutti i criteri siano soddisfatti non implica necessariamente che l’indagine sia stata effettuata correttamente e viceversa quando non tutti i criteri sono soddisfatti significa che l’indagine sia da scartare a priori. In ogni caso, la verifica del rispetto di questi criteri si rivela spesso utile per determinare se l’indagine è rilevante dal punto di vista geofisico o se ci sia la necessità di approfondire ulteriormente la situazione tramite nuove acquisizioni in sito. Fatta questa premessa, in questo elaborato, per valutare la validità delle acquisizioni e delle successive elaborazioni si è scelto di adottare tali criteri soprattutto come uno strumento in grado di definire in modo oggettivo la bontà o meno dei risultati ottenuti.

I criteri sono nove: i primi tre riguardano l’affidabilità della curva nel suo insieme e la correttezza delle finestre temporali scelte per l’elaborazione (si faccia riferimento al capitolo 4.2) mentre i restanti sei criteri si riferiscono alla chiarezza del picco, sia rispetto alle frequenze circostanti la  $f_0$  che alla sua stabilità nei rapporti H/V delle singole finestre. Si riportano di seguito gli aspetti trattati da ogni criterio SESAME.

1. Il criterio richiede che in ogni finestra temporale la componente del segnale alla frequenza di picco compia almeno 10 cicli. Ad esempio, se la  $f_0$  è pari a 2 Hz, corrispondente a un periodo di 0,5 secondi, le finestre temporali devono essere lunghe almeno 5 secondi.
2. Perché il criterio sia rispettato, la somma del numero di cicli di tutte le finestre deve essere superiore a 200.
3. Secondo il terzo criterio, la deviazione standard del rapporto H/V nell'intervallo di frequenze compreso tra la metà e il doppio di  $f_0$  deve essere inferiore a 2 o a 3 in base al valore di  $f_0$ .

Questi primi tre criteri dovrebbero essere tutti rispettati. Per quanto riguarda i rimanenti sei abbiamo:

4. Nell'intervallo di frequenze compreso tra la  $f_0$  e un quarto di  $f_0$  esista almeno una frequenza per cui il valore di ampiezza del rapporto H/V sia minore della metà dell'ampiezza alla frequenza  $f_0$ . Questo sta a significare che il picco deve essere ben distinto rispetto al resto della curva alle frequenze più basse di  $f_0$ .
5. Questo criterio è simmetrico rispetto al precedente, richiedendo che sia soddisfatta la stessa condizione nell'intervallo di frequenze compreso tra  $f_0$  e il suo quadruplo.
6. Il sesto criterio implica che l'ampiezza del rapporto H/V alla frequenza di risonanza  $f_0$  deve essere maggiore di 2.
7. Le curve di confidenza solitamente presentano anch'esse un picco in corrispondenza del picco della curva media. Perché questo criterio sia rispettato, la frequenza del picco delle curve di confidenza deve trovarsi nell'intervallo di frequenze delimitato dalla  $f_0 \pm 5\%$ .
8. Il picco evidenziato nella curva H/V media si trova anche nelle curve ricavate dall'elaborazione sulle singole finestre temporali, a una frequenza simile a  $f_0$ . Questo criterio richiede che la deviazione standard della frequenza del picco nelle singole finestre si mantenga al di sotto di una soglia dipendente da  $f_0$ ; le soglie sono indicate nell'apposita tabella sotto riportata.
9. Quest'ultimo criterio richiede che la deviazione standard dell'ampiezza della curva H/V media del singolo punto alla frequenza  $f_0$  si mantenga al di sotto di

una soglia dipendente da  $f_0$ ; le soglie sono indicate nell'apposita tabella sotto riportata.

Perché il picco in corrispondenza della frequenza di risonanza sia ritenuto chiaro, almeno cinque di questi sei criteri devono essere soddisfatti. In tabella 3.1 si riassumono i nove criteri SESAME.

<b>Criteri per una curva H/V affidabile</b> [Tutti 3 dovrebbero risultare soddisfatti]	$f_0 > 10 / L_w$ $n_c(f_0) > 200$ $\sigma_A(f) < 2$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 > 0.5\text{Hz}$ $\sigma_A(f) < 3$ per $0.5f_0 < f < 2f_0$ se $f_0 < 0.5\text{Hz}$				
<b>Criteri per un picco H/V chiaro</b> [Almeno 5 su 6 dovrebbero essere soddisfatti]	Esiste $f^-$ in $[f_0/4, f_0] \mid A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$ Esiste $f^+$ in $[f_0, 4f_0] \mid A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$ $A_0 > 2$ $f_{\text{picco}} [A_{H/V}(f) \pm \sigma_A(f)] = f_0 \pm 5\%$ $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ $\sigma_A(f_0) < \theta(f_0)$				
$L_w$ $n_w$ $n_c = L_w n_w f_0$ $f$ $f_0$ $\sigma_f$ $\varepsilon(f_0)$ $A_0$ $A_{H/V}(f)$ $f^-$ $f^+$ $\sigma_A(f)$  $\sigma_{\log H/V}$ $\theta(f_0)$	lunghezza della finestra numero di finestre usate nell'analisi numero di cicli significativi frequenza attuale frequenza del picco H/V deviazione standard della frequenza del picco H/V valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_f < \varepsilon(f_0)$ ampiezza media della curva H/V alla frequenza $f_0$ ampiezza media della curva H/V alla frequenza $f$ frequenza tra $f_0/4$ e $f_0$ alla quale $A_{H/V}(f^-) < A_0 / 2$ frequenza tra $f_0$ e $4f_0$ alla quale $A_{H/V}(f^+) < A_0 / 2$ deviazione standard di $A_{H/V}(f)$ , $\sigma_A(f)$ è il fattore per il quale la curva $A_{H/V}(f)$ media deve essere moltiplicata o divisa deviazione standard della funzione $\log A_{H/V}(f)$ valore di soglia per la condizione di stabilità $\sigma_A(f) < \theta(f_0)$				
Valori di soglia per $\sigma_f$ e $\sigma_A(f_0)$					
Intervallo di freq. [Hz]	< 0.2	0.2 – 0.5	0.5 – 1.0	1.0 – 2.0	> 2.0
$\varepsilon(f_0)$ [Hz]	0.25 $f_0$	0.2 $f_0$	0.15 $f_0$	0.10 $f_0$	0.05 $f_0$
$\theta(f_0)$ per $\sigma_A(f_0)$	3.0	2.5	2.0	1.78	1.58
$\log \theta(f_0)$ per $\sigma_{\log H/V}(f_0)$	0.48	0.40	0.30	0.25	0.20

Tabella 3.1. Quadro riassuntivo dei criteri SESAME.

A questo punto è doveroso riportare un importante aspetto riguardante l'attendibilità delle acquisizioni HVSR, in modo particolare Bonnefoy – Claudet ed altri, nel 2006 hanno dimostrato che a seconda della distribuzione spaziale della sorgente del rumore e la sua natura, il contrasto d'impedenza suolo/roccia, lo spessore dello strato di copertura e la forma del rapporto spettrale H/V potrebbero essere spiegati per mezzi stratificati orizzontalmente.



Infatti, come studiato da Cornou, Gueguen ed altri (2007), nel caso di valli sepolte profonde e strette gli effetti 2D e 3D possono dominare il pattern di risonanza e quindi, stimare la profondità della roccia o la velocità media delle onde di taglio con un modello 1D può portare a gravi errori soprattutto in prossimità dei bordi del bacino. Inoltre, in queste situazioni, le curve H/V non possono visualizzare un picco ma piuttosto un ampio plateau che complica l'identificazione della frequenza fondamentale di sito  $f_0$ .

Focalizziamo l'attenzione sull'orizzontalità dei layer, infatti, in un contesto simile a Piuro assumere la complanarità degli strati è un'ipotesi forzata ma che siamo "costretti" ad accettare al fine di valutare la profondità del bedrock, sfruttando quindi i numerosi vantaggi che ci offre il metodo e soprattutto l'impossibilità nell'optare per prove geofisiche alternative. Due su tutte, l'utilizzo di candelotti di dinamite nell'abitato di Piuro (notevole impatto ambientale e sulla popolazione) e l'impiego di vibroseis, in modo particolare il loro transito sui vari ponti e ponticelli. Infatti, questi mezzi meccanici dal peso di qualche decina di tonnellata in grado di introdurre nel terreno treni d'onda a determinate frequenze si adattano meglio in siti facilmente accessibili, meglio se in territori pianeggianti.

## **CAPITOLO 4**

# **STIMA PROFONDITÀ DEL BEDROCK**

Come accennato all'inizio del testo, uno degli obiettivi del presente elaborato è valutare la profondità in cui si trova il bedrock geologico tramite le registrazioni del rumore ambientale a disposizione.

### **4.1 Dati a disposizione**

Per raggiungere il nostro scopo sono state analizzate ed elaborate decine di misure HVSR acquisite sia dall' Università Statale di Milano sia dal Politecnico di Milano.

I rilievi sono relativamente recenti, infatti quelli più datati risalgono al 2017. Si tratta di misure realizzate all'interno del comune di Piuro, in Valchiavenna, in differenti periodi dell'anno, ore della giornata e con condizioni climatiche variabili ma comunque senza troppi disturbi quali pioggia o vento eccessivo.

I dati a disposizione consistono nelle registrazioni del rumore ambientale nelle due componenti orizzontali e in quella verticale, come già trattato nel capitolo legato al metodo HVSR.

La tipica strumentazione adottata per questo tipo di misure consiste in un sismometro a tre componenti, una batteria, un digitalizzatore ed un'antenna GPS, come mostra la figura 4.1.



Figura 4.1. Sismometro, batteria, digitalizzatore, antenna GPS. Da “Analisi di fattibilità sull’utilizzo di metodi geofisici per lo studio della frana di Piuro (SO)” tesi di Anna Zinetti.

In particolare, le misure acquisite da PoliMI costituiscono un transetto di misure allineate (in rosso) ed altre quattro misure (in azzurro), come mostrato in figura 4.2 mentre quelle di UniMI, più numerose, riescono a coprire più aree del comune di Piuro.

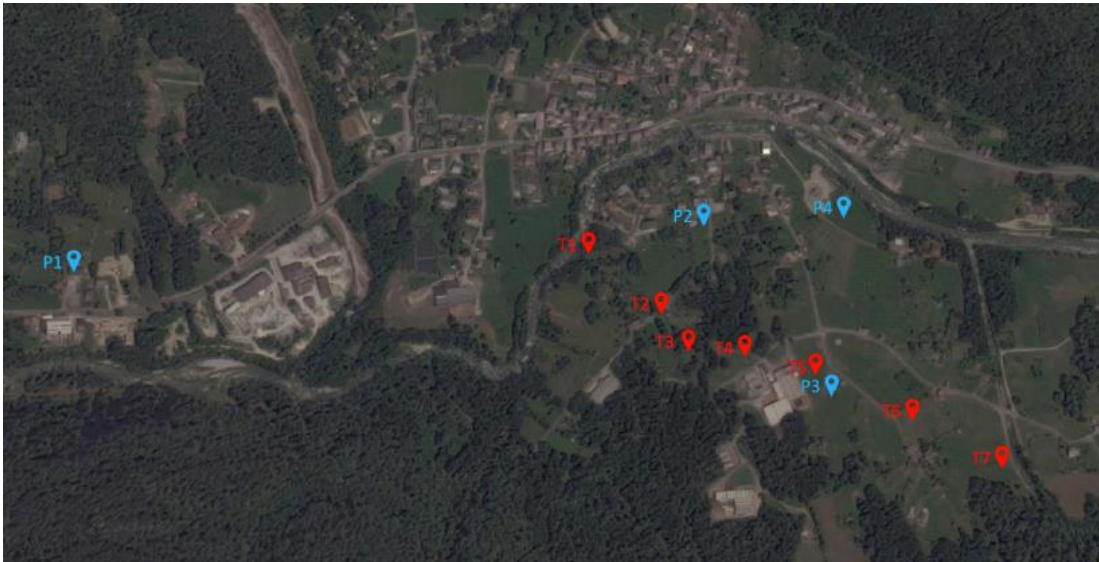


Figura 4.2. Misure HVSR realizzate da PoliMI. Da “Analisi di fattibilità sull’utilizzo di metodi geofisici per lo studio della frana di Piuro (SO)” tesi di Anna Zinetti.

## 4.2 Elaborazione delle acquisizioni mediante software Geopsy

Le componenti del rumore sono state analizzate ed elaborate tramite il software open source Geopsy, nato all'interno del progetto europeo SESAME. All'interno del quale vengono importate le registrazioni del rumore ambientale, nelle tre componenti registrate in sito. Viene riportata tramite la figura 4.3 una schermata rappresentativa all'interno del software.

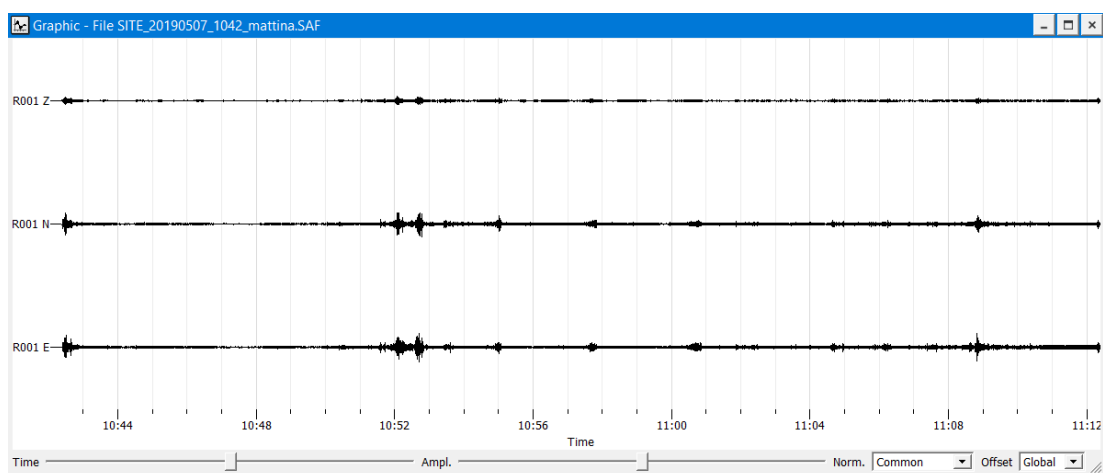


Figura 4.3. Le tre componenti del rumore ambientale importate in Geopsy.

Al fine di ottenere una curva HVSR affidabile, su alcune misure sono state condotte alcune operazioni una volta caricate in Geopsy. Come spesso accade, l'istante iniziale di registrazione delle tre componenti del rumore può non coincidere, per questo motivo sono stati tagliati gli istanti iniziali al fine di sincronizzarlo.

Per via del passaggio degli operatori accanto allo strumento di misura, e quindi per eliminare questo disturbo, qualora la registrazione sia sufficientemente lunga è possibile tagliare anche gli ultimi minuti.

A tutte le registrazioni è stato applicato un filtro high pass al 5% al fine di considerare unicamente le frequenze superiori a 0,05 Hz.

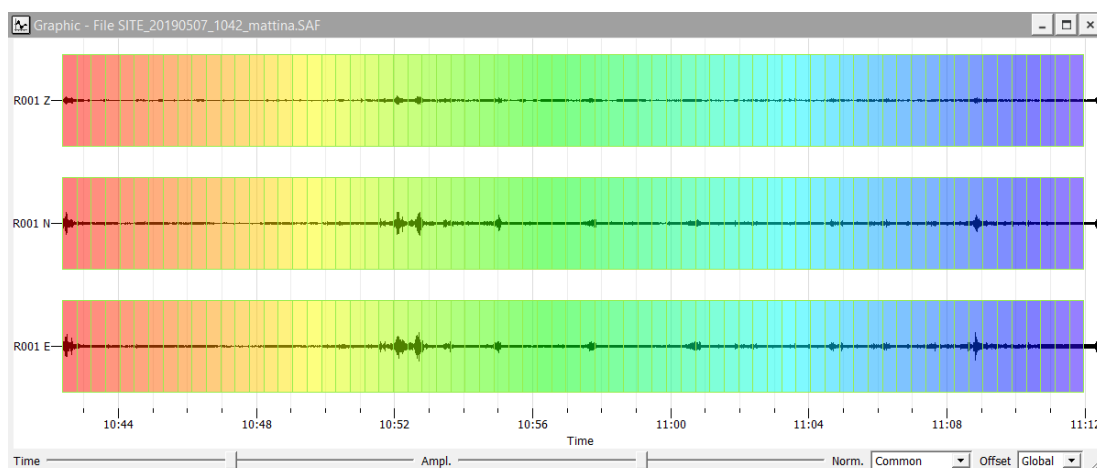


Figura 4.4. Esempio di suddivisione in finestre temporali del rumore registrato.

Il segnale viene suddiviso in finestre temporali, visibile in figura 4.4, di lunghezza scelta di default dal programma ma comunque modificabile secondo le proprie esigenze e ad ogni finestra viene assegnato un colore per poter essere distinta dalle altre. Nel nostro caso le ampiezze delle finestre sono di 25 e 60 secondi. Le finestre meno ampie sono giustificate dal fatto che la registrazione ha una durata di circa mezz'ora, le finestre più lunghe sono legate a registrazioni di qualche ora.

A questo punto, segue il processo di smoothing del segnale basato sulla metodologia di Konno & Ohmachi (tra le molteplici metodologie che il programma dispone). Il software calcola gli spettri di ampiezza di Fourier, in base all'output imposto 0,5 - 30 Hz, ovvero un range di frequenza entro cui valutare l'andamento H/V.

Come limite superiore è stata scelta la frequenza di 30 Hz dato che nell'ambito del nostro caso di studio non si ha la necessità di analizzare frequenze più alte, poiché significherebbe risonanza in prossimità della superficie mentre il nostro scopo è trovare la quota di profondità del bedrock. La frequenza minima è stata fissata a 0,5 Hz eseguendo quindi un cut off rispetto alle frequenze più basse.

A questo punto Geopsy avvia il processo iniziando a calcolare la media delle due componenti orizzontali del rumore registrato, tramite la (11):

$$H = \frac{\sqrt{NS^2 + EW^2}}{2} \quad (11)$$

e per ogni finestra temporale ricavare il rapporto H/V tramite la formula (12):

$$\log_{10} \left( \frac{H}{V} \right) \quad (12)$$

Infine, la curva H/V è stata calcolata come media dei rapporti delle  $n$  finestre considerate, tramite la (13):

$$(H/V)_{media} = \frac{\sum \log_{10} \left( \frac{H}{V} \right)}{n} \quad (13)$$

E la deviazione standard di ogni curva come riporta l'equazione (14):

$$\sigma_{H/V} = \sqrt{\frac{\sum \log_{10}^2 \left( \frac{H}{V} \right) - n \cdot \log_{10}^2 \left( \frac{H}{V} \right)_{media}}{n}} \quad (14)$$

La restituzione finale del programma è un grafico inserito in un piano cartesiano, in cui alle ascisse troviamo le frequenze mentre il rapporto H/V alle ordinate. In particolar modo è individuabile lo spettro di frequenza, cioè l'andamento del rapporto H/V medio individuato dalla linea nera continua e le curve che ne rappresentano la deviazione standard (una superiore e una inferiore) mediante linea nera tratteggiata. Inoltre, sono presenti curve colorate che rappresentano l'andamento del rapporto H/V delle singole finestre temporali (il colore della curva richiama lo stesso colore della finestra corrispondente) ed infine tramite due bande grigie verticali si individua sulle ascisse la  $f_0$  o frequenza di risonanza del sito. L'ampiezza delle due bande indica la deviazione standard della frequenza.

### 4.3 Risultati ottenuti

Dopo aver elaborato le acquisizioni in Geopsy sono emerse curve HVSR con uno o più picchi ben definiti, curve con picchi meno evidenti e altre che presentano andamenti pressoché costanti e quindi prive di picchi. Come si ricorda, ad ogni picco corrisponde una frequenza di risonanza del sito,  $f_0$ .

Sono emersi 120 picchi corrispondenti a frequenze che vanno da un minimo di circa 1 Hz ad un massimo superiore ai 20 Hz. Tutte le frequenze sono state suddivise in bande ben definite per poterle analizzare e rappresentare, come si vedrà meglio di seguito. Per ottenere l'ampiezza della classe si divide la differenza tra la minima e la massima frequenza considerata per il numero di bande volute. Come frequenza massima si considera 3 Hz e non 20 Hz o superiore perché costringerebbe ad avere intervalli di frequenza troppo ampi e dato che circa il 75% delle  $f_0$  si trova a basse frequenze si sarebbe ottenuta una concentrazione di frequenze in una banda (essendo molto ampia) e l'assenza di dati nelle restanti, rendendo vana e inutile la scelta della suddivisione in classi. Si sono effettuate diverse prove per scegliere il numero di classi meglio rappresentativo e alla fine si sono scelte 5 bande di frequenza. Questo sta a significare che una frequenza che si trova in una determinata banda potrà differire al massimo del 20% rispetto ad una contenuta in una banda adiacente. Il 20% permette di avere una sufficiente sovrapposizione di banda che fa sì che si possano classificare tutti gli eventi in una banda piuttosto che l'altra. Scegliere un intervallo di frequenze più stretto (e quindi avere più bande) non ci permette di avere un grado di accuratezza significativo risultando più complicata l'interpretazione.

Riassumendo, la scelta delle bande è utile quando si hanno tanti dati concentrati in un range ristretto; per questa ragione, come accennato sopra, le bande di ampiezza uguale sono state adottate nel range compreso tra la frequenza minima assoluta (1,044 Hz) e la frequenza pari a 3 Hz. Oltre i 3 Hz, data la minore concentrazione di dati sono state adottate tre classi di ampiezza maggiore. Per completezza si riporta qui sotto l'elenco delle bande adottate e in figura 4.5 la totalità dei dati all'interno di ciascuna banda.

- Da 1,044 a 1,435 Hz
- da 1,435 a 1,826 Hz
- da 1,826 a 2,218 Hz
- da 2,218 a 2,609 Hz
- da 2,609 a 3 Hz
- da 3 a 10 Hz
- da 10 a 20 Hz
- maggiore di 20 Hz

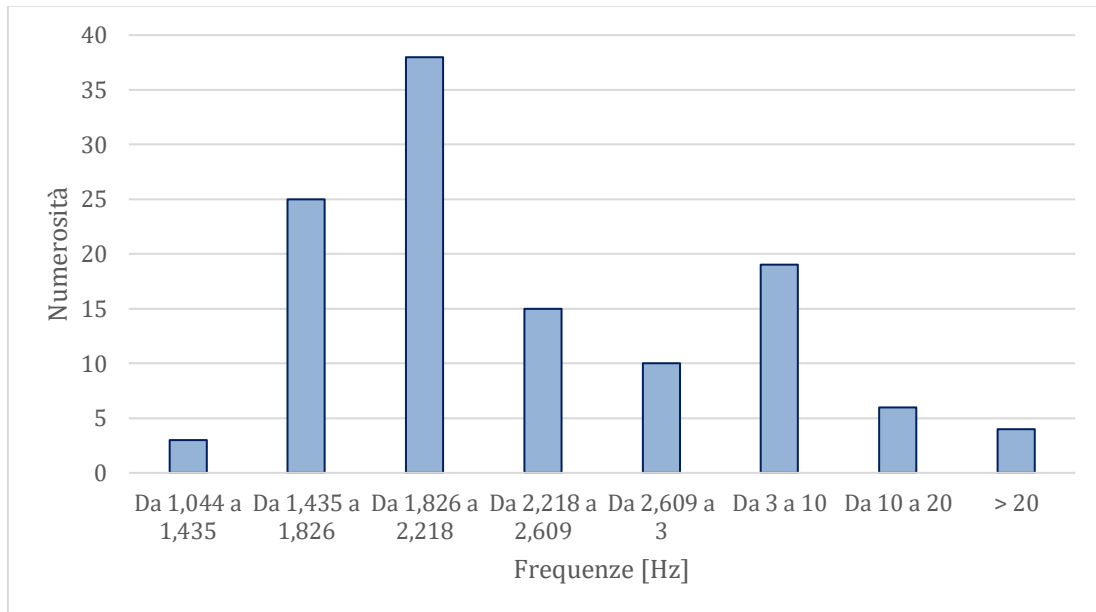


Figura 4.5. Rappresentazione della totalità dei dati suddivisi per bande di frequenza.

Al fine di classificare in modo oggettivo i dati ottenuti, si sono applicati i criteri SESAME alle curve HVSR. Si ricorda che i criteri sono nove; tutti i dati considerati verificano i primi tre criteri (condizione necessaria per la validità della curva). Se dei rimanenti sei ne vengono rispettati almeno cinque, il dato è attendibile. I picchi che ne verificano quattro sono meno attendibili e così via a diminuire.

Si può facilmente intuire che spingerci a considerare “validi” anche i picchi (di conseguenza le frequenze) che soddisfano pochi criteri (ad esempio tre, due o uno solo), oltre ad essere poco attendibili, ci porterebbero a forzare le interpretazioni relative all’andamento del bedrock. Ci limitiamo quindi a considerare unicamente picchi che soddisfano 4 o più criteri. In figura 4.6 si riassume la totalità dei dati suddivisi per numero di criteri SESAME rispettati.



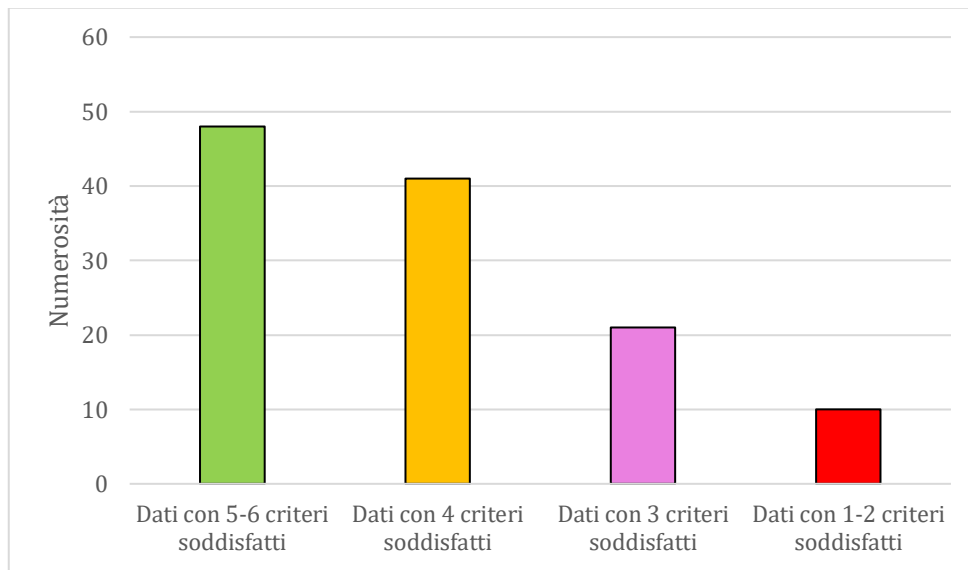


Figura 4.6. *Criteri SESAME rispettati.*

Si riportano di seguito alcune delle elaborazioni eseguite su Geopsy, ognuna delle quali soddisfa un certo numero di criteri. Come si evince dalle figure sottostanti, le figure 4.7 e 4.8 mostrano un picco ben delineato e rispettante rispettivamente sei e quattro criteri, mentre le figure 4.9 e 4.10 presentano picchi meno accentuati, specialmente quest'ultima poiché verifica solamente due criteri su sei. La scelta di aver considerato "buono" un dato che soddisfa un certo numero di criteri, nel nostro caso quattro, viene confermata oltre che numericamente, anche a livello visivo osservando gli evidenti picchi nelle curve H/V.

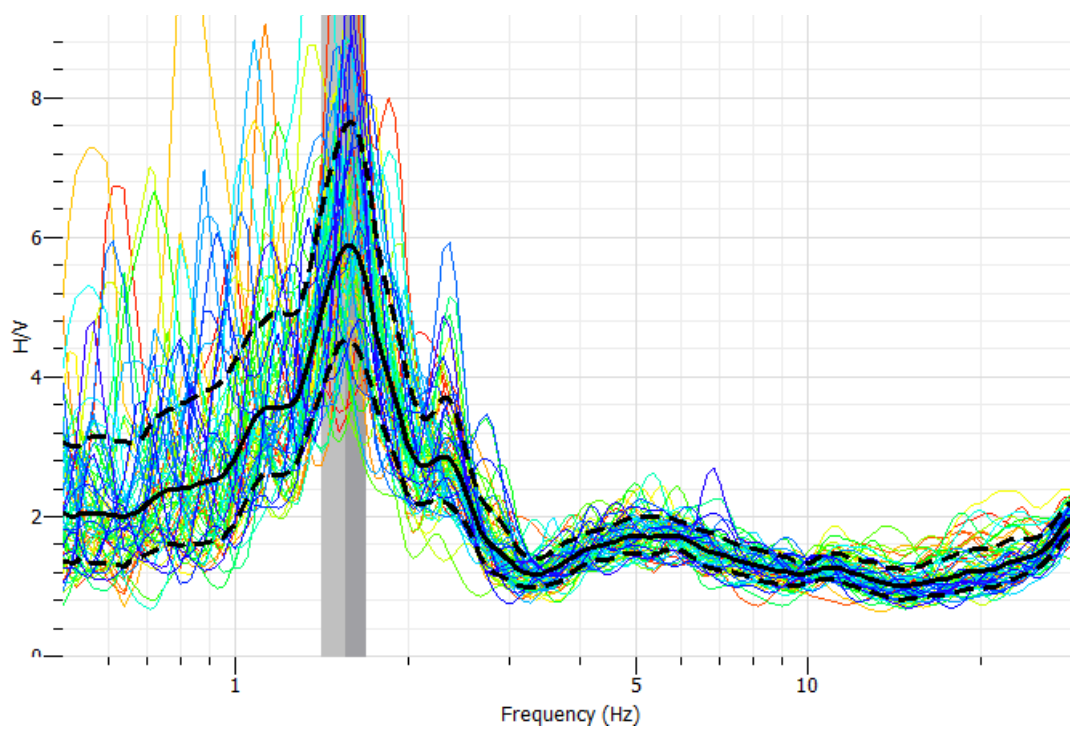


Figura 4.7. Picco che verifica tutti i criteri SESAME.

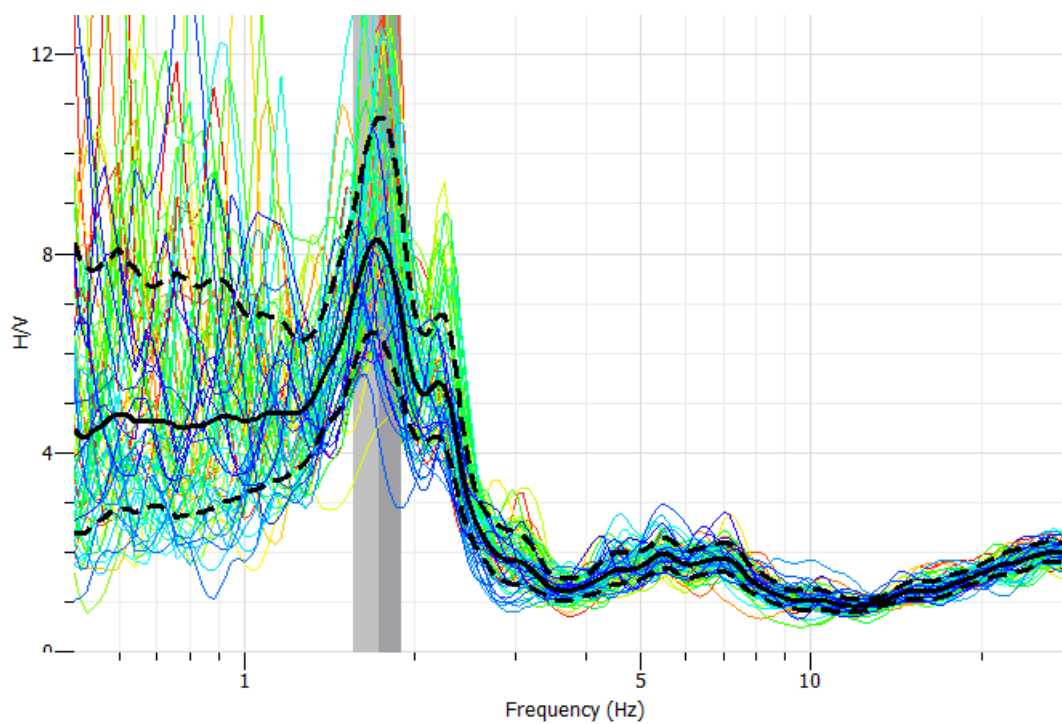


Figura 4.8. Picco che verifica quattro criteri su sei.

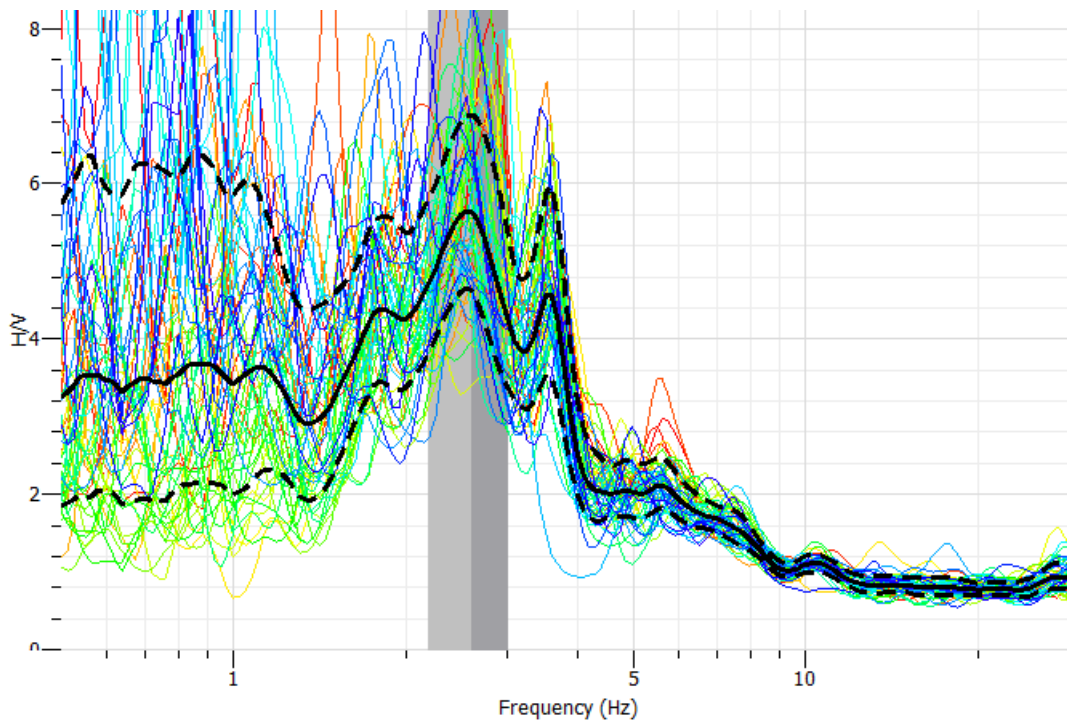


Figura 4.9. *Picco che verifica tre criteri su sei.*

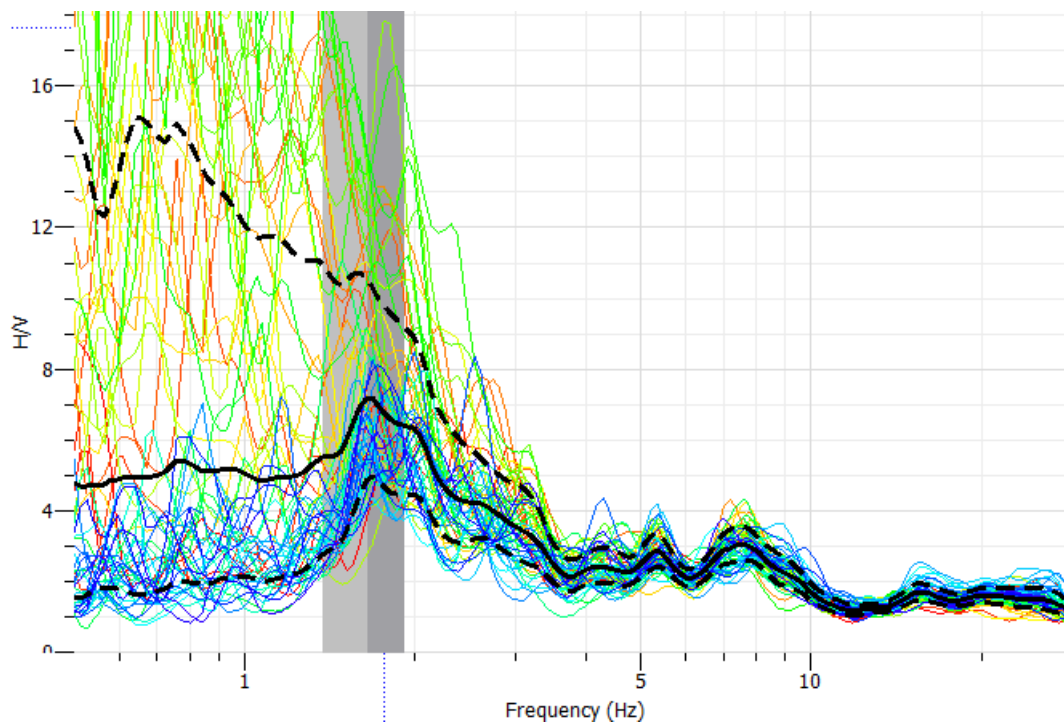


Figura 4.10. *Picco che verifica due soli criteri.*

Per completezza si riportano i grafici che mettono in relazione i dati che soddisfano un certo numero di criteri SESAME e le frequenze coinvolte. Iniziamo con i picchi all'interno delle curve H/V che soddisfano cinque e sei criteri, figura 4.11. Si nota una prevalenza di dati all'interno della banda 1,8 ÷ 2,2 Hz che decade spostandoci nelle bande adiacenti.

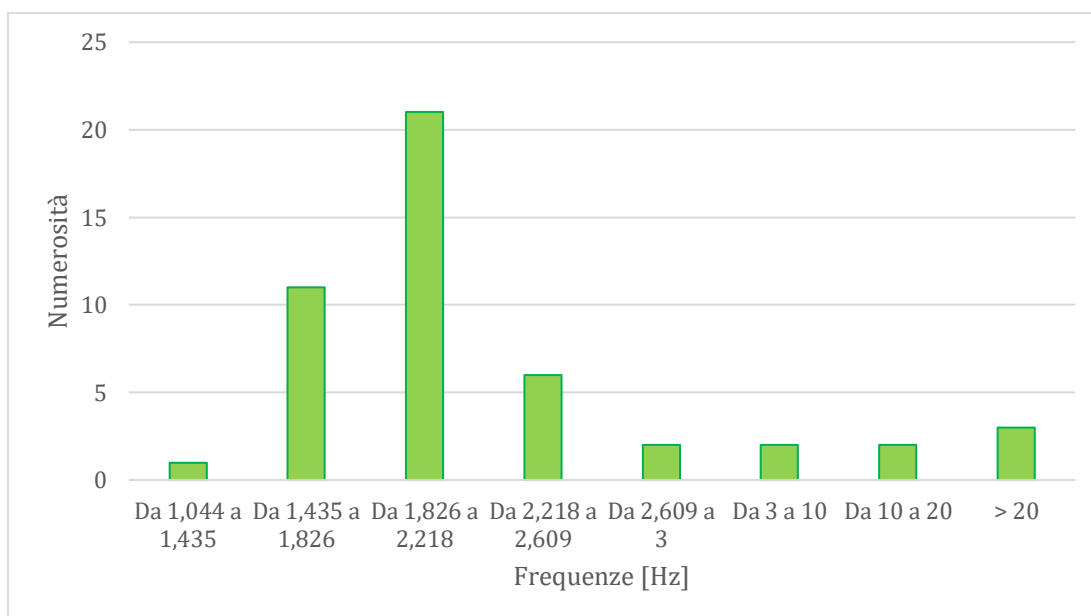


Figura 4.11. Distribuzione frequenze che soddisfano 5 e 6 criteri SESAME.

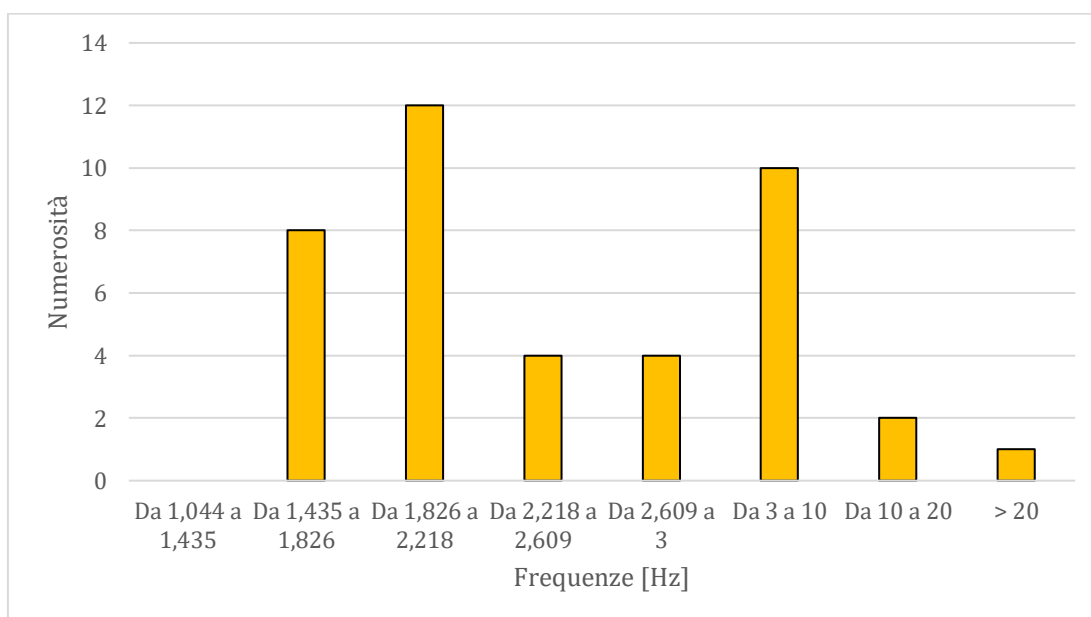


Figura 4.12. Distribuzione frequenze che soddisfano 4 criteri SESAME.

Considerando l'istogramma a barre gialle di figura 4.12 ci si riferisce ai dati che verificano 4 criteri su 6. Qui sotto, in figura 4.13 è riportato in viola il grafico riferito ai 3 criteri mentre in rosso quello riferito ad 1 e 2 criteri soddisfatti, figura 4.14.

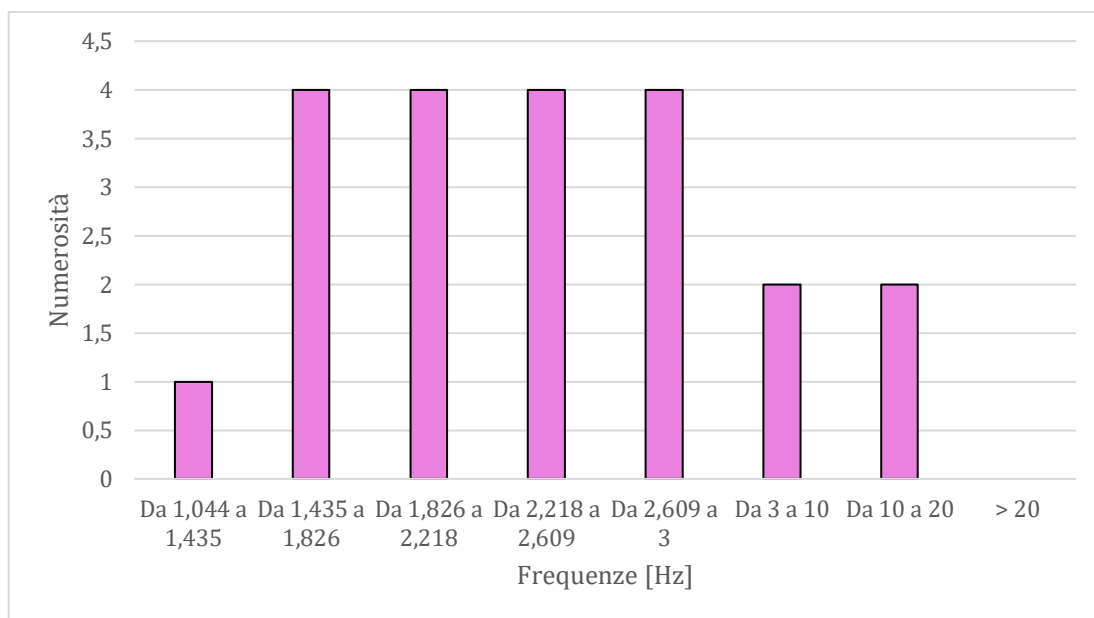


Figura 4.13. Distribuzione frequenze che soddisfano 3 criteri SESAME.

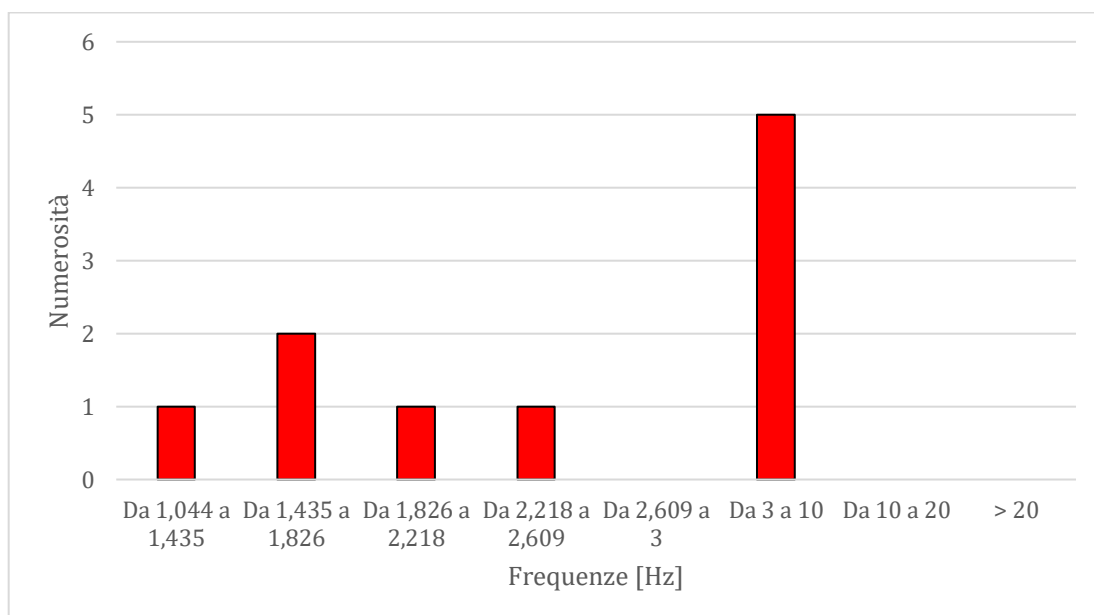


Figura 4.14. Distribuzione frequenze che soddisfano 1 e 2 criteri SESAME.

Considerando la totalità dei dati analizzati, si nota una distribuzione randomica delle frequenze, infatti osservando i quattro grafici, non convergono quantità di dati solamente in corrispondenza di una certa banda di frequenze.

Il grafico riportato in figura 4.15 riassume quanto detto finora.

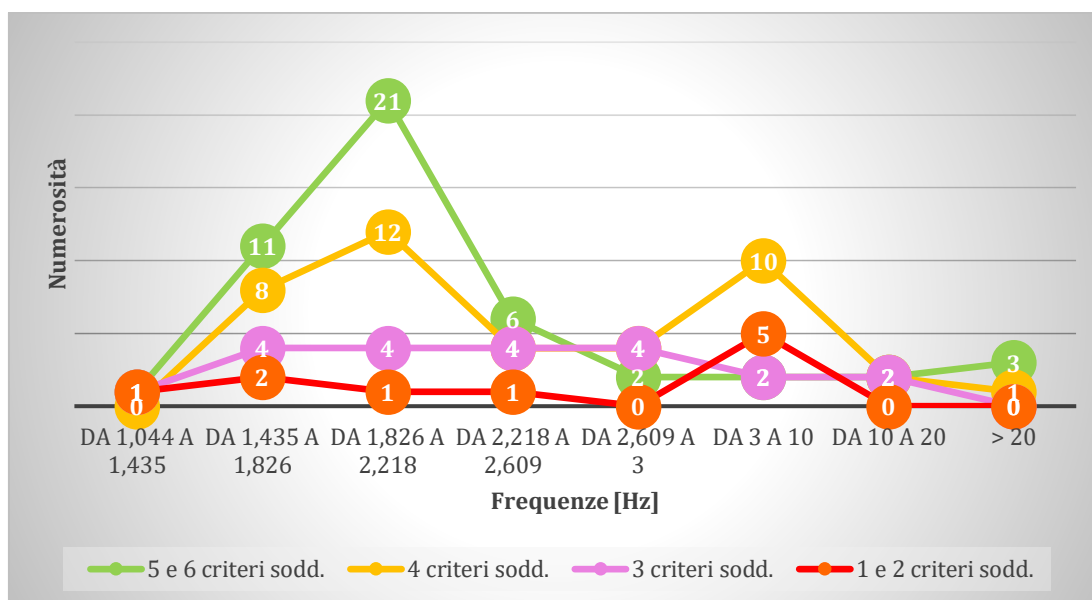


Figura 4.15. Riassunto della totalità dei dati. Frequenze – criteri soddisfatti.

## 4.4 Importazione dei risultati su software Qgis









Al fine di visualizzare la distribuzione spaziale delle frequenze di risonanza ricavate dalle analisi con Geopsy, si sono georeferenziati i rilievi di Piuro tramite il software Qgis. Ad ogni punto rilevato (definito tramite longitudine e latitudine sistema WGS84) è associata la rispettiva frequenza di sito.

Le frequenze che corrispondono a picchi soddisfacenti 5 e 6 criteri SESAME sono considerate “dati attendibili”, mentre “meno attendibili” quelle corrispondenti a 4 criteri verificati. Definito questo, sono stati analizzati due gruppi di dati: quelli attendibili e quelli meno attendibili, all’interno dei quali si trovano le classi di frequenza definite nel sotto capitolo 4.3.

Per rendere più comprensibili l'insieme dei dati è stata scelta la seguente simbologia:

- dati attendibili
- dati meno attendibili

e tanti colori quante sono le bande di frequenza.

- Da 1,044 a 1,435 Hz 
- da 1,435 a 1,826 Hz 
- da 1,826 a 2,218 Hz 
- da 2,218 a 2,609 Hz 
- da 2,609 a 3 Hz 
- da 3 a 10 Hz 
- da 10 a 20 Hz 
- maggiore di 20 Hz 

Nel seguito del sotto capitolo verrà mostrata la distribuzione spaziale delle frequenze; si ribadisce che la differenza tra esse è rappresentata unicamente dai differenti colori; le dimensioni dei cerchi o dei quadrati è solamente un artificio grafico per meglio rappresentarle.

Prima di analizzare come si dispongono le  $f_0$  nell'area di Piuro è importante definire le ipotesi che sono state adottate per il caso di studio, in particolare:

- Le frequenze alte possono derivare, quindi essere influenzate, da sorgenti esterne ad esempio campi elettromagnetici presenti nell'area.
- Criterio di maggior probabilità: su spazi così piccoli, avere tante misure ci può permettere di mantenere valide quelle misure che hanno la maggior ripetibilità.

Per una migliore comprensione del lavoro svolto, si immagini il territorio di Piuro suddiviso in quattro aree evidenziate nella foto aerea riportata in figura 4.16.

Abbiamo la zona 1 ad Ovest, una zona 2 centrale, la zona 3 ad Est in corrispondenza dell'eliporto ed infine la quarta zona a Sud dell'abitato, posta a monte.

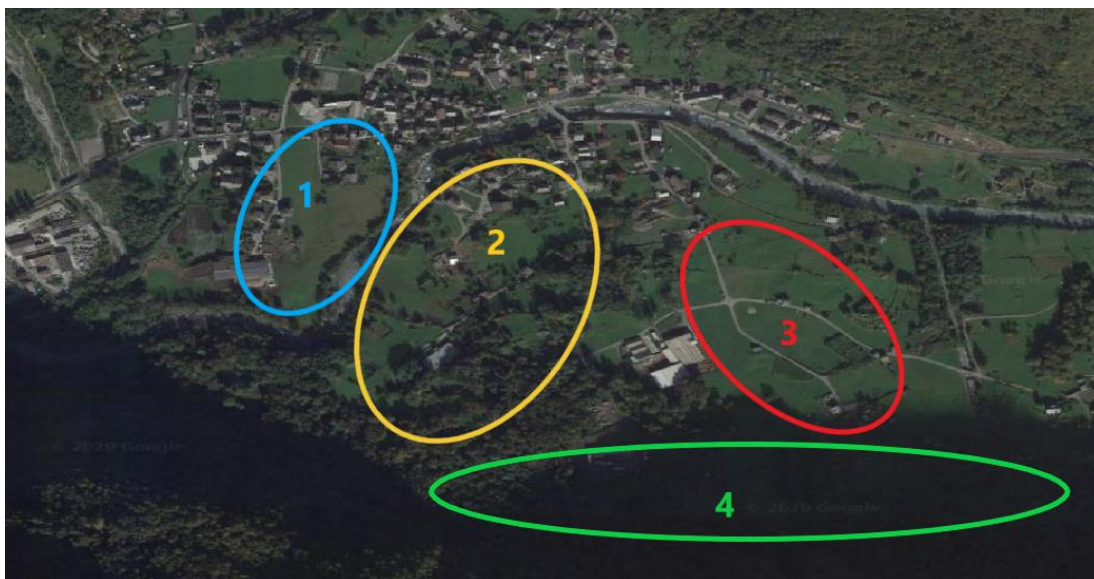


Figura 4.16. Borgonuovo di Piuro: le quattro aree considerate. Fonte Google Maps.

Iniziamo ad analizzare come si dispongono le  $f_0$  considerando i vari intervalli di frequenza descritti precedentemente. Le frequenze più basse, ritenute attendibili (cerchi nella simbologia adottata) vanno a disporsi come in figura 4.17. In particolare, nel prato ad Ovest si ha coerenza nei dati in quanto si trovano unicamente le frequenze che stanno nella banda  $1,4 \div 1,8$  Hz, stessa cosa nella zona centrale, mentre nella zona 3 prevalgono le frequenze comprese nell'intervallo  $1,8 \div 2,2$  Hz riportate in rosso. Nella zona di monte, per il momento, non appare nulla di rilevante.





Figura 4.17. Frequenze attendibili: da 1,4 a 2,2 Hz. Fonte Google Maps.

Se introduciamo nella foto aerea anche i dati risultati meno attendibili (considerando, per ora, solamente le due bande di cui sopra) ciò che accade è una conferma di quanto detto. Ad Ovest viene ribadita la presenza di frequenze basse (in azzurro) mostrando una forte coerenza dei dati, quella centrale è una sorta di zona “di transizione” mentre ad Est si ha un’ulteriore introduzione di frequenze tra  $1,8 \div 2,2$  Hz (quadratini in rosso) come si osserva nella figura 4.18.



Figura 4.18. Frequenze attendibili e meno: da 1,4 a 2,2 Hz. Fonte Google Maps.

Importiamo le frequenze leggermente più alte, in particolare i range  $2,2 \div 2,6$  Hz in verde e  $2,6 \div 3$  Hz in giallo, considerando sia dati attendibili che meno attendibili. Solamente tre dati si trovano nella zona dell'incrocio, di cui due verdi ed uno giallo, mentre i rimanenti si posizionano più a Sud, verso monte, si veda la figura 4.19.



Figura 4.19. Frequenze attendibili e meno: da  $2,2$  a  $3$  Hz. Fonte Google Maps.

Procedendo con le frequenze che si trovano nell'intervallo  $3 \div 10$  Hz (in blu) notiamo due aspetti principali; il primo è dato dal fatto che parte dei dati tendono a posizionarsi verso Sud invece altri nell'area 3, visibile in figura 4.20.

Il disporsi verso monte è una conferma di ciò che si trova in letteratura: le frequenze alte tendono verso monte, mentre quelle minori a valle.

Per quanto riguarda il secondo aspetto, la presenza di queste frequenze, alte, rispetto a quelle presenti nel loro intorno viene interpretata come un'influenza legata alla presenza di accumuli di massi presenti nell'area, come quello cerchiato in bianco nell'immagine 4.20. In particolar modo questi ammassi possono causare un effetto di bordo che viene rilevato dallo strumento di misura come una frequenza alta.

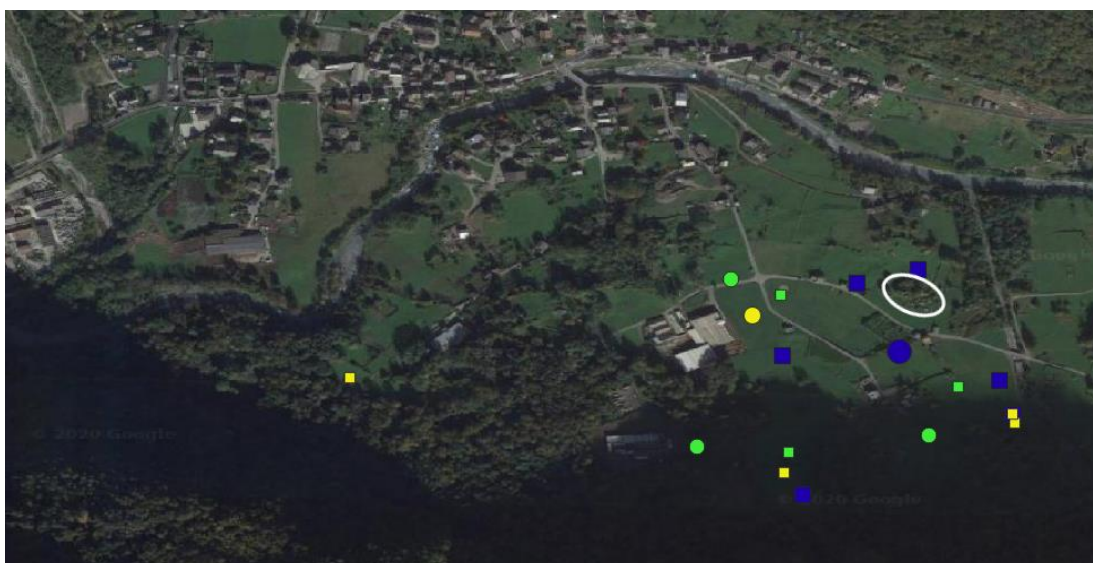


Figura 4.20. *Frequenze attendibili e meno: da 2,2 a 10 Hz. Fonte Google Maps.*

Giunti a questo punto, si sarà notato che le frequenze più alte, superiori ai 10 Hz, ancora non sono state trattate. Si è constatato che esse si dispongono lungo particolari direzioni, ovvero nelle aree in corrispondenza del passaggio della linea elettrica aerea a 50 Hz.

Alla base del metodo HVSR è nota la possibile influenza della misura quando ci troviamo in prossimità di sorgenti antropiche; per questo motivo i valori di frequenza alta (tendenzialmente dai 2,2 Hz in su) sono considerati influenzati dal campo generato dalle linee. Si riporta di seguito, in figura 4.21, il grafico che mostra l'andamento tipico del campo elettrico e di quello magnetico in relazione alla distanza dalla linea percorsa da corrente. In corrispondenza dello zero sulle ascisse, siamo esattamente sotto al filo e man mano ci allontaniamo, i campi elettrico e magnetico decadono. Questo è un grafico che si riferisce alla linea principale ad alta tensione, la nostra linea, essendo di distribuzione avrà un grafico con lo stesso andamento ma con valori più bassi.



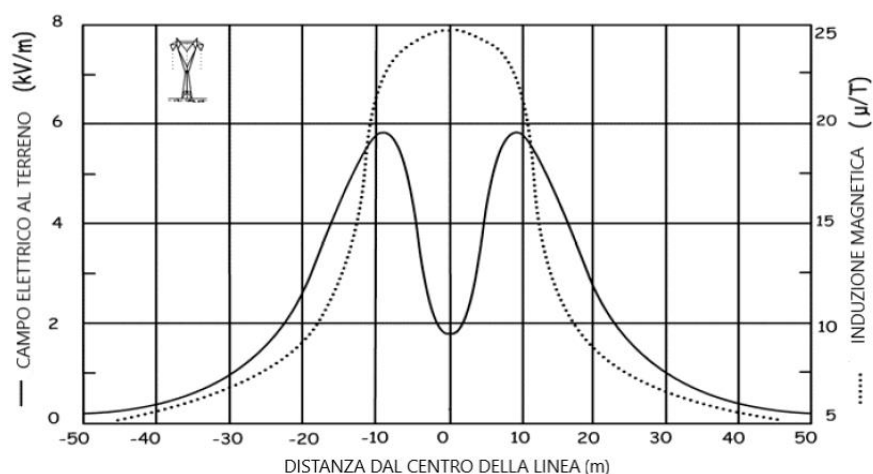


Figura 4.21. Grafico relativo al campo elettromagnetico al suolo. Da "Rumori elettromagnetici di origine naturale e antropica" C. Bianchi, A. Meloni.

Il tracciato della linea elettrica, in rosso (ricavato tramite Google Maps e dal Geo portale della Provincia di Sondrio) viene mostrato in figura 4.22.



Figura 4.22. Tracciato linea elettrica aerea. Fonte Google Maps e Geo portale provincia di Sondrio.

Le alte frequenze che si posizionano in prossimità dei cavi in tensione, cioè quelle dai 2,2 Hz (in verde) ad oltre i 20 Hz (in arancione) sono riportate in figura 4.23.



Figura 4.23. Frequenze superiori ai 2,2 Hz in prossimità della linea. Fonte Google Maps.

In questi punti di misura, ovvero in corrispondenza della linea elettrica, molto spesso sono presenti anche frequenze molto più basse (dato che in una curva H/V possono esserci più picchi). In questi casi, tutta la misura è stata scartata considerando l'intero rilievo influenzato dalla linea. Pertanto, tutte le frequenze, basse o alte che siano, ritenute influenzate dai disturbi elettromagnetici sono visibili nella figura 4.24.



Figura 4.24. Totalità delle Frequenze (basse e alte) influenzate dalla linea. Fonte Google Maps.

Riepilogando, la totalità dei dati che ci permettono di trarre le nostre conclusioni circa l'andamento del bedrock ovvero quelle misure ritenute più o meno attendibili ma comunque non influenzate in alcun modo da sorgenti antropiche esterne, sono riepilogate nella figura 4.25.

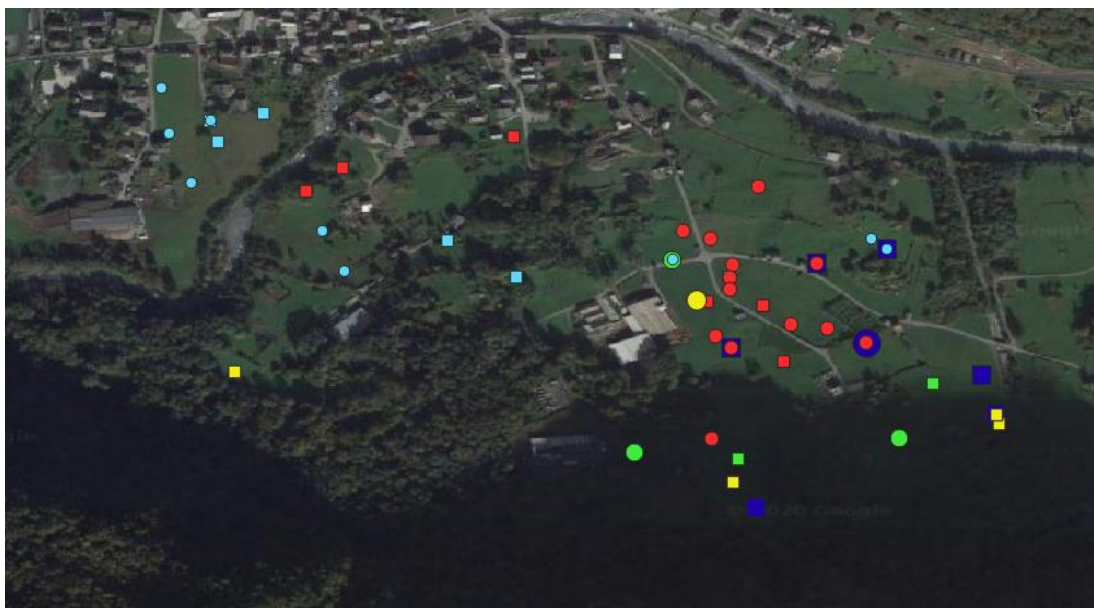


Figura 4.25. Prospetto definitivo delle misure ritenute valide. Fonte Google Maps.

## 4.5 Valutazioni finali sulla disposizione delle frequenze di risonanza nel sito

In seguito all'elaborazione con il software Geopsy, in base alle valutazioni condotte circa l'attendibilità dei dati e la loro vicinanza alla linea elettrica, tramite il grafico riportato in figura 4.26 si rappresenta la totalità dei dati suddivisi in tre categorie.

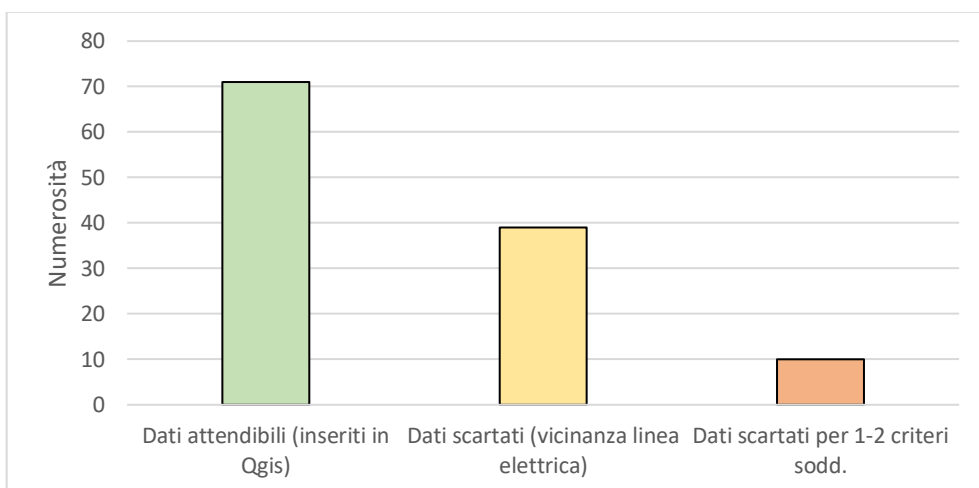


Figura 4.26. Prospetto delle misure ritenute valide e di quelle scartate. Fonte Google Maps.

Mostriamo più in dettaglio, nei due grafici seguenti, quali frequenze ricadono nei dati considerati attendibili (figura 4.27), quindi inseriti in Qgis (colonna verde) e quali scartati per vicinanza alla linea elettrica (colonna gialla) riportati in figura 4.28.

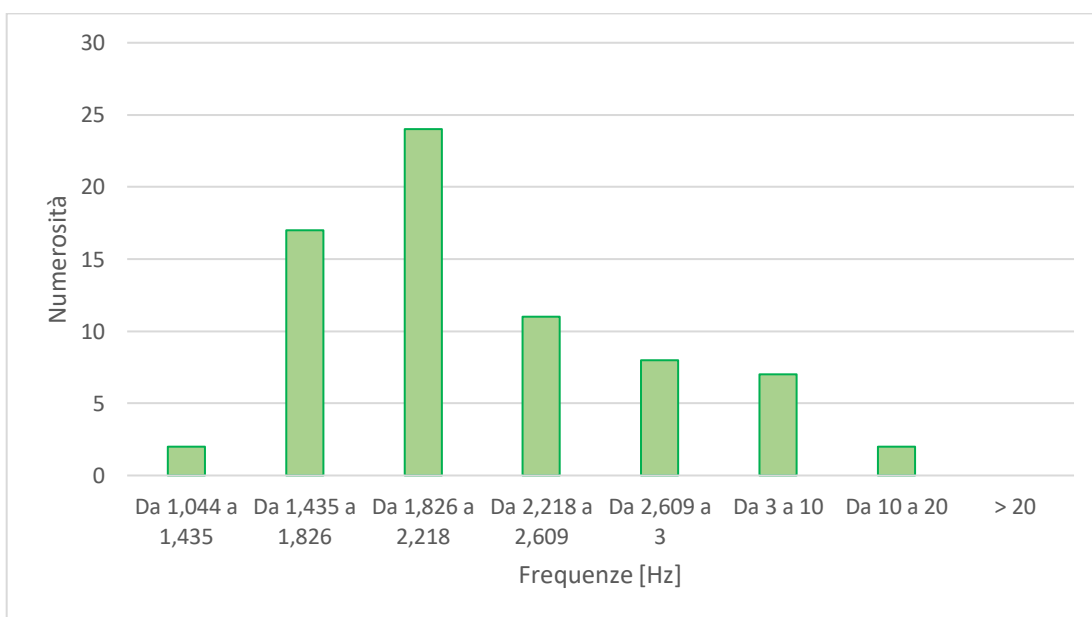


Figura 4.27. Distribuzione frequenze in riferimento a tutti i dati attendibili.

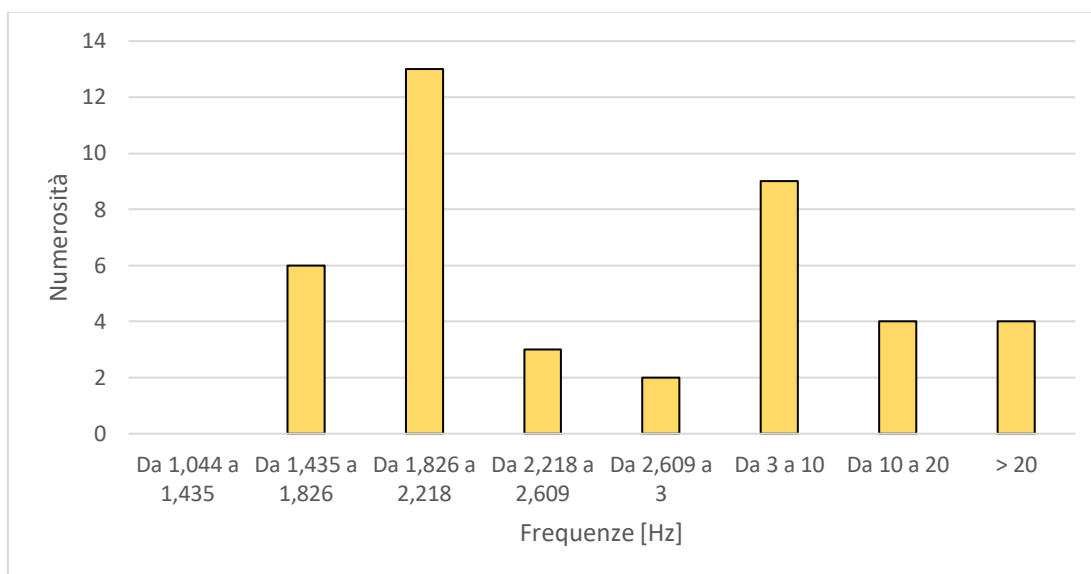


Figura 4.28. Distribuzione frequenze in riferimento ai dati scartati per vicinanza linea elettrica.

I valori in questo ultimo grafico, riportato in figura 4.28, come detto precedentemente, sono influenzati dal campo elettromagnetico generato dalla linea e dato che questo problema si risente maggiormente alle alte frequenze, mi sembra corretto spendere due parole sulle evidenti colonne gialle in corrispondenza delle bande  $1,4 \div 1,8$  e  $1,8 \div 2,2$  Hz, frequenze tutto sommato basse, costituite da tutti quei valori che si trovano nel punto rilevato (nell'area prossima alla linea) in cui è presente una frequenza alta.

In questi casi, si ribadisce per chiarezza, tutta la misura è stata considerata influenzata dal campo elettromagnetico, pertanto scartata.

## 4.6 Conclusioni sull'andamento del bedrock in base ai risultati ottenuti

In riferimento alla sezione di una valle montana, proprio come la Valchiavenna, riportata in figura 4.29, è rappresentato il bedrock e lo strato di ricoprimento. Quest'ultimo, come è lecito aspettarsi, presenta spessore maggiore a valle e diminuisce salendo verso monte. Per quanto riguarda le frequenze, quelle di monte sono più alte e man mano ci spostiamo verso il fondovalle le frequenze si abbassano. Questo aspetto è legato chiaramente dalla formula (15) che lega la velocità media delle onde S, lo spessore dello strato ed appunto la frequenza di risonanza:



$$f = \frac{Vs}{4H} \quad (15)$$

È possibile ricavare lo spessore dello strato invertendo la (15):

$$H = \frac{Vs}{4f} \quad (16)$$

È evidente constatare che se consideriamo frequenze basse si hanno alti valori dello spessore di ricoprimento  $H$ , viceversa con valori più alti di frequenza, la profondità dello strato è meno importante.

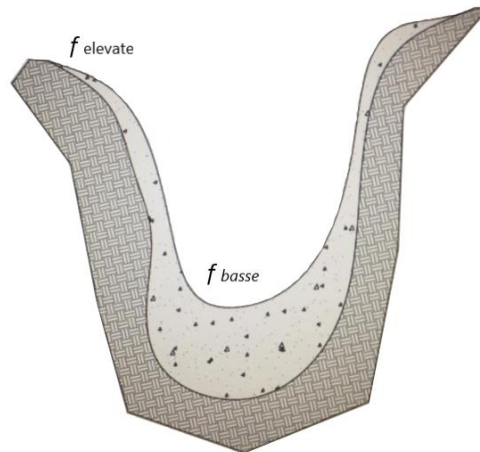


Figura 4.29. Sezione tipo di una valle: bedrock e materiale di ricoprimento.

Dagli studi condotti dall' Università Statale di Milano, legati a stabilire quale forma rappresenti meglio la valle di Piuro, si sono ipotizzate due possibili sezioni della stessa. La prima, riportata in figura 4.30 (a sinistra) fa riferimento ad una vallata ad "U" in cui il substrato roccioso si mantiene sempre ad una certa profondità, come descritto all'inizio di questo sotto capitolo.

L'altra possibile forma della valle presenta una risalita del substrato nella zona centrale, come si evince in figura 4.30 (a destra).

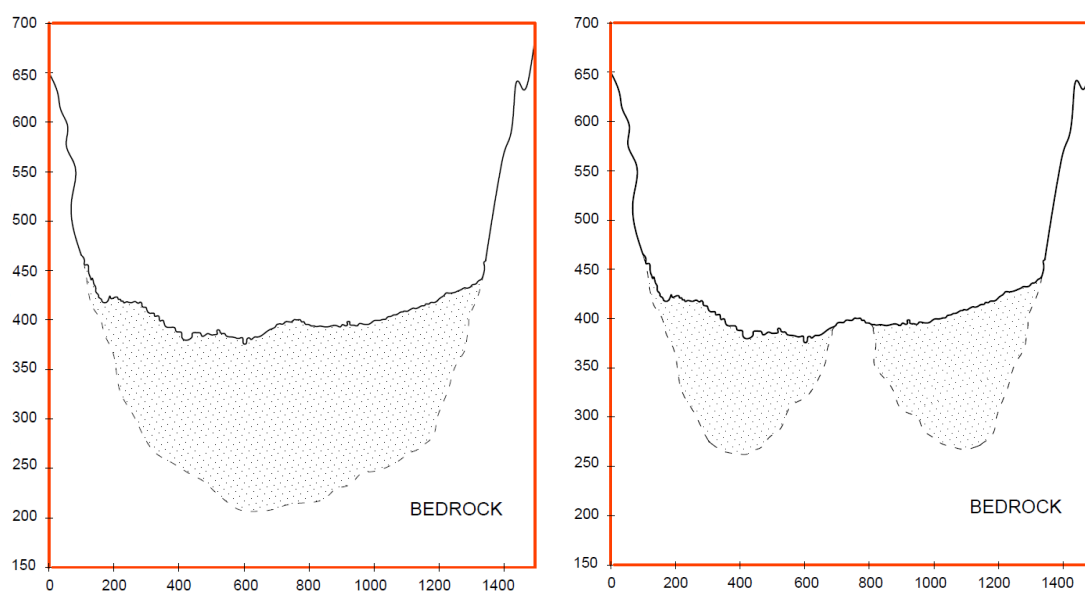


Figura 4.30. Le due possibili forme della valle

Le indagini HVSR confermano la prima ipotesi, escludendo perciò la seconda, poiché per avere una risalita del bedrock così marcata si sarebbero dovute trovare frequenze ben più alte di quelle effettivamente riscontrate nella zona centrale.

Immaginando di sezionare trasversalmente la valle, dalla linea di sezione bianca in figura 4.31, la ricostruzione tridimensionale del territorio ha un aspetto simile a quello riportato nella figura 4.32.

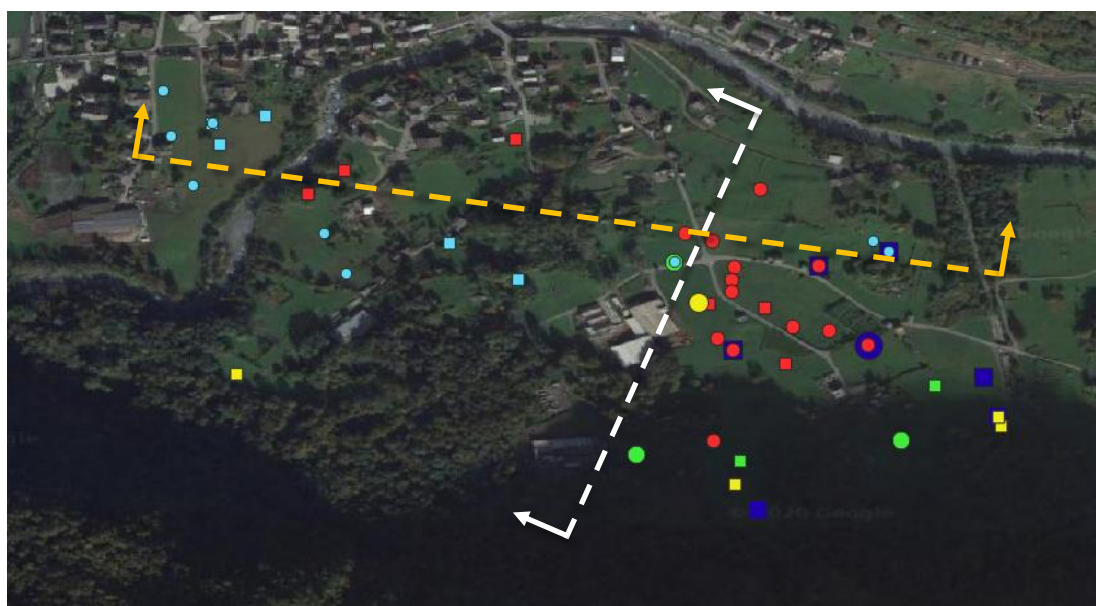


Figura 4.31. Riepilogo misure e linee di sezione della valle.

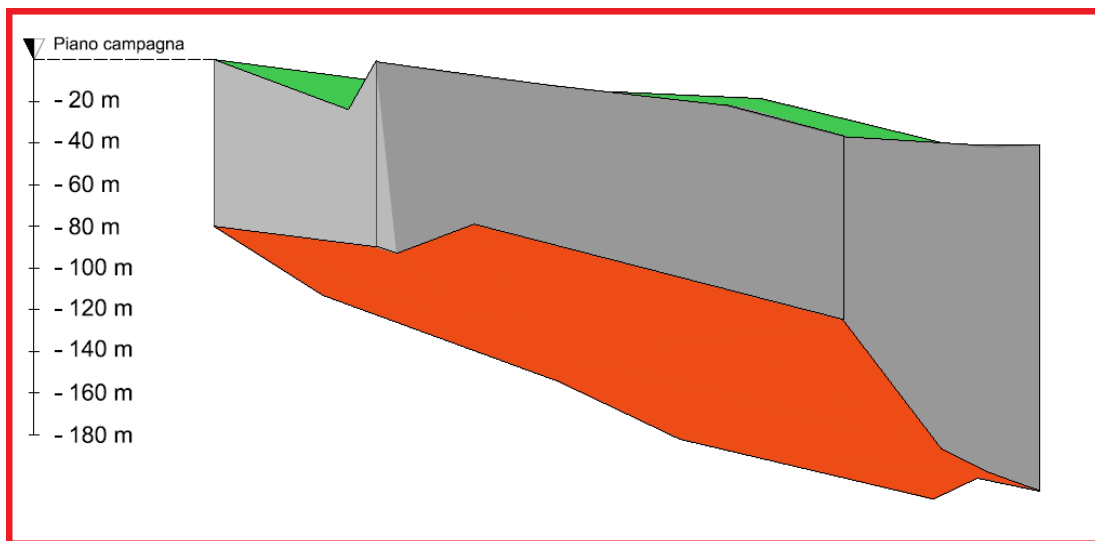


Figura 4.32. Ricostruzione 3D della valle (vista trasversale).

In rosso è rappresentato il bedrock mentre in verde il piano campagna.

Spendiamo due parole sulle frequenze che si trovano a Sud dell'abitato; si nota una sorta di allineamento di frequenze che passa da rosso, verde, giallo e poi blu. Sono valori crescenti verso monte, a conferma del fatto che risalendo la montagna, abbiamo una diminuzione dello spessore di ricoprimento.

Focalizziamoci ora longitudinalmente (linea di sezione gialla in figura 4.31), tornando alle misure eseguite, le frequenze di risonanza ottenute dalle elaborazioni ci suggeriscono una risalita del bedrock da Ovest verso Est. Infatti, si hanno frequenze basse nella zona 1 (riportate in azzurro), che aumentano man mano ci spostiamo in zona 2 ed infine in zona 3 (maggioranza di rosse, verdi, blu), come si evince nella stessa figura 4.31. La ricostruzione 3D è rappresentata in figura 4.33.

I dati a disposizione sono sì spazialmente distribuiti ma come si può notare, sono prevalentemente disposti in direzione Nord/Ovest – Sud/Est.

Disporre di altri dati da elaborare, meglio se rivolti nel senso Nord/Est – Sud/Ovest ci permetterebbe di trarre ulteriori (e più precise) conclusioni circa l'andamento del substrato roccioso.

Per le due ricostruzioni tridimensionali si è utilizzato AutoCAD con vista 3D. In particolare, si è calcolata la profondità del substrato mediante la formula (16) applicata ai vari punti rilevati, essendo nota la frequenza di risonanza. Come velocità

media delle onde S si è utilizzata per tutti i punti una velocità approssimativa a quella ricavata dal carotaggio, che verrà descritto nel capitolo 6, pari a 1000 m/s.

Per ottenere una ricostruzione tridimensionale più fedele, si dovrebbero conoscere le velocità medie puntuali nelle varie zone rilevate. Questo significherebbe ottenerle grazie alla realizzazione di un numero di pozzi talmente elevato da non risultare economicamente sostenibile.

Utilizzando un software per interpolare le varie profondità del bedrock, unitamente ad un modello digitale del terreno, si avrebbe una restituzione tridimensionale più fedele alla realtà. Questo lavoro è stato preso in carico dal laboratorio di Topografia del Politecnico di Milano.

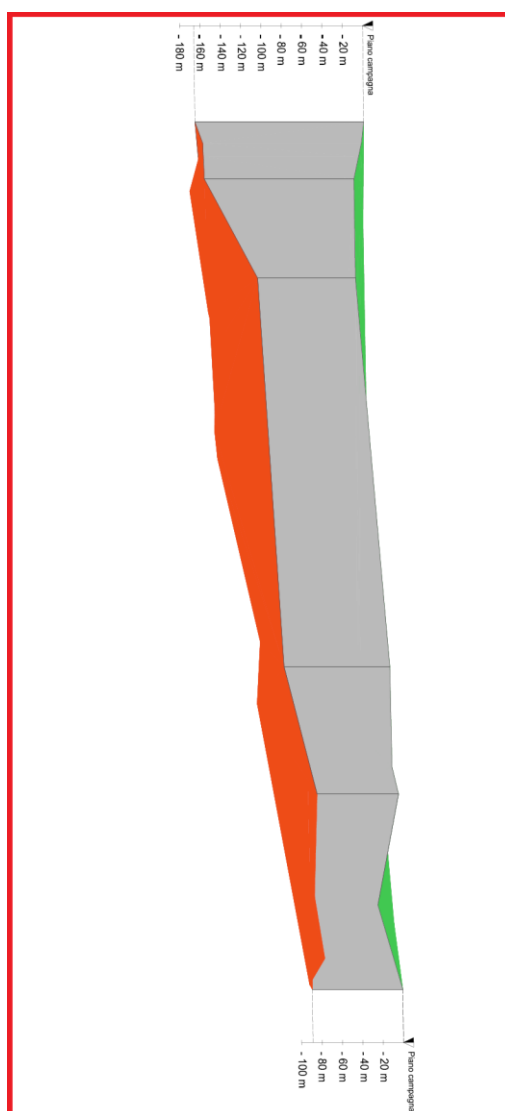


Figura 4.33. Ricostruzione 3D della valle (vista longitudinale).

# **CAPITOLO 5**

## **CARATTERIZZAZIONE DEL CORPO DI**

### **FRANA**

Dopo esserci occupati di quello che c'è in profondità, in questo capitolo focalizzeremo l'attenzione sui primi metri nel sottosuolo, con lo scopo di individuare i vari strati presenti e cercare di localizzare la frana del 1618. Tratteremo innanzitutto il metodo utilizzato, la sismica a rifrazione, per poi mostrare i risultati ottenuti.

#### **5.1 Realizzazione di un carotaggio**

Al fine di caratterizzare il sottosuolo, in termini di materiali incontrati, velocità delle onde sismiche negli stessi e soprattutto individuare tra i vari layer l'evento del 1618, è stato realizzato un carotaggio nell'area Sud della frazione Borgonuovo di Piuro, come mostrato nell'immagine 5.1.

Il lavoro è stato svolto da Interreg Italia-Svizzera per il progetto A.M.AL.PI.18 e la carota prelavata nel punto di coordinate geografiche  $46^{\circ}19'23.9''$  N  $9^{\circ}26'30.3''$  E è stata analizzata e caratterizzata dall'Università degli Studi di Milano.

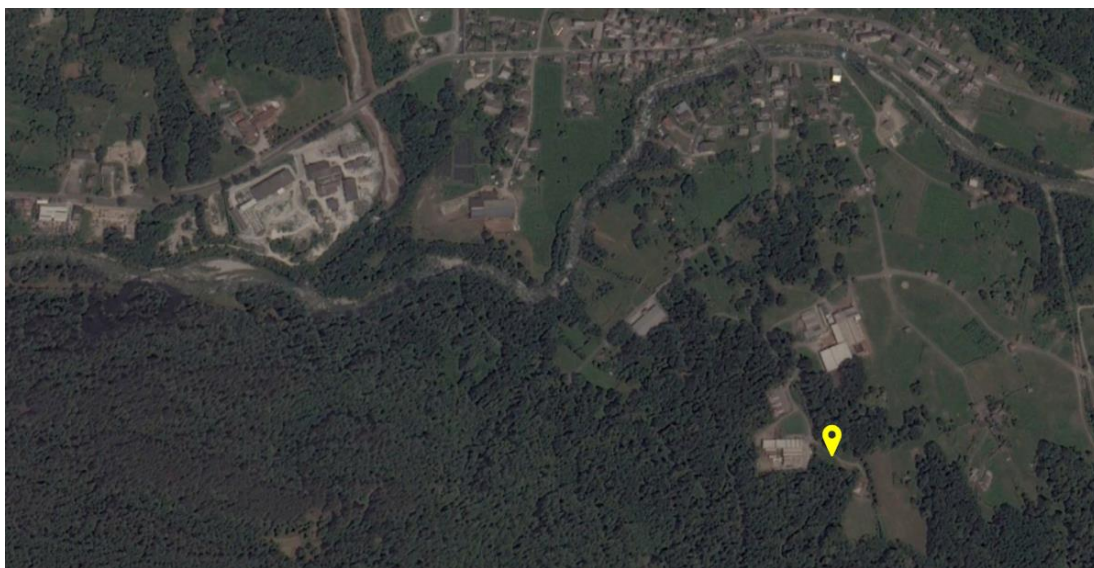


Figura 5.1. Localizzazione del punto in cui è stato realizzato il pozzo.

Il macchinario utilizzato per questo tipo di prova è il carotiere in Figura 5.2, simile ad una perforatrice con diametro pari a 101 mm o 131 mm semplice o doppio con il quale si ricavano campioni cilindrici attraverso un carotaggio continuo secco nei primi metri e con circolazione diretta di acqua e polimeri dopo.

Il carotaggio è stato eseguito fino alla profondità di 75 m senza però aver raggiunto il substrato roccioso, quindi, non è stato possibile far affidamento alla prova per l'individuazione della base della frana e per la stima del volume del corpo. Altro aspetto fondamentale è la presenza di materiali pressoché omogenei e molto compatti tra loro, tali da rendere difficoltoso il riconoscimento della frana del 1618. La velocità delle onde S (calcolata tramite media ponderata) è pari a circa 1080 m/s.

Le carote cilindriche prelevate dalla prova, sono state usate per la definizione della colonna stratigrafica dei primi 75 metri e per lo studio dei bordi degli smottamenti. Si pensa infatti che la frana del '600 sia stata coperta da successivi due crolli.



Figura 5.2. Perforazione eseguita tramite sonda a rotazione con l'utilizzo di doppio carotiere. Da "Analisi di fattibilità sull'utilizzo di metodi geofisici per lo studio della frana di Piuro (SO)" tesi di Anna Zinetti.

## 5.2 Sismica a rifrazione

Le indagini sismiche a rifrazione consentono di interpretare la stratigrafia del sottosuolo attraverso il principio fisico del fenomeno della rifrazione totale di un'onda sismica che incide su una discontinuità, individuata fra due corpi aventi proprietà meccaniche diverse. La condizione fondamentale per eseguire studi di sismica a rifrazione è quella per cui la successione di strati da investigare sia caratterizzata da velocità sismiche crescenti all'aumentare della profondità. In questo modo si possono valutare fino a 4 o 5 orizzonti rifrattori differenti.

È un metodo non invasivo che si basa sulla misura dei tempi di primo arrivo delle onde sismiche (P o S) generate in superficie da una sorgente sismica e captate da ricevitori (geofoni) anch'essi posizionati in superficie, su un allineamento a diverse distanze dalla sorgente. I tempi di primo arrivo, correlati alle diverse distanze sorgente-ricevitore, permettono di stimare le geometrie del sottosuolo (topografia o disposizione morfologica delle interfacce) e delle velocità di propagazione delle onde sismiche.



E' importante operare con geometria il più possibile lineare e un intervallo geofonico costante, benché i software più recenti permettano di inserire qualsiasi tipo di geometria spaziale dei ricevitori e degli scoppi (x,y,z). L'intervallo geofonico scelto deve essere inversamente proporzionale al grado di risoluzione che si vuole ottenere dalla prospezione sismica mentre la lunghezza dello stendimento è sempre proporzionale alla profondità da raggiungere (profondità dell'indagine pari a circa lunghezza stendimento / 3-5)

Analizzando i sismogrammi registrati dai geofoni, in particolare localizzando i primi arrivi ai geofoni (operazione di picking) è possibile determinare le dromocrome, ovvero dei grafici che indicano i tempi di arrivo delle onde sismiche rifratte. Queste operazioni e le successive, necessarie a restituire le stratigrafie del sottosuolo sono state condotte mediante il software Reflex. Per migliori chiarimenti teorici legati al metodo, si rimanda al sito di Geostru-rifrazione sismica nelle indagini geofisiche.

### 5.3 Il metodo applicato al contesto di Piuro

Sono stati realizzati quattro stendimenti, tre dei quali posizionati nella zona orientale del paese mentre uno nella parte occidentale, come mostrato in figura 5.3.



Figura 5.3. Localizzazione dei quattro stendimenti per sismica a rifrazione.



Tutti gli stendimenti sono costituiti da 24 geofoni distanziati di 2 m tra loro e sono state eseguite 7 battute per ogni stendimento (3 all'interno dello stesso e 4 esternamente). I punti di battuta sono contrassegnati in rosso come mostra la figura 5.4 in cui si riporta lo schema della prova legato allo stendimento 1.

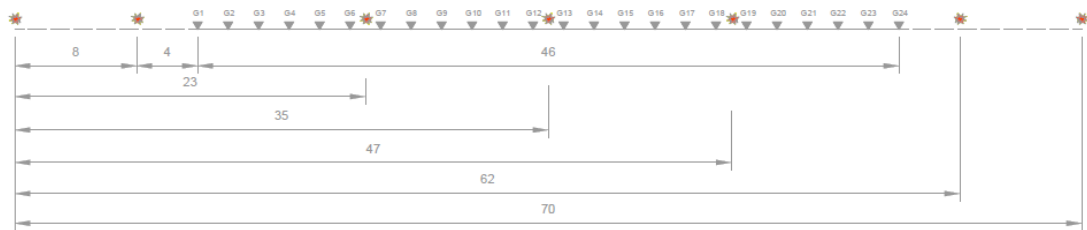


Figura 5.4. Schema dello stendimento 1.

Questa geometria è la stessa per gli stendimenti 2 e 4; lo stendimento 3 si differenzia per il fatto che la prima battuta (e di conseguenza l'ultima, essendo simmetrico) è stata effettuata a 16 m dal primo geofono (e dal 24-esimo) al contrario dei 12 m rappresentati sopra.

La generazione di onde sismiche è stata effettuata mediante una mazza su di un'opportuna piastra per agevolare la penetrazione delle stesse nel sottosuolo e migliorare l'accoppiamento meccanico sorgente-terreno. Se ne riporta un esempio in figura 5.5.



Figura 5.5. Mazza come sorgente di onde sismiche: Da <http://www.studiogeologiabosco.it/microzonazione-sismica>.

## 5.4 Risultati ottenuti

Le registrazioni dei singoli geofoni sono state importate nel software di elaborazione Reflex. Si riportano alcune schermate all'interno del programma.

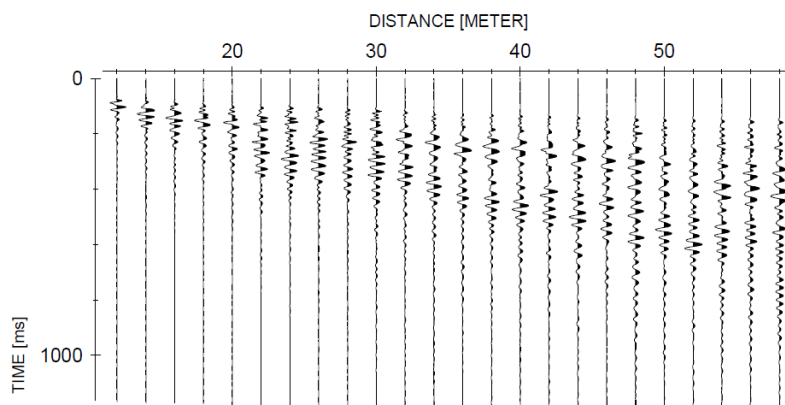


Figura 5.6. Registrazioni ai geofoni, punto di battuta 4 m prima del geofono G1.

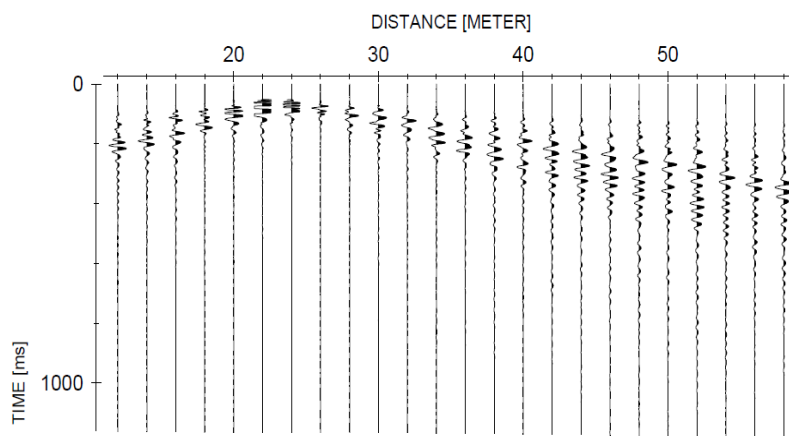


Figura 5.7. Registrazioni ai geofoni, punto di battuta tra i geofoni G6 e G7.

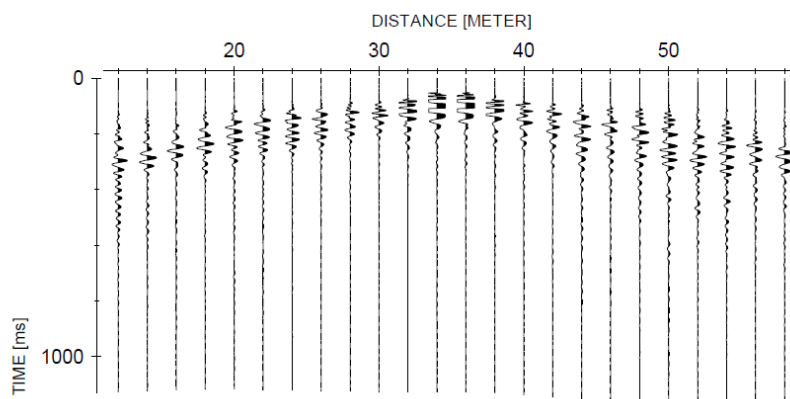


Figura 5.8. Registrazioni ai geofoni, punto di battuta tra i geofoni G12 e G13.

Il procedimento di elaborazione prevede l'operazione di picking del segnale, in altre parole l'individuazione del primo arrivo ad ogni geofono, come nella schermata di figura 5.9.

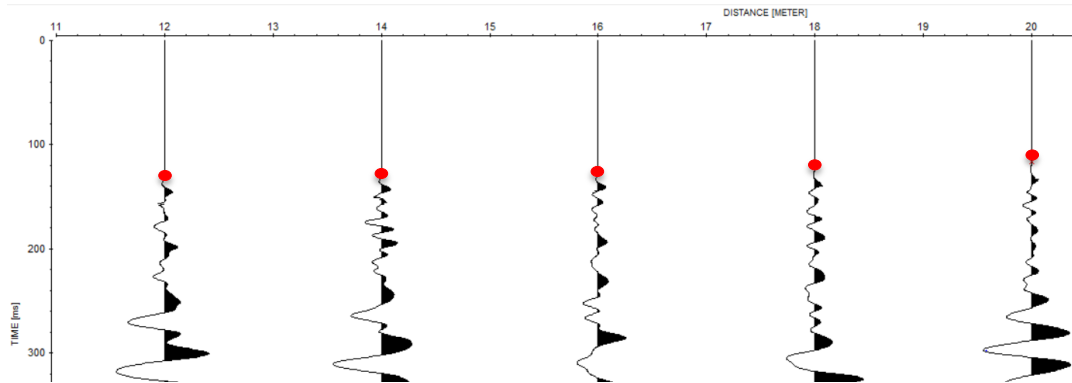


Figura 5.9. Zoom sui segnali: in rosso l'istante di primo arrivo registrato dai geofoni.

Questo è indispensabile per poter generare in modo automatico le dromocrone, accennate nel sotto capitolo 5.2 e mostrate nell'esempio di figura 5.10 relativo allo stendimento 1. Dopo avere selezionato le dromocrone con pendenza costante (stessa velocità) con lo stesso colore, si procede ad assegnarle ad un determinato strato del sottosuolo. Si procede così per tutte le dromocrone; nel nostro caso sono emerse tre colorazioni differenti corrispondenti a tre layer distinti.

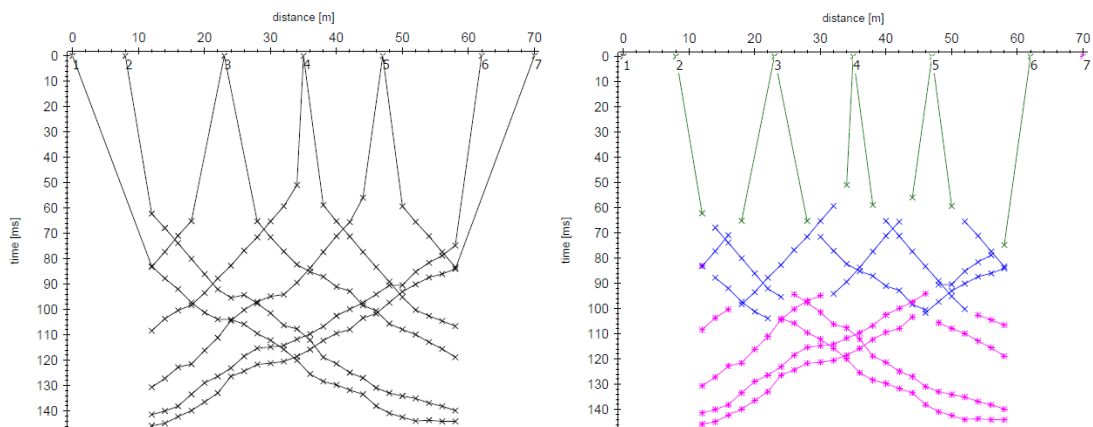


Figura 5.10. Dromocrone stendimento 1 (a sinistra), selezione delle dromocrone per i diversi layer, (a destra).

A questo punto, Reflex è in grado di restituirci il profilo stratigrafico del sottosuolo in corrispondenza dello stendimento considerato. Si riportano di seguito le elaborazioni risultanti dai 4 stendimenti.

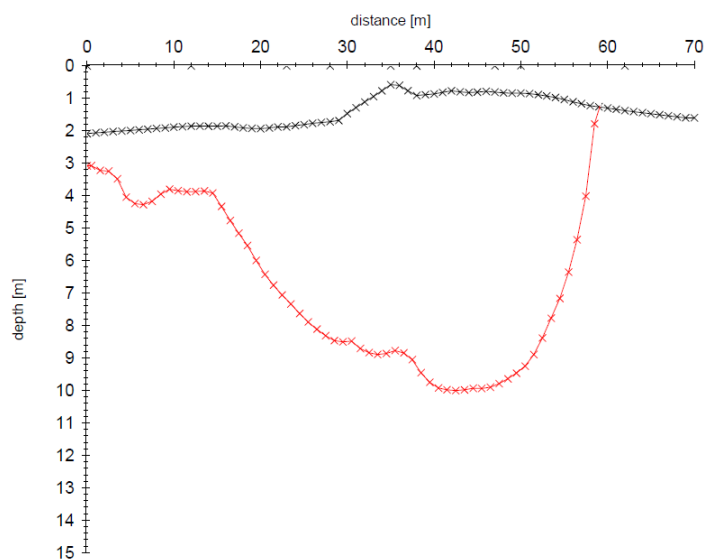


Figura 5.11. *Stratigrafia relativa allo stendimento 1.*

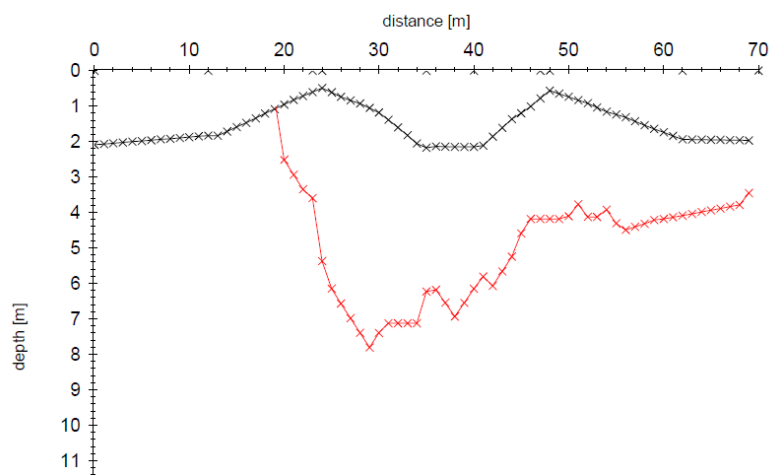


Figura 5.12. *Stratigrafia relativa allo stendimento 2.*

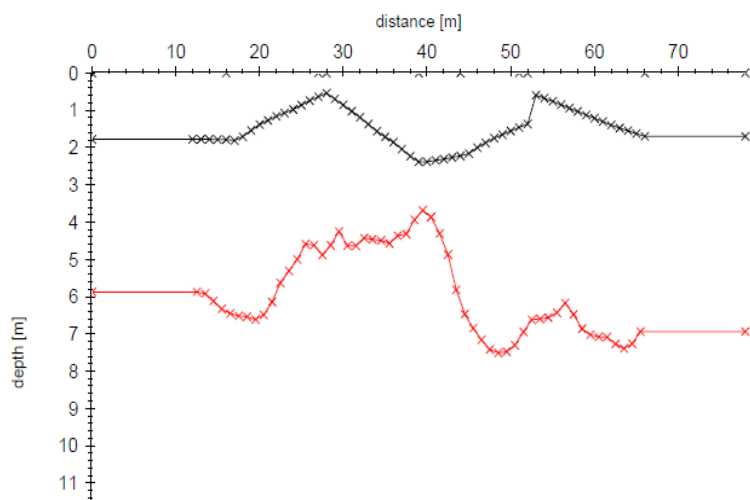


Figura 5.13. Stratigrafia relativa allo stendimento 3.

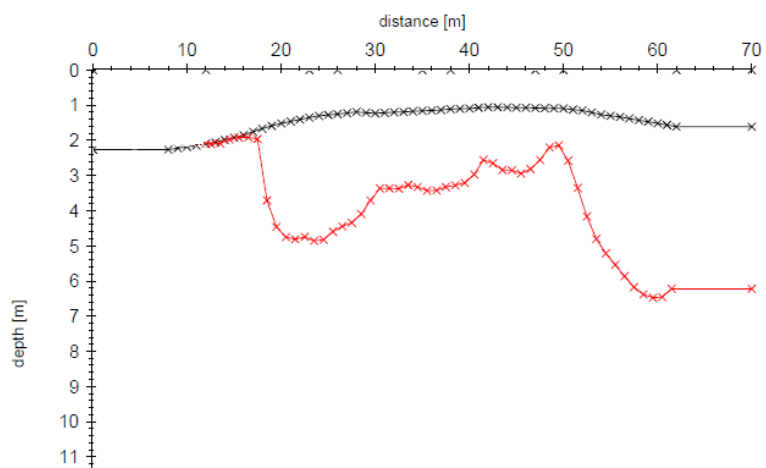


Figura 5.14. Stratigrafia relativa allo stendimento 4.

## CAPITOLO 6

# CONCLUSIONI

La ridotta profondità di indagine, si parla di una decina di metri, riscontrata utilizzando il metodo della sismica a rifrazione può essere attribuita principalmente ad un paio di motivi.

Il primo è legato alla sorgente di onde sismiche utilizzata; un martello genera una quantità di energia insufficiente per scendere ulteriormente in profondità ed individuare quindi altri orizzonti presenti. La scelta di una sorgente più energetica, come può esserlo un buffalo gun, ci permetterebbe di superare questo limite.

Il secondo motivo, collegato direttamente al precedente sta nel fatto che i materiali costituenti il sottosuolo, recuperati tramite il carotaggio effettuato, presentano caratteristiche meccaniche omogenee. È assente, pertanto, il contrasto di impedenza acustica necessario per far sì che il metodo a rifrazione funzioni nel modo ottimale.

Dalle sezioni stratigrafiche riportate nel capitolo precedente, si evince un primo strato con spessore variabile tra i 2 e 3 m che comprende più superficialmente il terreno di coltivo. Scendendo ulteriormente sono emerse delle “tasche di deposito” con spessore massimo, comunque, non superiore ai 10 m in cui sono localizzabili massi anche di grosse dimensioni separati uno dall’altro con materiale di riempimento.

Mi sembra doveroso ricordare che le indagini geofisiche dipendono dalle condizioni di sito; l’assenza di risultati con evidenti contrasti di impedenza negli strati più profondi mostra che in queste condizioni il metodo a rifrazione risulta poco efficace.

Riassumendo invece gli aspetti legati al bedrock geologico, ragionando quindi, non più superficialmente ma in profondità, si possono trarre importanti conclusioni.

Dalle misure HVSR analizzate sono emersi picchi ben definiti all'interno delle curve H/V, permettendoci di definire le frequenze di risonanza nei vari punti rilevati. Da questi valori, tramite i criteri SESAME abbiamo stabilito in modo oggettivo quali sono i risultati più affidabili e quali meno, permettendoci quindi, di scartare una fetta di queste misure.

Focalizzando l'attenzione sulle frequenze attendibili, è emersa la tendenza di queste a disporsi in un certo modo: quelle più basse nella parte occidentale della frazione Borgonuovo mentre quelle più alte nella zona più orientale e verso monte (Sud dell'abitato).

Tramite la formula che lega lo spessore di ricoprimento, la velocità media delle onde S ed appunto le frequenze di risonanza sono state fatte considerazioni circa l'andamento del bedrock riassunte nelle rappresentazioni tridimensionali della valle.

È stata esclusa la possibilità di avere una risalita del substrato nel fondovalle, poiché dalle misure HVSR non sono emerse frequenze alte nella zona centrale. Qualora in futuro sarà possibile eseguire altra sismica a rifrazione proprio in queste aree sarà interessante capire se tramite questo metodo si scorge un contrasto importante poco profondo oppure se non emerge nulla, confermando quindi l'ipotesi di forma ad "U" della valle.

Oltre alla ricostruzione della valle, tutte queste considerazioni ci danno importanti informazioni dal punto di vista ingegneristico, nel caso si dovesse realizzare un'opera sotterranea (es. tunnel).

Infatti, le due ipotesi considerate (valle a "U" o bedrock risalente in centro valle) ci impongono due approcci completamente diversi sotto il punto di vista della realizzazione dell'opera. Scavare in un materiale costituito da frane successive e quindi tutto sommato "tenero" oppure scavare in roccia cambierebbe radicalmente la costruzione della stessa in termini di tecniche di scavo da adottare, tempistiche e costi di realizzazione.

---

## 6.1 BIBLIOGRAFIA E SITOGRAFIA

- [1] "LINEE GUIDA PER LA MISURA DEL RUMORE DI FONDO DEL TERRENO CON STAZIONE SINGOLA MEDIANTE IL METODO HVSR Principi del metodo," no. 1971, pp. 1–9, 2011.
- [2] C. Bianchi and A. Meloni, "DI ORIGINE NATURALE E ANTROPICA Cesidio Bianchi e Antonio Meloni," pp. 1–22.
- [3] S. Castellaro, "Caratterizzazione dinamica del sottosuolo ai fini dell'Ingegneria Sismica," vol. 82, no. 5, pp. 623–626, 2013.
- [4] Bonnefoy-Claudet, S., Cotton, F., & Bard, P. Y. (2006). The nature of noise wavefield and its applications for site effects studies. A literature review. *Earth-Science Reviews*, 79(3–4), 205–227.
- [5] S. Del, V. S. Con, and M. Diretta, "INDAGNE DI SISMICA PASSIVA A STAZIONE SINGOLA PREMESSA E GENERALITA'," pp. 1–6, 2013.
- [6] Nakamura, Y. (2000). Clear Identification of Fundamental Idea of Nakamura's technique and its application. New Zealand, 2656.
- [7] Nakamura, Y. (2008). On the H/V spectrum. Beijing, China, The 14th World Conference on Earthquake Engineering, 1–10.
- [8] D. Di, I. Civile, P. Ing, C. Madiari, I. Elisa, and I. E. Gargini, "Richiami di teoria di propagazione delle onde sismiche," vol. 320, pp. 1–14.
- [9] I. Geofisica, M. Tecnica, D. E. I. Rapporti, and O. Hvsr, "1. Cenni teorici," no. c, 2008.
- [10] L. Magistrale, "Interpretazione dei dati sperimentali di prove sismiche in sito ed analisi di risposta sismica locale monodimensionale," 2018.
- [11] F. Mulargia, S. Castellaro, L. Rossi, D. Fisica, S. Geofisica, and U. Bologna, "il GEOLOGO," pp. 25–38, 1980.
- [12] Seht, M. I. Von, & Wohlenberg, J. (1999). Microtremor Measurements Used to Map Thickness of Soft Sediments. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(1), 250–259.
- [13] S. D. I. Scienze, S. Biologiche, G. Ambientali, L. Magistrale, and U. N. C. O. A. R. Ivalutazione, "UNIVERSITÀ DI BOLOGNA Corso di Laurea Magistrale in Geologia e Territorio DELL'EFFETTO DI SITO NELLA PROGETTAZIONE IN," 2018.
- [14] Bard, Pierre-yves. (2004). *Site EffectS assessment using Ambient Excitations (SESAME) Final report. July*, 1–33.



Sitografia:

Belfort. Tratto da Piuro: <http://www.infopiuro.it/it/storia-e-cultura/storia/belfort>

Frana. Tratto da Piuro Italo-Svizzera: <http://www.piuroitalosvizzera.net/htm/frana-eventoassociazione-italo-svizzera-scavi-di-piuro.html>

Claudio Strobbia. Tratto da Polimi OpenKnowledge :  
<https://www.youtube.com/watch?v=NaruEn6Kes&list=PLmKUwJoKJQnUQvOEwqiCzXKitl8PSwlyU&index=15&t=0s>

Onde sismiche. Tratto da Mapsism: <https://www.mapsism.com/terremoti/onde-sismiche>

Superquark La piccola 'Pompei' di Piuro. Tratto da Comune Piuro :  
<https://www.youtube.com/watch?v=mOTt97cbtA>

La storia di Piuro. Tratto da Piuro: <http://www.infopiuro.it/it/storia-e-cultura/storia/la-storia-dipiuro>

Tecniche di sismica passiva. Tratto da Geostru: <https://www.geostru.eu/it/tecniche-di-sismicapassiva/>

Sismica a rifrazione. Tratto da Geostru:  
<https://www.geostru.eu/it/blog/2020/03/04/rifrazione-sismica-nelle-indagini-geofisiche/>

Sismica a rifrazione. Da Ordine dei Geologi Umbria:  
[http://www.ordinegeologiumbria.it/Documenti/RIFRAZIONE\\_SLIDES-1.pdf](http://www.ordinegeologiumbria.it/Documenti/RIFRAZIONE_SLIDES-1.pdf)

Tecnica HVSR: Da Ordine dei Geologi Umbria:  
<http://www.ordinegeologiumbria.it/index.php/it/professione/standard-minimi/1594-linee-guida-per-la-misura-del-rumore-di-fondo-del-terreno-con-stazione-singola-mediante-il-metodo-hvsr>

## 6.2 APPENDICE: RILIEVI MISURE HVSR

VALIDITA' misura	Criteria validi su 3	Criteria validi su 6	PUNTO RILEVATO	LONGITUDINE	LATITUDINE	FREQUENZA DI PICCO
Valido	3	4	Transetto T1	9,437947	46,327011	2,009
Valido	3	4	Transetto T2	9,439292	46,326081	1,716
Valido	3	4	Transetto T3	9,440158	46,325628	1,712
Scartato	3	4	Transetto T4	9,441014	46,325525	1,979
Scartato	3	4	Transetto T4	9,441014	46,325525	18,849
Valido	3	4	Transetto T5	9,442586	46,325303	2,055
Scartato	3	4	Transetto T6	9,444164	46,324631	2,184
Scartato	3	4	Transetto T6	9,444164	46,324631	7,522
Valido	3	4	Transetto T7	9,446264	46,323875	2,864
Valido	3	4	Transetto T7	9,446264	46,323875	7,587
Valido	3	5	P1	9,426848	46,326634	1,178
Valido	3	4	P1	9,426848	46,326634	17,108
Valido	3	4	P2	9,440136	46,327401	1,912
Valido	3	5	P3	9,442689	46,324870	2,037
Scartato	3	5	P4	9,443026	46,327495	1,632
Valido	3	4	P4	9,443026	46,327495	2,226
Valido	3	5	S 2 mattina 21.07.2017	9,445036	46,323570	2,400
Valido	3	5	S 4 mattina 19.07.2017	9,443242	46,326763	2,200
Scartato	3	5	S 8 mattina 19.07.2017	9,440014	46,327207	2,500
Valido	3	5	S 11 mattina 11.08.2017	9,441660	46,323399	2,400

Tabella 6.1. Punti rilevati: coordinate, numero criteri SESAME rispettati, frequenza di risonanza.

VALIDITA' misura	Criteri validi su 3	Criteri validi su 6	PUNTO RILEVATO	LONGITUDINE	LATITUDINE	FREQUENZA DI PICCO
Valido	3	3	S 21 sera 20.05.2019	9,440162	46,327108	1,753
Valido	3	3	S 21 sera 23.05.2019	9,440162	46,327108	1,859
Scartato	3	5	S 22 sera 20.05.2019	9,440021	46,326830	1,885
Scartato	3	4	S 22 sera 20.05.2019	9,440021	46,326830	8,849
Scartato	3	5	S 22 mattino 23.05.2019	9,440021	46,326830	1,934
Scartato	3	4	S 22 mattino 23.05.2019	9,440021	46,326830	8,916
Scartato	3	4	S 23 sera 20.05.2019	9,439571	46,326632	2,018
Scartato	3	3	S 23 sera 20.05.2019	9,439571	46,326632	10,757
Scartato	3	5	S 23 pomerig. 22.05.2019	9,439571	46,326632	3,454
Scartato	3	4	S 24 sera 20.05.2019	9,439190	46,326517	1,877
Scartato	3	5	S 24 sera 20.05.2019	9,439190	46,326517	21,724
Scartato	3	5	S 24 mattino 23.05.2019	9,439190	46,326517	1,891
Scartato	3	4	S 24 mattino 23.05.2019	9,439190	46,326517	24,415
Eliminato	2	2	S 25 sera 20.05.2019	9,439356	46,326572	0,854
Valido	3	4	S 26 mattino 21.05.2019	9,437489	46,326713	1,89
Scartato	3	4	S27 mattino 21.05.2019	9,437189	46,326343	1,782
Scartato	3	3	S27 mattino 21.05.2019	9,437189	46,326343	2,681
Scartato	3	6	S27 mattino 21.05.2019	9,437189	46,326343	25,535
Scartato	3	4	S 27 sera 22.05.2019	9,437189	46,326343	1,799
Scartato	3	1	S 27 sera 22.05.2019	9,437189	46,326343	6,125
Scartato	3	6	S 27 sera 22.05.2019	9,437189	46,326343	25,722
Valido	3	5	S 28 mattino 21.05.2019	9,437693	46,326210	1,727
Valido	3	5	S 29 mattino 21.05.2019	9,437983	46,325706	1,825
Valido	3	3	S 29 sera 22.05.2019	9,437983	46,325706	1,883
Scartato	3	5	S30 mattino 21.05.2019	9,437640	46,325402	1,923
Scartato	3	4	S30 mattino 21.05.2019	9,437640	46,325402	6,425
Eliminato	2	3	S 31 pomerig. 21.05.2019	9,436950	46,327702	0,694
Valido	3	4	S 31 mattino 22.05.2019	9,436950	46,327702	1,625
Valido	3	4	S 32 pomerig. 21.05.2019	9,436269	46,327606	1,724
Valido	3	5	S 32 sera 23.05.2019	9,436269	46,327606	1,661
Valido	3	3	S 33 sera 21.05.2019	9,436736	46,327417	1,667
Valido	3	2	S 34 sera 21.05.2019	9,436371	46,327335	5,029
Eliminato	2	3	S 34 mattino 22.05.2019	9,436371	46,327335	0,640
Valido	3	4	S 34 mattino 22.05.2019	9,436371	46,327335	1,526
Valido	3	3	S 35 sera 21.05.2019	9,436021	46,326819	1,595
Valido	3	5	S 35 mattino 22.05.2019	9,436021	46,326819	1,747
Valido	3	6	S 36 mattino 22.05.2019	9,435645	46,328019	1,554
Valido	3	2	S 36 sera 22.05.2019	9,435645	46,328019	1,427
Valido	3	5	S 37 mattino 22.05.2019	9,435742	46,327445	1,639
Valido	3	3	S 38 pomerig. 22.05.2019	9,436586	46,324416	2,590
Valido	3	1	S 38 pomerig. 22.05.2019	9,436586	46,324416	5,187
Valido	3	4	S 38 mattino 23.05.2019	9,436586	46,324416	2,646
Valido	3	2	S 39 pomerig. 22.05.2019	9,437117	46,324802	2,079
Valido	3	3	S 39 mattino 23.05.2019	9,437117	46,324802	2,162
Valido	3	2	S 40 pomerig. 22.05.2019	9,439628	46,326390	1,773
Valido	3	2	S 40 pomerig. 22.05.2019	9,439628	46,326390	4,027
Valido	3	3	S 40 sera 23.05.2019	9,439628	46,326390	1,912

Tabella 6.2. Punti rilevati: coordinate, numero criteri SESAME rispettati, frequenza di risonanza.

VALIDITA' misura	Criteri validi su 3	Criteri validi su 6	PUNTO RILEVATO	LONGITUDINE	LATITUDINE	FREQUENZA DI PICCO
Scartato	3	5	S1 mattino 07.05.2019	9,442885	46,326024	2,299
Scartato	3	3	S1 mattino 07.05.2019	9,442885	46,326024	1,721
Scartato	3	3	S1 mattino 07.05.2019	9,442885	46,326024	7,225
Scartato	3	4	S1 sera 07.05.2019	9,442885	46,326024	1,845
Scartato	3	2	S1 sera 07.05.2019	9,442885	46,326024	7,077
Scartato	3	5	S2 mattino 07.05.2019	9,442907	46,326142	2,303
Scartato	3	5	S2 mattino 07.05.2019	9,442907	46,326142	1,678
Scartato	3	5	S2 sera 07.05.2019	9,442907	46,326142	1,948
Scartato	3	5	S2 sera 07.05.2019	9,442907	46,326142	12,404
Eliminato	2	2	S3 mattino 07.05.2019	9,443035	46,326120	0,686
Scartato	3	4	S3 mattino 07.05.2019	9,443035	46,326120	1,656
Scartato	3	5	S3 sera 07.05.2019	9,443035	46,326120	1,899
Scartato	3	3	S3 sera 07.05.2019	9,443035	46,326120	7,352
Scartato	3	5	S3 sera 07.05.2019	9,443035	46,326120	11,822
Valido	3	5	S4 mattino 08.05.2019	9,442633	46,326109	1,856
Valido	3	3	S4 mattino 08.05.2019	9,442633	46,326109	13,053
Valido	3	5	S5 mattino 08.05.2019	9,442917	46,325776	2,089
Valido	3	4	S6 mattino 08.05.2019	9,442869	46,325620	2,419
Valido	3	6	S6 mattino 08.05.2019	9,442869	46,325620	1,937
Valido	3	6	S7 mattino 08.05.2019	9,442885	46,325468	1,934
Valido	3	3	S7 mattino 08.05.2019	9,442885	46,325468	2,559
Valido	3	4	S8 mattino 08.05.2019	9,443292	46,325268	1,924
Valido	3	3	S8 mattino 08.05.2019	9,443292	46,325268	2,642
Valido	3	3	S9 mattino 09.05.2019	9,442633	46,325705	2,783
Valido	3	5	S10 mattino 09.05.2019	9,442290	46,326213	2,073
Valido	3	5	S11 mattino 09.05.2019	9,442150	46,325839	1,753
Valido	3	5	S11 mattino 09.05.2019	9,442150	46,325839	2,488
Valido	3	4	S12 mattino 09.05.2019	9,442461	46,325324	1,925
Valido	3	6	S12 mattino 09.05.2019	9,442461	46,325324	2,765
Valido	3	6	S13 mattino 09.05.2019	9,443647	46,325024	1,882
Valido	3	6	S14 pomerig. 09.05.2019	9,444114	46,324976	1,984
Scartato	3	5	S15 pomerig. 09.05.2019	9,443829	46,325335	1,848
Scartato	3	5	S15 sera 09.05.2019	9,443829	46,325335	2,030
Scartato	3	6	S15 sera 09.05.2019	9,443829	46,325335	2,911
Valido	3	2	S16 mattino 10.05.2019	9,443615	46,325924	1,649
Valido	3	5	S17 mattino 10.05.2019	9,443985	46,325791	1,839
Valido	3	4	S17 mattino 10.05.2019	9,443985	46,325791	7,503
Valido	3	4	S18 mattino 10.05.2019	9,443566	46,324551	2,051
Valido	3	5	S19 mattino 10.05.2019	9,444618	46,324784	1,995
Valido	3	5	S19 mattino 10.05.2019	9,444618	46,324784	6,269
Valido	3	6	S20 mattino 10.05.2019	9,442901	46,324725	1,892
Valido	3	4	S20 mattino 10.05.2019	9,442901	46,324725	8,340
Valido	3	4	S2 pomerig. 31.07.2019	9,442985	46,323320	2,292
Valido	3	3	S2 sera 31.07.2019	9,442985	46,323320	1,044
Valido	3	4	S3 pomerig. 31.07.2019	9,442926	46,323020	2,885
Valido	3	4	S4 pomerig. 31.07.2019	9,443205	46,322696	3,156
Valido	3	5	S5 mattina 01.08.2019	9,442638	46,323566	2,169
Valido	3	4	S6 pomerig. 31.07.2019	9,445468	46,324272	2,294
Valido	3	3	S6 mattino. 01.08.2019	9,445468	46,324272	2,223
Valido	3	5	S7 sera 31.07.2019	9,444675	46,326115	1,718
Valido	3	6	S8 sera 31.07.2019	9,444879	46,325985	1,709
Valido	3	3	S8 sera 31.07.2019	9,444879	46,325985	2,624
Valido	3	4	S8 sera 31.07.2019	9,444879	46,325985	8,111
Valido	3	2	S9 mattino 01.08.2019	9,445057	46,324374	2,325
Valido	3	3	S10 mattino 01.08.2019	9,446072	46,324370	2,607
Valido	3	4	S10 mattino 01.08.2019	9,446072	46,324370	3,557
Valido	3	4	S11 mattino 01.08.2019	9,446295	46,323752	2,866

Tabella 6.3. Punti rilevati: coordinate, numero criteri SESAME rispettati, frequenza di risonanza.

