

ALMA MATER STUDIORUM A.D. 1088  
UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

---

---

SCUOLA DI SCIENZE

Corso di Laurea Magistrale in Fisica del Sistema Terra

Dipartimento di Fisica e Astronomia

Tesi di Laurea Magistrale

**COMPORAMENTO DINAMICO DI BACINI  
SEDIMENTARI ASIMMETRICI:  
MODELLAZIONE NUMERICA E  
VALIDAZIONE SPERIMENTALE.**

Candidato:

dr.ssa Elisabetta D'Arcangeli

Relatore:

Prof.ssa Silvia Castellaro

---

---

Sessione IV

Anno Accademico 2022-2023



*A mio marito:  
sei molto più di quanto le mie preghiere  
osassero sperare*

*e*

*A zio Paolo,  
che è sempre con noi.*

# INDICE

INTRODUZIONE .....	1
1. VIBRAZIONE E FORMA DEI BACINI SEDIMENTARI: LO STATO DELL'ARTE .....	3
1.1 Un modello per i bacini sedimentari.....	4
1.2 Il micro-tremore sismico e la tecnica H/V.....	7
1.3 I rapporti $T_1/L_1$ e $L_2/L_1$ .....	16
1.3 Il confronto con i casi reali .....	18
1.5 I problemi aperti .....	19
2. VIBRAZIONE PROPRIA DELLE VALLI ASIMMETRICHE.....	21
2.1 Modellazione numerica .....	22
2.2 I risultati ottenuti .....	26
2.3 Validazione dei modelli.....	30
3. LA CAMPAGNA DI MISURA: LA VALTELLINA.....	33
3.1 Inquadramento geografico .....	33
3.2 Lo stato dell'arte.....	34
3.3 La campagna di prospezione .....	37
4. ELABORAZIONE DEI DATI SPERIMENTALI .....	45
4.1 Elaborazione con Grilla® .....	45
4.2 Elaborazione con HeeVee .....	68
5. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI.....	85
Bibliografia.....	93
Appendice.....	97

## INTRODUZIONE

Lo studio dei bacini sedimentari è oggetto di grande interesse sia nel campo della geofisica sia in quello della sismologia e, non ultimo, della geologia.

In geofisica esso rappresenta una sfida in modo particolare nel caso dei bacini profondi: fino a non molto tempo fa, infatti, l'unico approccio possibile per la loro conoscenza consisteva nell'impiego della sismica a riflessione e, in subordine, della gravimetria, che sono tuttavia metodi di esplorazione dispendiosi ed impegnativi dal punto di vista dell'analisi dei dati.

In sismologia, i bacini riempiti di sedimenti sono oggetti di interesse nello studio della risposta sismica, per la loro predisposizione all'amplificazione sismica stratigrafica.

Anche la geologia, infine, è interessata allo studio dei bacini, in particolare per le ricostruzioni stratigrafiche e tettoniche.

In tempi recenti, agli approcci gravimetrico e della sismica a riflessione, si sono affiancati lo studio e le misure delle risonanze come possibile metodo di prospezione dei bacini sedimentari.

Alcuni autori hanno studiato in modo sistematico come i modi di vibrare dei bacini sedimentari dipendano dalle loro geometrie e rigidità. Questo è stato fatto per lo più in casi di bacini simmetrici e omogenei e, in minor parte, nel caso di bacini non simmetrici e riempimenti non omogenei per rigidità.

A partire dall'osservazione che la maggior parte delle sezioni trasversali dei bacini sedimentari fluviali è asimmetrica, in questa tesi intendiamo contribuire allo studio delle relazioni tra geometria e modi di vibrare nei casi dei bacini asimmetrici.

Lo faremo in primo luogo dal punto di vista numerico ed in seguito dal punto di vista sperimentale.

Il caso di studio sarà la Valtellina, ossia l'alto bacino sedimentario del fiume Adda.



# 1. VIBRAZIONE E FORMA DEI BACINI SEDIMENTARI: LO STATO DELL'ARTE

Lo studio dei modi di vibrare delle valli sedimentarie è un campo di ricerca che coinvolge la geologia, la geofisica, la sismica e altre discipline connesse. Questo tipo di valli è formato da sedimenti (sabbia, argilla, ghiaia,) depositati nel corso del tempo da processi geologici come l'erosione e il trasporto fluviale, accumulati generalmente su substrati rocciosi rigidi (detti anche *bedrock*). Questo assetto stratigrafico, caratterizzato da coperture poco rigide (dal punto di vista dei moduli elastici) su substrati rigidi, ha conseguenze molto evidenti sulla propagazione delle onde sismiche nel sottosuolo e quindi sulla risposta dinamica e sismica del terreno. Gli effetti principali riguardano l'aumento dell'ampiezza delle onde nel loro moto dal *bedrock* alla superficie. A tale amplificazione (stratigrafica) si somma una amplificazione per risonanza a frequenze specifiche che dipendono dalla geometria e dalle proprietà meccaniche del bacino. In ultima analisi, inoltre, le onde rimangono confinate per riflessioni multiple all'interno del bacino, prolungando così la durata del moto sismico e aggravando lo scuotimento di edifici ed infrastrutture che si trovano, in particolare, sul fondovalle (Anderson, 2007).

I bacini sedimentari sono spesso molto profondi: nelle valli alpine solcate da grandi fiumi, per esempio, è facile imbattersi in spessori delle coltri che variano da molte centinaia a migliaia di metri e la cui geometria è spesso ricostruita attraverso le tecniche della geofisica di esplorazione profonda.

L'analisi delle strutture geologiche di tipo valle o bacino sedimentario è, quindi, oggetto di grande interesse sia nel campo dell'esplorazione geofisica che in sismologia.

In anni recenti un altro quesito ha suscitato l'interesse degli studiosi, ovvero se sia possibile inferire la forma di un bacino sedimentario e la sua rigidità a partire dalla sola osservazione dei suoi modi di vibrare (Castellaro e Musinu, 2022). In modo analogo, Kac (1966) si domandò se fosse possibile stabilire la forma di un tamburo dal suono che emetteva.

Per provare a rispondere a questa domanda è necessario studiare il problema dal punto di vista parametrico e l'approccio più conveniente oggi è di tipo numerico.

## 1.1 Un modello per i bacini sedimentari

Un bacino sedimentario reale è una struttura geologica tridimensionale. Per semplicità può, però, essere ricondotto a modelli più semplici: il caso 1D e il caso 2D (Figura 1).

Nel caso monodimensionale (1D), il bacino è assimilabile a una struttura a strati piani e paralleli, infiniti lateralmente, di spessore  $h$ : lo strato superiore giace sopra uno strato più rigido, che da ora in poi chiameremo *bedrock*<sup>1</sup>.

Nel caso bidimensionale (2D), invece, consideriamo dei cilindroidi di lunghezza infinita con dimensione longitudinale  $l$  molto più grande dell'estensione trasversale  $2w$  e con  $h$  profondità massima dei sedimenti sopra il *bedrock*. A seconda del tipo di processo geologico che ha generato il bacino sedimentario, questi modelli possono avere sezioni trasversali di forma diversa (Castellaro e Musinu, 2022; Lattanzi et al., 2023), simmetrica o non simmetrica.

Definiamo, infine, l'*aspect ratio* (o rapporto di forma)  $h/w$  come il rapporto tra la profondità massima  $h$  e la semi-ampiezza superficiale  $w$  della valle: *aspect ratio* grandi identificano valli molto profonde e incise ( $h \gg w$ ), mentre per  $h/w \rightarrow 0$  si intendono valli molto estese lateralmente e molto superficiali. In quest'ultimo caso, grazie alla particolare geometria, è possibile ricondursi al modello unidimensionale.

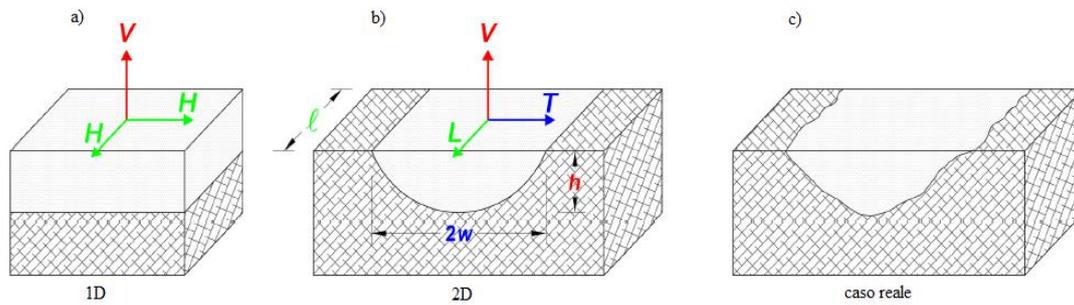
Il bacino idealizzato descritto in Figura 1 sarà caratterizzato da tre modi fondamentali di vibrare, lungo le tre direzioni principali ortogonali tra loro:

- Modo longitudinale (L), lungo l'asse maggiore della valle<sup>2</sup>. Questo è un modo di tipo flessionale con componente del moto solo orizzontale.
- Modo trasversale (T), lungo l'asse trasversale della valle. Si tratta di un modo di tipo flessionale che ha una componente dominante orizzontale, ma necessariamente anche una partecipazione della componente verticale.
- Modo verticale (V). È nuovamente un modo di tipo flessionale, che coinvolge la sola componente verticale del moto.

---

<sup>1</sup> Con questo termine vogliamo intendere il *bedrock* sismico: lo strato duro al di sotto del quale non sono più attesi fenomeni di amplificazione delle onde sismiche.

<sup>2</sup> All'interno del testo, useremo i termini valle e bacino come sinonimi.



**Figura 1:** Modelli di bacini sedimentari. **a)** Struttura 1D caratterizzata da *aspect ratio*  $h/w$  che tende a zero e assi principali orizzontali indistinguibili. **b)** Bacino 2D con *aspect ratio*  $h/w$  diverso da zero e direzioni principali longitudinale (L), trasversale (T) e verticale (V). **c)** Bacino “reale” 3D. (Tratto da Castellaro e Musinu, 2022).

Nel caso 1D, i modi di vibrare L e T sono gli stessi lungo qualsiasi direzione orizzontale (si definiscono “indistinguibili”).

Nel caso 2D, invece, i modi fondamentali ( $L_1, T_1$ ) e quelli superiori ( $L_2, T_2, \dots, L_n, T_n$ ) si osservano a frequenze diverse e tanto più diverse quanto più marcata è la condizione 2D. Per capire in quale dei due casi appena descritti ci si trovi, è necessario osservare gli spettri delle singole componenti del moto, ed in particolare le componenti orizzontali L e T, (Figura 2). È importante sottolineare che “caso 1D” non si riferisce alla geometria 1D del bacino, ma al fatto che viene esibita la stessa la risposta spettrale nelle componenti orizzontali del moto.

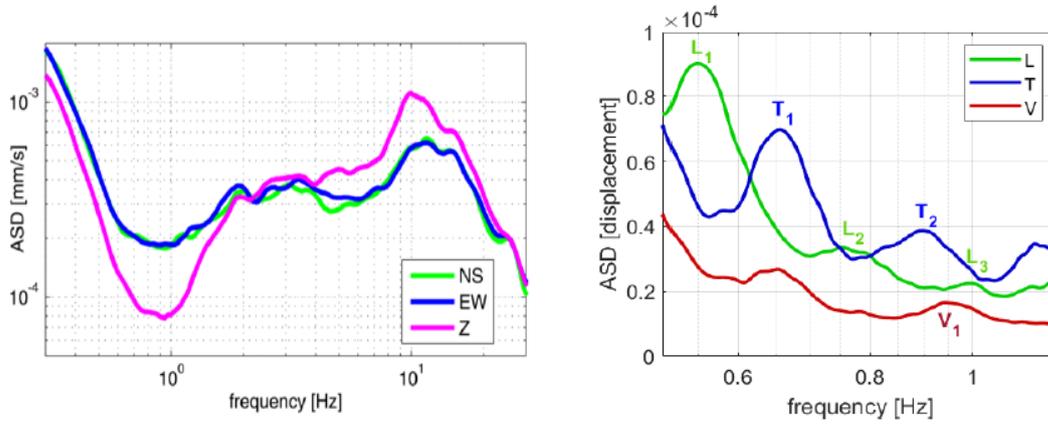
In base alla definizione del modello, esiste una direzione di minor rigidezza: quella longitudinale. Si osserva infatti che la frequenza del modo fondamentale longitudinale è sempre inferiore a quella del modo trasversale ( $L_1 < T_1$ ).

L’ampiezza del moto, invece, varia a seconda del punto di osservazione sulla superficie del bacino (Figura 3). Il modo fondamentale longitudinale ( $L_1$ ), per esempio, è riferito al modo in cui il massimo spostamento avviene sulla superficie libera al centro del bacino, mentre il modo  $L_2$  esibisce il massimo spostamento in corrispondenza di un terzo e due terzi della lunghezza totale  $2w$ , e così via per gli altri modi superiori.

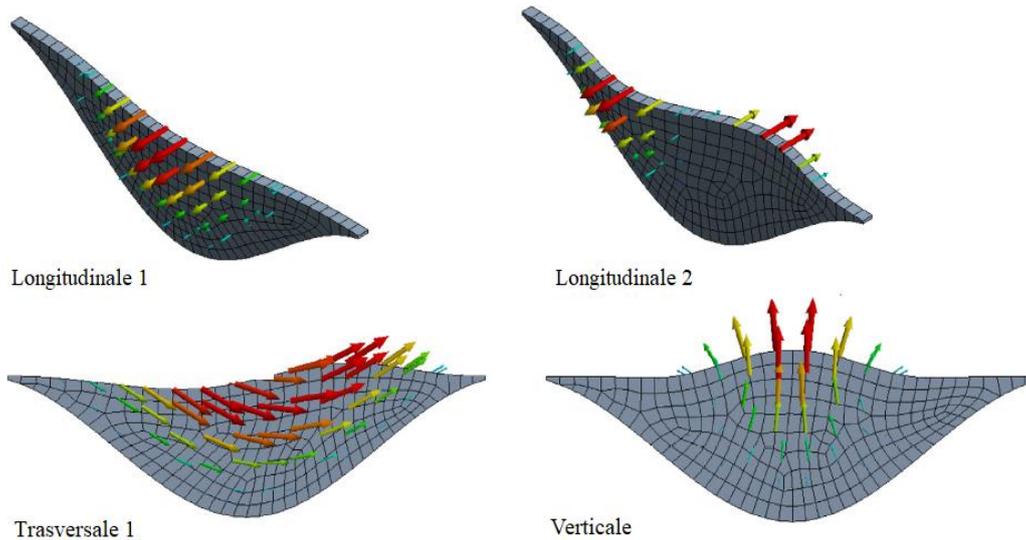
Il modo fondamentale trasversale  $T_1$ , invece, esibisce lo spostamento massimo in corrispondenza di un quarto e tre quarti di  $2w$ .

Per ogni modo, comunque, l’ampiezza dello spostamento tende a zero in prossimità dei bordi della valle e in prossimità dei nodi (per definizione).

Per completezza, si porta all'attenzione anche l'esistenza dei modi torsionali, che però non saranno presi in esame nel corso di questo lavoro.



**Figura 2:** Esempi di spettri delle singole componenti del moto. Nel caso 1D (a sinistra) le componenti spettrali orizzontali (NS e EW) relative agli assi principali sono praticamente indistinguibili; nel caso 2D, invece, (a destra) le componenti orizzontali (L e T) mostrano picchi a frequenze diverse tra loro. Dal momento che nel caso 1D il moto è lo stesso lungo ogni asso orizzontale, per le direzioni del moto possiamo utilizzare i termini NS ed EW; nel caso 2D, invece, chiameremo gli assi “direzione longitudinale” (L) e “direzione trasversale” (T). Ci si può ricondurre al caso 1D quando si osservano delle componenti orizzontali come a sinistra.

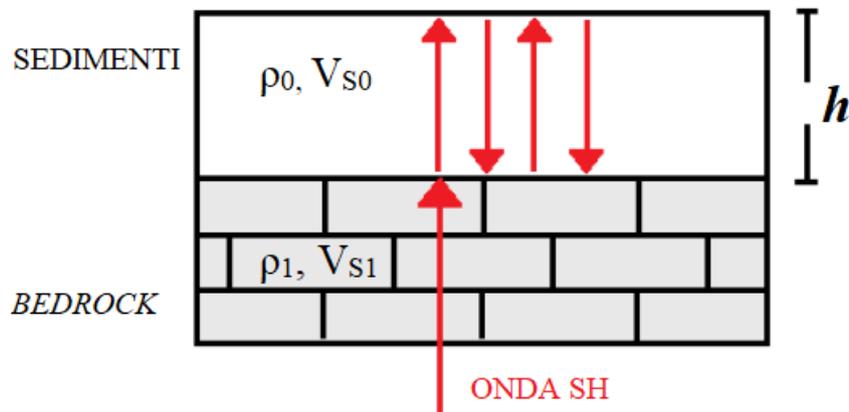


**Figura 3:** Forma dei modi longitudinale ( $L_1, L_2$ ), trasversale ( $T_1$ ) e verticale ( $V_1$ ) per un bacino di lunghezza infinita e sezione trasversale sinusoidale. Il colore rosso indica il massimo spostamento; le frecce indicano la direzione del moto. (Rielaborazione figura e didascalia da Castellaro e Musinu, 2022).

## 1.2 Il micro-tremore sismico e la tecnica H/V

Dopo aver stabilito un modello per rappresentare i bacini sedimentari oggetto dello studio, analizziamo più nel dettaglio quali sono gli effetti dei sedimenti quando un'onda si propaga dal *bedrock* sismico alla superficie, in presenza di suoli stratificati. Si consideri l'interfaccia presente tra il *bedrock* sismico e lo strato sottostante di sedimenti, meno rigido, di spessore  $h$ . Si definiscono le densità ( $\rho$ ) e le rigidezze ( $V_s$ ) per ciascuno strato (Figura 4):

- *Bedrock*:  $\rho = \rho_0$  e  $V_s = V_{s0}$ .
- Strato sedimentario:  $\rho = \rho_1$  e  $V_s = V_{s1}$ .



**Figura 4:** Strato sedimentario tenero di spessore  $h$ , su cui incide verticalmente un'onda SH proveniente dal *bedrock* rigido sottostante. Le frecce rosse mostrano l'intrappolamento dell'onda per riflessioni multiple tra lo strato tenero e quello rigido.

Se un'onda SH (onda di taglio polarizzata sul piano orizzontale) incide verticalmente dal basso sull'interfaccia con una certa ampiezza  $A_0$ , l'onda verrà trasmessa in superficie con un'altra ampiezza<sup>3</sup>  $A_1$ , regolata dal coefficiente di trasmissione:

---

<sup>3</sup> Per il calcolo dei coefficienti di trasmissione e di riflessione si fa uso delle Equazioni di Zoeppritz (Zoeppritz, 1919) semplificate per il caso di incidenza verticale.

Equazione 1:

$$\frac{A_1}{A_0} = \frac{2\rho_0 V_{S0}}{\rho_0 V_{S0} + \rho_1 V_{S1}}$$

Risulta evidente che questo fenomeno è imprescindibilmente legato alla presenza di un contrasto di impedenza ( $Z=\rho \times V_s$ ) tra due mezzi contigui. L'ampiezza del moto nello strato dei sedimenti (più tenero) può aumentare fino a raddoppiare nel caso in cui  $V_{S1} \ll V_{S0}$  (ovvero in presenza di un contrasto d'impedenza molto marcato): quanto più un mezzo è tenero e quanto più la velocità di propagazione delle onde nel mezzo è lenta, tanto maggiore sarà l'ampiezza dell'onda propagata.

In questo caso specifico, comunque, la propagazione dell'onda non si esaurisce con la trasmissione nello strato tenero, ma prosegue fino a giungere all'interfaccia sedimenti - aria libera: a questo punto l'onda sarà riflessa indietro nello strato dei sedimenti (le onde S non si propagano in aria), con una nuova ampiezza  $A_R$  determinata dal coefficiente di riflessione:

Equazione 2:

$$\frac{A_R}{A_1} = \frac{\rho_0 V_{S0} - \rho_1 V_{S1}}{\rho_0 V_{S0} + \rho_1 V_{S1}}$$

L'onda risultante, che è stata amplificata e rifratta, tende a rimanere intrappolata per riflessioni multiple (alla superficie libera, al *bedrock* e così via) e darà luogo a fenomeni di risonanza in caso di onde incidenti con lunghezze d'onda<sup>4</sup>:

Equazione 3:

$$\lambda = n \times 4 \times h$$

---

<sup>4</sup> Il 4 in questa equazione deriva dal fatto che un'onda, quando viene riflessa dalla superficie e torna indietro verso il *bedrock*, subisce uno sfasamento di 180°. Affinché torni in fase, occorre pertanto un'ulteriore riflessione alla superficie libera: perché un'onda torni a sommarsi in fase a seguito di riflessioni multiple, deve percorrere 4 volte lo spessore  $h$  dei sedimenti. La somma di onde in fase e con stessa ampiezza produce un'onda con ampiezza doppia: questo fenomeno si chiama risonanza.

Le frequenze a cui si manifesta la risonanza sono descritte dalla legge generale:

Equazione 4:

$$f_n = (2n + 1) \frac{V_S}{4h}$$

Con  $n$  che indica l'ordine del modo di vibrare (modo fondamentale o modi superiori).

Nel caso dei terreni le frequenze di risonanza dipendono solamente dalla rigidità (quantificata attraverso la velocità delle onde di taglio,  $V_S$ ) e dallo spessore dello strato che risona (nel caso dei bacini sedimentari, dallo spessore  $h$  della copertura sedimentaria).

Un terreno vibra alle frequenze di risonanza non solo in presenza di una sorgente esterna (per esempio un terremoto), ma anche quando è eccitato dal micro-tremore sismico ambientale. Questo è il movimento naturale del terreno ed è sempre presente perché generato sia da sorgenti naturali (come perturbazioni atmosferiche e oceaniche o la dinamica terrestre, che eccitano le basse frequenze al di sotto di 1 Hz) sia da perturbazioni antropiche (che eccitano le frequenze medio-alte, tipicamente superiori a 1 Hz). L'insieme di questi fenomeni genera onde che sono visualizzabili come onde sismiche e che si possono registrare attraverso l'utilizzo di tromografi, ossia di sismometri dedicati al micro-tremore (da *τρόμος* = tremore). Il micro-tremore sismico è composto da tutti i tipi di onde (di volume: P ed S; di superficie: Rayleigh e Love); tuttavia, poiché le onde di superficie si attenuano meno velocemente con la distanza rispetto alle onde di volume<sup>5</sup>, le registrazioni di micro-tremore sono costituite principalmente da onde di superficie.

Pur non essendo un rumore bianco, il micro-tremore è sufficientemente piccolo da permettere ai modi di vibrare del terreno attraversato di emergere chiaramente: quello che si registra, infatti, è influenzato sia dalle sorgenti sismiche, sia dagli effetti di sito dovuti al percorso compiuto dalle onde.

Da diversi anni, ormai, l'analisi del micro-tremore sismico ambientale viene largamente utilizzata per la misura sperimentale delle frequenze di risonanza dei suoli (Bard, 1999; SESAME 2004, Haghshenas *et al.*, 2008).

---

<sup>5</sup> Per attenuazione geometrica. Questo tipo di attenuazione è dovuto alla dispersione dell'energia sismica durante la propagazione delle onde attraverso il terreno. Le onde di superficie si propagano con fronti d'onda cilindrici; perciò, la loro energia si attenua secondo la legge  $1/(\text{distanza})$ . Le onde di volume, invece, sono caratterizzate da fronti d'onda sferici, che si attenuano come  $1/(\text{distanza})^2$ .

Tra tutti i metodi a disposizione, la tecnica H/V è particolarmente utile per determinare la frequenza di risonanza di un terreno dall'analisi del micro-tremore. Questa tecnica, nota anche con l'acronimo HVSR (*Horizontal to Vertical Spectral Ratio*) o come Metodo Nakamura (dal nome dell'autore che la rese nota), è stata applicata per la prima volta da Nagoshi e Igarashi (1970) e poi diffusa e migliorata da Nakamura (1989).

È particolarmente vantaggiosa perché non invasiva, per i suoi costi limitati e per la rapidità nel processo di acquisizione dei dati: è, infatti, una prova a stazione singola e per effettuarla è sufficiente l'utilizzo di un solo sismometro con cui effettuare le registrazioni. La forza di questa tecnica risiede nella possibilità di rimuovere gli effetti della sorgente (che è variabile nel tempo) dallo spettro del micro-tremore ambientale e permette di enfatizzare gli effetti dovuti al sito su cui si effettua la misura. (Sgattoni e Castellaro, 2020). Il metodo consiste nell'eseguire il rapporto spettrale tra le componenti orizzontali (H) del moto e quelle verticali (V). Questo rapporto produce dei picchi nel grafico H/V che sono interpretabili in termini di risonanze delle onde di volume e la cui ampiezza dipende dal contrasto di impedenza tra due strati contigui di rigidità diversa (uno tenero e uno duro).

Un ulteriore vantaggio dell'utilizzo del metodo Nakamura risiede nella stabilità nel tempo dei picchi H/V per uno stesso sito, diversamente da quanto mostrato dagli spettri delle singole componenti del moto, soggette ad una grande variabilità. È, comunque, indispensabile che il grafico del rapporto H/V sia osservato contemporaneamente alle singole componenti spettrali utilizzate per produrlo: ciò è essenziale per poter distinguere i picchi H/V di origine stratigrafica<sup>6</sup> (che sono quelli di interesse) dagli altri picchi di natura antropica, ma è fondamentale anche per comprendere la natura 1D o 2D di un sito ed evitare interpretazioni stratigrafiche e dinamiche errate (Castellaro e Mulargia, 2010).

Vediamo più nel dettaglio come applicare il metodo HVSR allo studio dei bacini sedimentari descritti in questo capitolo.

---

<sup>6</sup> In Castellaro (2016) sono forniti i criteri per stabilire se i picchi presenti sui grafici delle curve H/V siano o meno stratigrafici.

### 1.2.1 Il metodo H/V nel caso 1D<sup>7</sup>

Ricordiamo la definizione di bacino sedimentario 1D: una struttura a strati piani e paralleli, infiniti lateralmente e di spessore  $h$  (Figura 1). Eseguendo delle misure di micro-tremore sismico ambientale su uno di questi bacini, si ottengono in primo luogo gli spettri delle singole componenti del moto: questi spettri sono caratterizzati da componenti orizzontali indistinguibili (per definizione) e da una componente verticale che mostra dei minimi in corrispondenza dei massimi locali orizzontali (Figura 5). Calcolando il rapporto tra le componenti H e V, si ottiene una curva H/V: nel caso di una struttura geologica 1D, le frequenze dei picchi delle curve H/V sono una buona approssimazione delle frequenze di risonanza delle onde SH (Sgattoni e Castellaro, 2020).

Come visto nell'Equazione 4, per i terreni la frequenza di risonanza è legata alla loro rigidità (quantificata attraverso la velocità delle onde di taglio,  $V_S$ ) e allo spessore dello strato che risuona (nel caso dei bacini sedimentari 1D, si tratta dello spessore  $h$  della copertura sedimentaria, che abbiamo supposto essere infinita lateralmente). Nel caso in cui sia disponibile un vincolo sulla velocità  $V_S$ , nota da studi indipendenti, a partire dalla frequenza di risonanza è possibile determinare lo spessore dello strato di terreno sottostante, tramite l'equazione della risonanza (Equazione 4), e *viceversa* (Castellaro e Mulargia, 2009).

Quindi, disponendo di qualche vincolo sulla distribuzione delle  $V_S$  con la profondità, è possibile tracciare l'andamento di un riflettore sismico, ovvero si può “mappare” puntualmente la profondità del *bedrock*, a partire dalle frequenze di risonanza.

Nell'ipotesi di eseguire misure di micro-tremore in diversi punti trasversalmente ad un bacino reale, si osserverebbero frequenze dei picchi H/V che cambiano a seconda del punto di misura (Figura 6). Sembrerebbe, quindi, che un bacino sedimentario di questo tipo abbia delle frequenze di risonanza che cambiano a seconda del punto di misura. È noto, tuttavia, che la frequenza  $f_0$  di risonanza è unica per ogni oggetto, ovunque la si misuri (quello che può variare è solo l'ampiezza del moto, ma non la frequenza di uno stesso modo di vibrare). Questa apparente inconciliabilità dei risultati è spiegabile osservando che i picchi H/V non indicano, in realtà, le “vere” risonanze delle onde S, ma

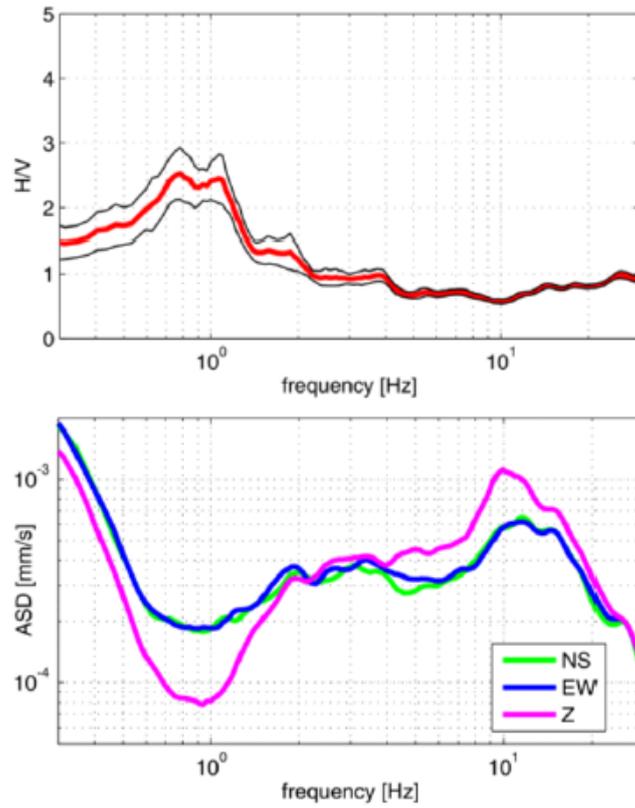
---

<sup>7</sup> Ribadiamo ancora una volta che “caso 1D” si riferisce solamente alla situazione in cui la risposta spettrale nelle componenti orizzontali ortogonali è la stessa e non indica la geometria del bacino.

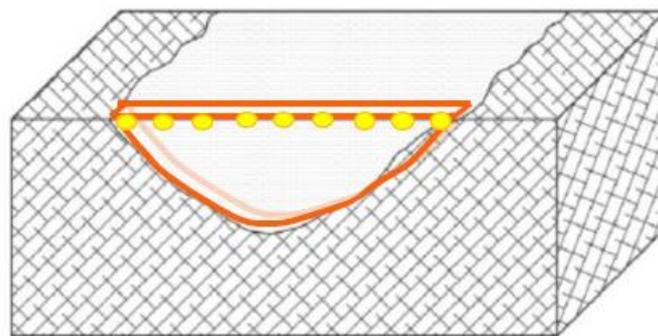
sono legati alle proprietà delle onde di superficie (che dominano nelle registrazioni di micro-tremore). In particolare, le frequenze dei picchi H/V sono dovute all'ellitticità delle onde di Rayleigh (R), che rimangono intrappolate orizzontalmente nello strato dei sedimenti. La componente verticale dell'onda R mostra un ammanco di energia (visualizzabile come un minimo locale sulla componente verticale del moto) in corrispondenza della frequenza del picco H/V, dovuto al fatto che tutte le onde di Rayleigh sono polarizzate linearmente sulla componente orizzontale (Bard e Bouchon, 1982; Fah *et al.*, 2001). Questa frequenza di picco è comunque una buona approssimazione teorica della frequenza di risonanza di un'onda SH che incide verticalmente sullo strato sedimentario (Bonney-Claudet *et al.*, 2008): infatti, la frequenza a cui l'onda di Rayleigh mostra un minimo sulla componente verticale coincide (quasi) con la "vera" frequenza di risonanza dell'onda SH.

Si può, quindi, concludere che anche in un bacino sedimentario reale le frequenze di risonanza delle onde di volume non cambiano lungo la valle e che l'applicazione del metodo HVSR 1D permette di calcolare puntualmente lo spessore di un riflettore sismico, assumendo che il riflettore sia piano e parallelo nel punto di misura.

La risonanza 1D è applicabile alle strutture geologiche che sono riconducibili ad un modello monodimensionale, come nel caso dei bacini sedimentari con un basso *aspect ratio*, molto estesi lateralmente e molto superficiali.



**Figura 5:** Curva H/V nel caso 1D; gli spettri delle singole componenti orizzontali del moto sono praticamente indistinguibili. È visibile il minimo sulla componente verticale in corrispondenza dei massimi locali orizzontali.



**Figura 6:** Punti di misura lungo una sezione trasversale di un bacino sedimentario.

### 1.2.2 Il metodo H/V nel caso 2D

Il modello di bacino sedimentario 2D viene utilizzato per descrivere quelle strutture geologiche che esibiscono un comportamento dinamico diverso lungo gli assi principali (L e T). Gli spettri delle singole componenti del moto mostrano picchi a frequenze e con ampiezze<sup>8</sup> diverse per la direzione longitudinale e trasversale. Queste frequenze si mantengono costanti lungo la valle, per ciascuna direzione: nello spazio variano solo le ampiezze e le fasi, che dipendono dalla forma del modo di vibrare (Sgattoni e Castellaro, 2020; Castellaro e Musinu, 2022). L'esistenza di queste diverse frequenze di risonanza 2D (dovute alle riflessioni multiple delle onde P ed S) fa sì che non sia più possibile ricostruire direttamente la geometria del bacino come nel caso 1D.

Il fenomeno delle risonanze 2D di un bacino sedimentario è stato studiato dal punto di vista teorico da Bard e Bouchon (1985), che affrontarono il problema della modellazione dinamica per via analitica. Nel loro articolo proposero alcune equazioni empiriche per mettere in relazione le frequenze di risonanza 2D (L e T) con la semi-ampiezza  $w$  della valle e con la profondità massima  $h_{max}$  dei sedimenti e per valutare la loro deviazione dalla frequenza 1D. Dai modelli analitici conclusero che le vere risonanze 2D associate alle onde di volume dominano nei bacini con grande *aspect ratio* ed elevato contrasto d'impedenza tra la roccia incassante e i sedimenti e definirono un rapporto di forma critico entro il quale è prevista la risonanza 2D (Figura 7).

Successivi studi sperimentali (Moczo *et al.*, 1996; Sgattoni e Castellaro, 2020; Castellaro e Musinu, 2022) hanno mostrato, invece, che le risonanze 2D avvengono anche in valli che non superano questo rapporto di forma critico e, inoltre, che possono coesistere risonanze 1D e 2D all'interno dello stesso bacino sedimentario.

Nei casi appena descritti, l'impiego del metodo H/V non consente più di fare stratigrafia: si nota, infatti, un allargamento e un appiattimento dei picchi H/V (Figura 8), che contengono sia la frequenza del modo longitudinale sia quella del modo trasversale. Ad ogni modo, è ancora possibile ottenere informazioni sulla geometria del bacino, ma solamente attraverso l'osservazione degli spettri delle singole componenti del moto

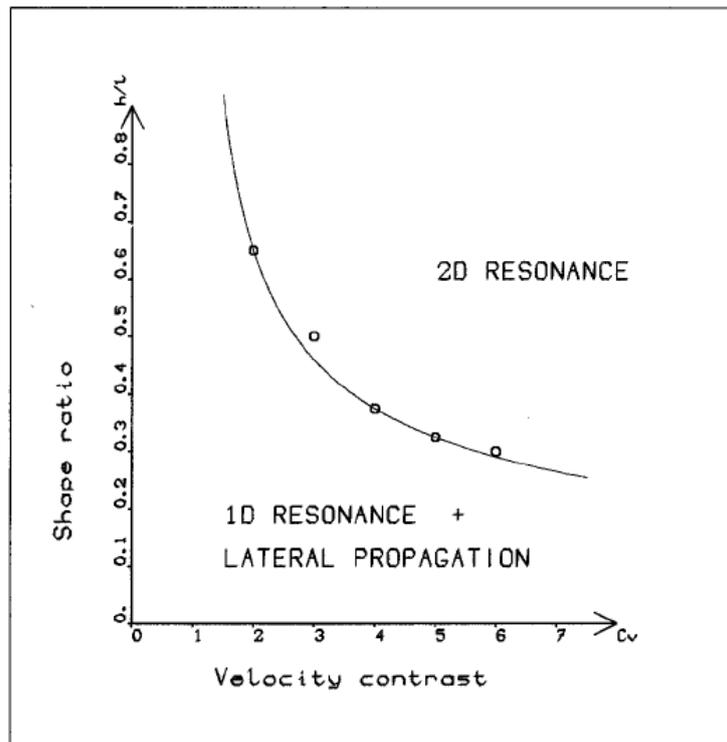
---

<sup>8</sup> Per quanto riguarda l'ampiezza del picco, questa deve essere valutata nello spettro di spostamento (o velocità o accelerazione), perché legata alla forma del modo (Sgattoni e Castellato, 2020).

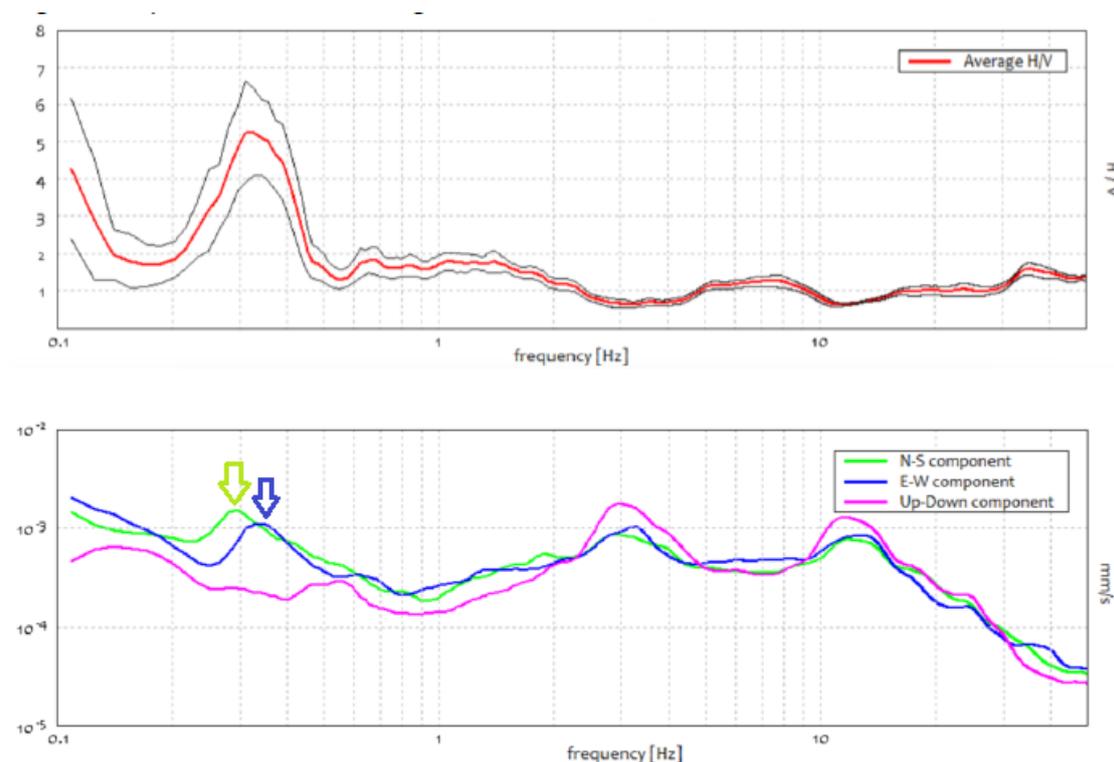
(Castellaro e Musinu, 2022), da cui è possibile determinare le frequenze dei modi di vibrare. Una volta note queste frequenze, se ne possono studiare i rapporti per ricavare informazioni sulla geometria della valle.

Castellaro e Musinu (2022) hanno affrontato lo studio dei modi di vibrare di cinque diversi tipi di bacini sedimentari simmetrici e con riempimento omogeneo, caratterizzati da lunghezza  $l$  infinita e *aspect ratio* compreso tra 0 e 2. Per riprodurre il più possibile la variabilità dei bacini reali, lo studio è stato condotto per sezioni trasversali triangolari, sinusoidali, circolari, ellittiche e rettangolari.

Nel prossimo paragrafo riporteremo i risultati principali del lavoro di Castellaro e Musinu, limitandoci ai risultati ottenuti per i primi tre modi  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $T_1$ .



**Figura 7:** Condizioni di esistenza della risonanza 2D nel caso di onde SH per una valle sinusoidale, secondo Bard e Bouchon (1985). (Rielaborazione figura e didascalia da Bard e Bouchon, 1985)



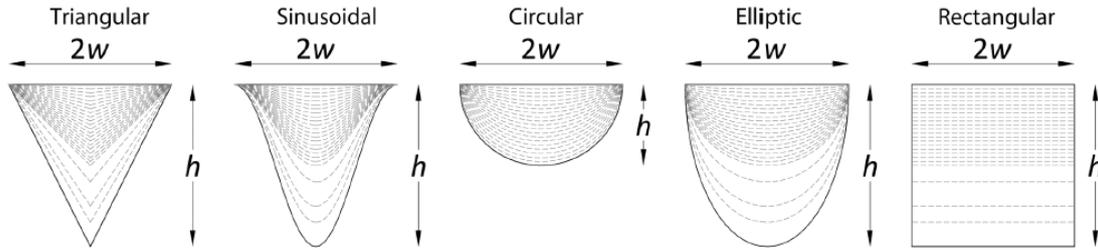
**Figura 8:** Allargamento del picco H/V nel caso 2D: il picco contiene la frequenza del modo sia nella direzione longitudinale, sia in quella trasversale (N-S ed E-W in legenda si riferiscono agli assi dello strumento).

### 1.3 I rapporti $T_1/L_1$ e $L_2/L_1$

Attraverso una modellazione numerica parametrica, Castellaro e Musinu (2022) hanno determinato i modi naturali di vibrare per ognuno dei cinque diversi tipi di bacini sedimentari simmetrici e con riempimento omogeneo descritti in Figura 3.

Questa valutazione è stata eseguita tramite analisi modale agli elementi finiti. Grazie a questo lavoro è stato possibile identificare le frequenze di sei modi principali per le cinque diverse forme dei bacini di Figura 9 e fino a 23 *aspect ratio* compresi tra 0 e 2 per ogni tipo di forma.

Le frequenze dei primi tre modi di vibrare sono le più facili da riconoscere sia nei modelli numerici che nelle misure sperimentali e i loro rapporti possono fornire informazioni importanti per capire la forma delle valli.



**Figura 9:** Forme dei bacini e differenti *aspect ratio* modellati da Castellaro e Musinu. (Immagine e didascalia tratte da Castellaro e Musinu, 2022).

Nel caso 2D, le frequenze dei modi di vibrare orizzontali sono diverse ( $T_1 \neq L_1$ ) ed è quindi possibile analizzare come varia il loro rapporto in funzione di diversi *aspect ratio*.  $T_1 / L_1$  è chiamato “rapporto di rigidezza” ed è legato ai rapporti di rigidezza ( $V_S$ ) e di massa nelle direzioni L e T: fornisce quindi informazioni sulla geometria del bacino in esame. Costruendo un grafico con i vari rapporti di rigidezza in funzione di diversi possibili *aspect ratio*, infatti, (Figura 10) è possibile determinare la profondità massima  $h$  dei sedimenti nel bacino, dal momento che la larghezza superficiale  $2w$  è misurabile in campagna e  $L_1$  e  $T_1$  sono leggibili sugli spettri delle singole componenti del moto.

Dallo studio di questo grafico si nota che:

- $T_1 > L_1$  (sempre), quindi  $T_1 / L_1 \geq 1$ .
- $T_1 / L_1$  cresce in modo monotono all’aumentare di  $h/w$ <sup>9</sup>.
- La forma della valle assume un’importanza rilevante a partire da  $h/w \geq 0,6$ : per piccoli *aspect ratio* non sono apprezzabili grandi differenze tra valli di forma diversa.

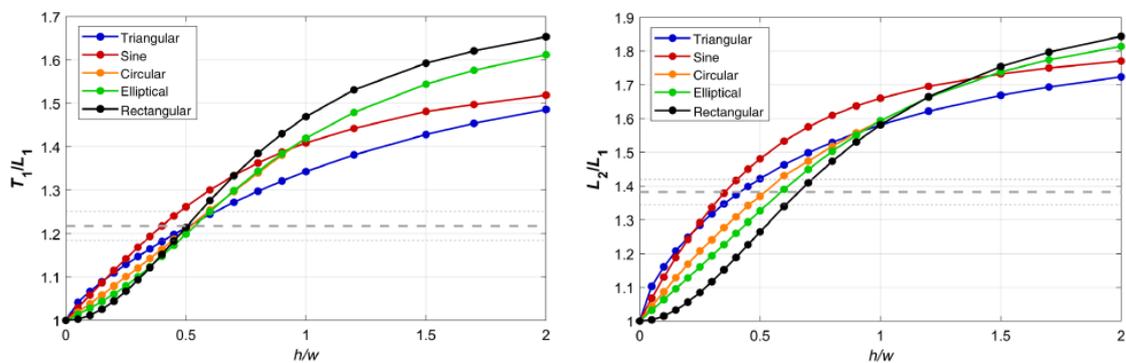
Per quanto riguarda i modi longitudinali superiori (come  $L_2$ ), essi implicano un movimento puramente orizzontale e appaiono come picchi separati negli spettri delle singole componenti del moto. In particolare, la frequenza  $L_2$  è quasi sempre facilmente identificabile, e può essere utilizzata per ottenere un’ulteriore conferma alla stima della profondità  $h$ , costruendo anche in questo caso un grafico  $L_2/L_1 - h/w$ .

Dalla Figura 10 si può notare che anche  $L_2/L_1$  cresce in modo monotono con l’*aspect ratio*.

<sup>9</sup>Per  $h/w \rightarrow 0$ ,  $T_1 \simeq L_1$  e ci si riconduce al caso 1D o al caso di *bedrock* affiorante.

Quanto discusso finora è valido per inferire la profondità massima di un bacino sedimentario per diversi *aspect ratio* e per diversi tipi di valle (circolare, sinusoidale, triangolare, ellittica, rettangolare).

Per un fissato valore del coefficiente di Poisson  $\nu$ , i rapporti  $T_1/L_1$  e  $L_2/L_1$  sono indipendenti dalle altre proprietà fisiche e meccaniche del bacino (come  $V_s$ ,  $V_p$  e la densità). Il rapporto tra le frequenze, infatti, cancella la dipendenza dalla velocità e quindi dalla rigidezza, il che permette di ricavare le informazioni sulla forma geometrica del bacino.



**Figura 10:** Rapporti tra i modi di vibrare di un bacino sedimentario simmetrico in funzione di  $h/w$  e della forma della sezione trasversale della valle. (Tratto da Castellaro e Musinu, 2022)

### 1.3 Il confronto con i casi reali

I risultati ottenuti dalla modellazione numerica effettuata da Castellaro e Musinu (2022) sono stati confrontati con le soluzioni analitiche (laddove queste erano disponibili) e con un set di casi reali di valli sedimentarie: in particolare l’approccio è stato applicato a cinque casi studio nelle valli alpine.

Quanto si è osservato nei casi più comuni è che, acquisendo delle misure di micro-tremore lungo diverse sezioni dei bacini, le frequenze dei picchi H/V variano solamente lungo i bordi della valle (dove sono dominanti le onde di superficie), mentre si assestano attorno ad un valore costante avvicinandosi al centro (dove dominano le risonanze 2D). Sulla base di queste evidenze, è possibile utilizzare la tecnica H/V 1D ai lati del bacino per “mappare” localmente l’andamento del riflettore; al centro, invece, è necessario

ricondursi allo studio dei rapporti  $T_1/L_1$  e  $L_2/L_1$ . (Questo fenomeno sarà ben visibile in Figura 60, quando si esporranno i risultati ottenuti dall'analisi sperimentale).

## 1.5 I problemi aperti

Quanto presentato sinora è stato il primo tentativo di collegare i modi di vibrare alla distribuzione di masse e rigidità in valli sedimentarie 2D simmetriche, caratterizzate da riempimento omogeneo e isotropo di sedimenti sopra un *bedrock* rigido.

A livello modellistico sono, tuttavia, ancora molti gli aspetti di cui tenere conto; per esempio:

1. Profili non costanti di  $V_s$ .
2. Valli di forma asimmetrica.

Castellaro e Musinu (2022) hanno dato delle indicazioni nel caso di profilo non costante di  $V_s$  e hanno concluso che, se il profilo di  $V_s$  cresce con la profondità (è il caso normale), si incorre in una sottostima del rapporto di aspetto  $h/w$ .

L'obiettivo di questo lavoro è aumentare la conoscenza di come variano i modi di vibrare in presenza di valle asimmetrica, che gli autori hanno trattato solo superficialmente.

A questo scopo, si applicherà quanto ottenuto dai modelli ad un caso di studio reale: la Valtellina.



## **2. VIBRAZIONE PROPRIA DELLE VALLI ASIMMETRICHE**

Come anticipato, obiettivo primario di questo lavoro di tesi è contribuire alla conoscenza della relazione esistente tra la forma di valli sedimentarie asimmetriche e i loro modi naturali di vibrare.

L'esistenza di questo tipo di bacini è nota grazie ad ampi trattati di geomorfologia, che si sono occupati di studiare i processi di erosione e deposito di sedimenti che avvengono da parte dei fiumi. In particolare, la forma asimmetrica delle valli sedimentarie può essere dovuta a diversi fattori geologici, climatici ed idrologici e il contributo di molteplici variabili fa sì che non tutti i processi di formazione dei bacini seguano lo stesso modello.

Alcuni dei fattori che possono contribuire all'asimmetria delle valli fluviali sono correlati al flusso d'acqua del fiume che le genera: per esempio, se il flusso dell'acqua è variabile lungo la lunghezza del fiume, in particolari tratti la velocità può essere diversa su un lato o sull'altro, causando l'erosione preferenziale di una delle sponde. Anche la presenza di ostacoli geologici (come rocce più dure su un lato o sull'altro) può influenzare l'erosione o, analogamente, la diversa composizione del suolo, con la presenza di suoli più erodibili, può portare a tassi di erosione diversi sulle due sponde del fiume. Si può citare, infine, anche l'effetto dovuto alla presenza di attività tettonica, come la subsidenza o l'innalzamento di una parte della crosta terrestre, oppure l'intervento umano che, tramite la costruzione di infrastrutture o l'alterazione del corso dei fiumi, può influire sulla forma dei bacini sedimentari.

Un esempio di valle sedimentaria asimmetrica in Italia è la Valle del Po, nel Nord del Paese. Questa valle è stata modellata dal fiume da cui prende il nome, il Po, e presenta una notevole asimmetria nella sua conformazione, che è stata attribuita a diversi fattori: tra questi la presenza di rocce più dure o la storia geologica della regione. Tutto ciò ha dato luogo ad una sponda sinistra (anche detta "sponda lombarda" perché attraversa la regione Lombardia) che è generalmente più ripida e presenta una topografia più accidentata rispetto alla sponda destra, che attraversa la Pianura Padana.

Un altro esempio di valle asimmetrica in Italia è la Valtellina, di cui si parlerà in maniera approfondita nei prossimi capitoli.

## 2.1 Modellazione numerica

Per poter comprendere come variano i modi naturali di vibrare di bacini sedimentari 2D asimmetrici in funzione di diversi *aspect ratio*, sono stati costruiti dei modelli numerici tramite il software ANSYS (ANSYS *Student*, Release 2023 R2), sulla falsa riga di quanto già fatto in Castellaro e Musinu (2022). Sono stati analizzati sei tipi di valli cilindriche di lunghezza  $l$  infinita<sup>10</sup> (analoghe a quelle già descritte nel capitolo precedente), con *aspect ratio*  $h/w < 1$ , pari a 0.2, 0.4, 0.6, 0.8 e sezioni trasversali differenti. Per poter rappresentare al meglio la variabilità dei casi reali e per poter effettuare un confronto con i risultati ottenuti nel caso simmetrico, la modellazione è stata effettuata a partire da bacini sedimentari con *cross section* simmetrica circolare e triangolare (Figura 11). In seguito, è stata modificata la loro geometria con tagli in corrispondenza del bordo del bacino, a 5 m dal bordo e a 10 m dal bordo, incrementando via via l'asimmetria: si sono quindi ottenuti dei modelli con geometria mista circolare + triangolare e circolare + circolare (Figura 12). I tipi geometrie da utilizzare per la modellazione sono state scelte sulla base di sezioni reali di valli, note da studi precedenti (alcuni esempi in Figura 13 e Figura 14).

Al fine di eseguire l'analisi modale tramite il software ANSYS, sono state effettuate le seguenti assunzioni:

- Per semplicità nella risoluzione del problema, si suppone che il comportamento del terreno sia isotropo.
- Il coefficiente di Poisson è fisso<sup>11</sup> e pari a  $\nu = 0.4$ .
- La velocità equivalente di propagazione delle onde nel terreno è supposta nota da studi precedenti ed è fissata ad un valore di  $V_{SEq}$ <sup>12</sup>  $\approx 600$  m/s.
- La densità del terreno è supposta costante in ogni direzione sopra il *bedrock*:  $\rho \approx 2000$  kg/m<sup>3</sup>.

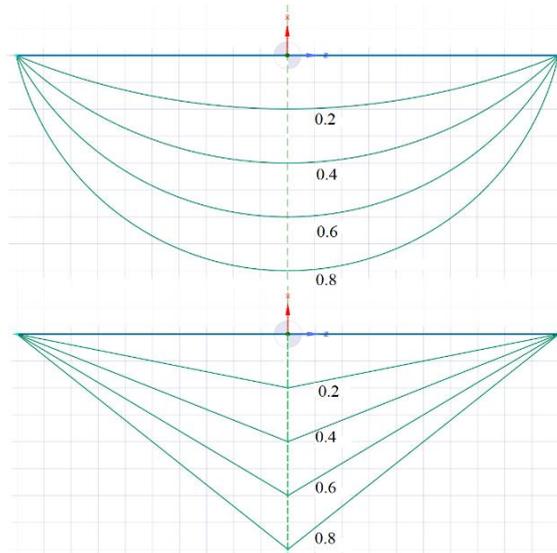
---

<sup>10</sup> Inserire una lunghezza  $l$  infinita nei modelli numerici è necessario per simulare il comportamento dei bacini sedimentari reali, caratterizzati da un'asse longitudinale molto più lungo di quello trasversale.

<sup>11</sup> Se il coefficiente di Poisson è fisso, i rapporti tra le frequenze dei modi di vibrare dipendono solamente dall'*aspect ratio* e dalla sezione trasversale della valle (Castellaro e Musinu, 2022).

<sup>12</sup> La velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio è la media pesata delle velocità delle onde S negli strati del terreno sopra il *bedrock*.

- Il modulo di taglio assume il valore di  $\mu = 720 \text{ MPa}^{13}$ .
- La superficie del bacino è una superficie libera.

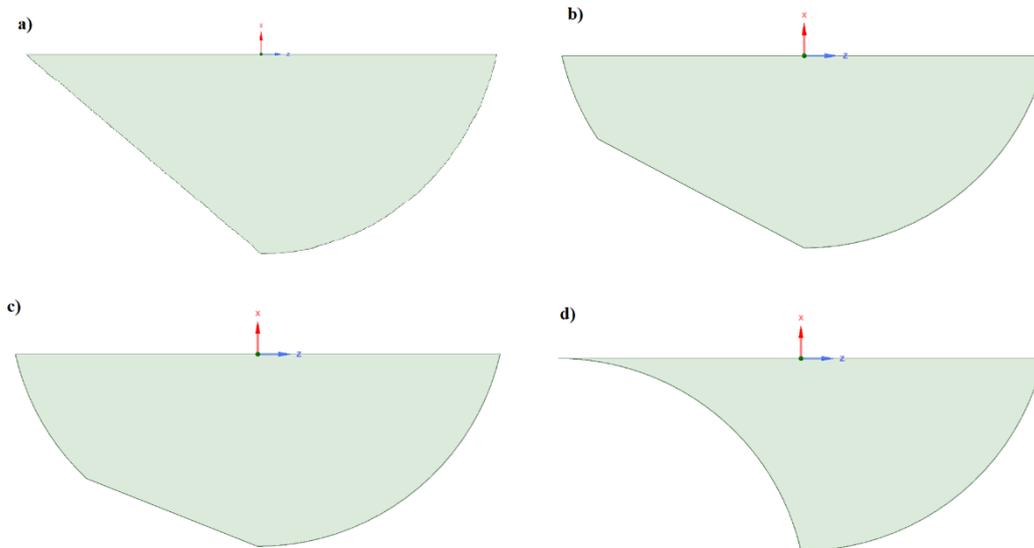


**Figura 11:** Valle simmetrica con *cross section* circolare e triangolare e  $h/w = 0.2 - 0.4 - 0.6 - 0.8$

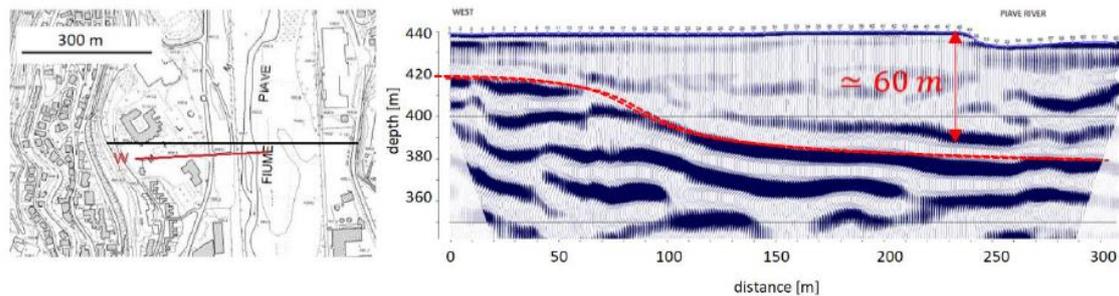
Analogamente a quanto ipotizzato da Castellaro e Musinu nel loro articolo, anche in questi modelli la valle sedimentaria è composta da un lato lungo libero di muoversi (L) e da un lato corto (T) ortogonale al primo e idealmente delimitato da due catene montuose (Figura 1). Per simulare il limite imposto al moto della valle dalla presenza delle montagne, e l'interfaccia tra la base dei sedimenti e il *bedrock* rigido sottostante, sono state fissate delle condizioni al contorno per bloccare i nodi corrispondenti al contatto con questi elementi.

---

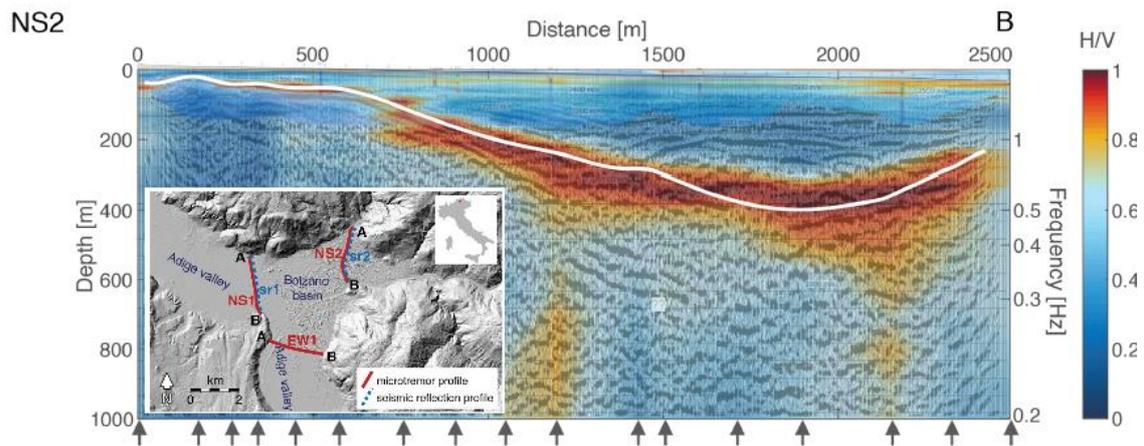
<sup>13</sup> Dalla relazione  $\mu = \rho \cdot V_S^2$



**Figura 12:** Esempi di valli asimmetriche di *aspect ratio*  $h/w = 0.8$  con **a)** taglio al bordo **b)** taglio a 5 m dal bordo **c)** taglio a 10 m dal bordo **d)** sovrapposizione di due semi-cerchi.

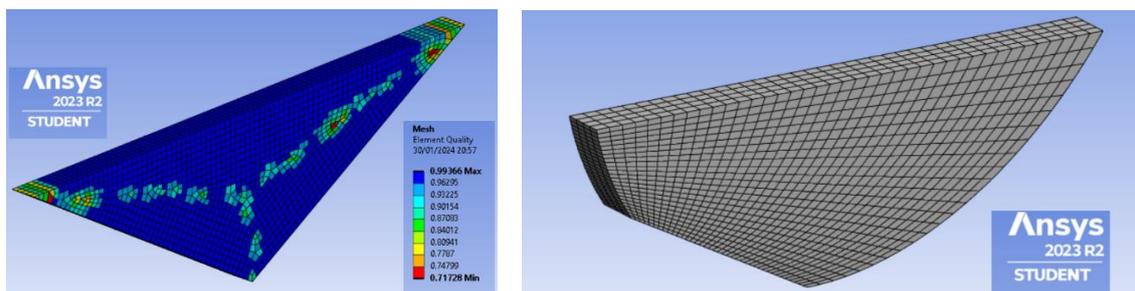


**Figura 13:** Ricostruzione della profondità del substrato roccioso (linea tratteggiata rossa) a Longarone (BL), secondo il profilo sismico a riflessione (per gentile concessione del Comune di Longarone). Il profilo sismico a riflessione copre una lunghezza di ca. 300 m (linea rossa sul pannello di sinistra) mentre l'apertura della valle è di 600 m (linea nera sul pannello di sinistra). (*Tratto da Castellaro e Musinu, 2022*).



**Figura 14:** Profilo di riflessione (Pöyry, 2017) della Valle dell'Adige per la sezione NS2. La linea bianca indica la posizione dell'interfaccia tra *bedrock* e sedimenti dedotta dalla sismica a riflessione; le frecce nere indicano i punti in cui sono state acquisite le misure di micro-tremore sismico per effettuare un'analisi con la tecnica H/V. Ogni curva H/V è stata normalizzata in una scala di colori tra 0 (blu) e 1 (rosso): ne parleremo meglio nel capitolo 4. (Rielaborazione figura e didascalia da Sgattoni e Castellaro, 2020)

Per quanto riguarda la *mesh* (Figura 15), la sezione degli elementi utilizzati dal programma varia da un minimo di 0.17 m a un massimo di 0.33 m. Una limitazione all'analisi modale è stata costituita dall'utilizzo della versione gratuita del software (ANSYS *Student*), che impone un numero massimo di nodi utilizzabili per l'analisi, limite corrispondente a 32000 nodi. Non è stato, quindi, possibile infittire ulteriormente la *mesh*, né aumentare a discrezione la qualità delle soluzioni ottenute.



**Figura 15:** Esempi della *mesh* utilizzata nell'analisi modale per: una valle asimmetrica semi-circolare di *aspect ratio*  $h/w = 0.6$  e taglio a 5 m dal bordo (a destra) e per una valle simmetrica triangolare di *aspect ratio*  $h/w = 0.6$  (a sinistra): in questo caso è visibile anche l'*element quality* di ogni nodo della *mesh*.

## 2.2 I risultati ottenuti

Sono state identificate le frequenze dei 3 principali modi di vibrare  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $T_1$  per 6 differenti tipi di valle, caratterizzate da *cross section* simmetriche e non simmetriche (valle circolare; triangolare; valle mista circolare + triangolare con taglio in corrispondenza del bordo del bacino, a 5 m dal bordo e a 10 m dal bordo; circolare + circolare con taglio al bordo, a 5 m dal bordo e a 10 m dal bordo) e per 4 diversi *aspect ratio* ( $h/w = 0.2, 0.4, 0.6, 0.8$ ) (per un totale di 24 modellazioni numeriche).

I risultati ottenuti per ciascun tipo di valle e per i diversi *aspect ratio* sono riassunti nelle tabelle che seguono.

**Tabella 1:** Modi di vibrare di valli simmetriche [S] e asimmetriche [A] con *aspect ratio*  $h/w = 0.2$ .

Geometria	Forma della valle	w [m]	h [m]	h/w	$L_1$ [Hz]	$L_2$ [Hz]	$T_1$ [Hz]	$T_1/L_1$	$L_2/L_1$
[S]	Triangolare	10	2	<b>0,2</b>	92,9	116,01	103,46	<b>1,11</b>	<b>1,25</b>
[S]	Circolare	10	2	<b>0,2</b>	82,118	95,862	88,855	<b>1,082</b>	<b>1,167</b>
[A]	Circolare taglio 10 m dal bordo	10	2	<b>0,2</b>	83,685	98,025	90,503	<b>1,081</b>	<b>1,171</b>
[A]	Circolare taglio 5 m dal bordo	10	2	<b>0,2</b>	84,517	100,34	91,878	<b>1,087</b>	<b>1,187</b>
[A]	Circolare taglio al bordo	10	2	<b>0,2</b>	85,746	103,8	94,327	<b>1,100</b>	<b>1,211</b>
[A]	Circolare + circolare	10	2	<b>0,2</b>	87,764	108,66	98,228	<b>1,119</b>	<b>1,238</b>

**Tabella 2:** Modi di vibrare di valli simmetriche [S] e asimmetriche [A] con *aspect ratio*  $h/w = 0.4$ .

<b>Geometria</b>	<b>Forma della valle</b>	<b>w</b> [m]	<b>h</b> [m]	<b>h/w</b>	<b>L<sub>1</sub></b> [Hz]	<b>L<sub>2</sub></b> [Hz]	<b>T<sub>1</sub></b> [Hz]	<b>T<sub>1</sub>/L<sub>1</sub></b>	<b>L<sub>2</sub>/L<sub>1</sub></b>
[S]	Triangolare	10	4	<b>0,4</b>	53,363	73,309	63,392	<b>1,188</b>	<b>1,374</b>
[S]	Circolare	10	4	<b>0,4</b>	44,934	58,791	52,607	<b>1,171</b>	<b>1,308</b>
[A]	Circolare taglio 10 m dal bordo	10	4	<b>0,4</b>	45,866	59,644	53,448	<b>1,165</b>	<b>1,300</b>
[A]	Circolare taglio 5 m dal bordo	10	4	<b>0,4</b>	46,661	61,273	54,419	<b>1,166</b>	<b>1,313</b>
[A]	Circolare taglio al bordo	10	4	<b>0,4</b>	48,09	65,115	57,048	<b>1,186</b>	<b>1,354</b>
[A]	Circolare + circolare	10	4	<b>0,4</b>	50,683	71,155	61,873	<b>1,221</b>	<b>1,404</b>

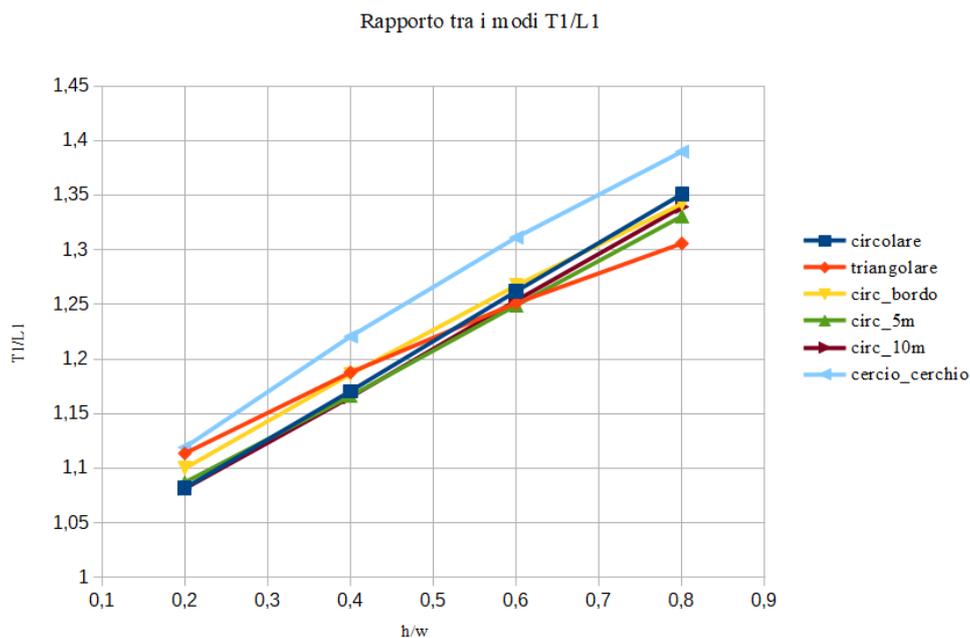
**Tabella 3:** Modi di vibrare di valli simmetriche [S] e asimmetriche [A] con *aspect ratio*  $h/w = 0.6$ .

<b>Geometria</b>	<b>Forma della valle</b>	<b>w</b> [m]	<b>h</b> [m]	<b>h/w</b>	<b>L<sub>1</sub></b> [Hz]	<b>L<sub>2</sub></b> [Hz]	<b>T<sub>1</sub></b> [Hz]	<b>T<sub>1</sub>/L<sub>1</sub></b>	<b>L<sub>2</sub>/L<sub>1</sub></b>
[S]	Triangolare	10	6	<b>0,6</b>	40,244	58,868	50,361	<b>1,251</b>	<b>1,463</b>
[S]	Circolare	10	6	<b>0,6</b>	32,682	46,543	41,249	<b>1,262</b>	<b>1,424</b>
[A]	Circolare taglio 10 m dal bordo	10	6	<b>0,6</b>	33,387	47,073	41,853	<b>1,254</b>	<b>1,410</b>
[A]	Circolare taglio 5 m dal bordo	10	6	<b>0,6</b>	34,112	48,272	42,617	<b>1,249</b>	<b>1,415</b>
[A]	Circolare taglio al bordo	10	6	<b>0,6</b>	35,666	52,129	45,202	<b>1,267</b>	<b>1,462</b>
[A]	Circolare + circolare	10	6	<b>0,6</b>	38,901	59,316	51,014	<b>1,311</b>	<b>1,525</b>

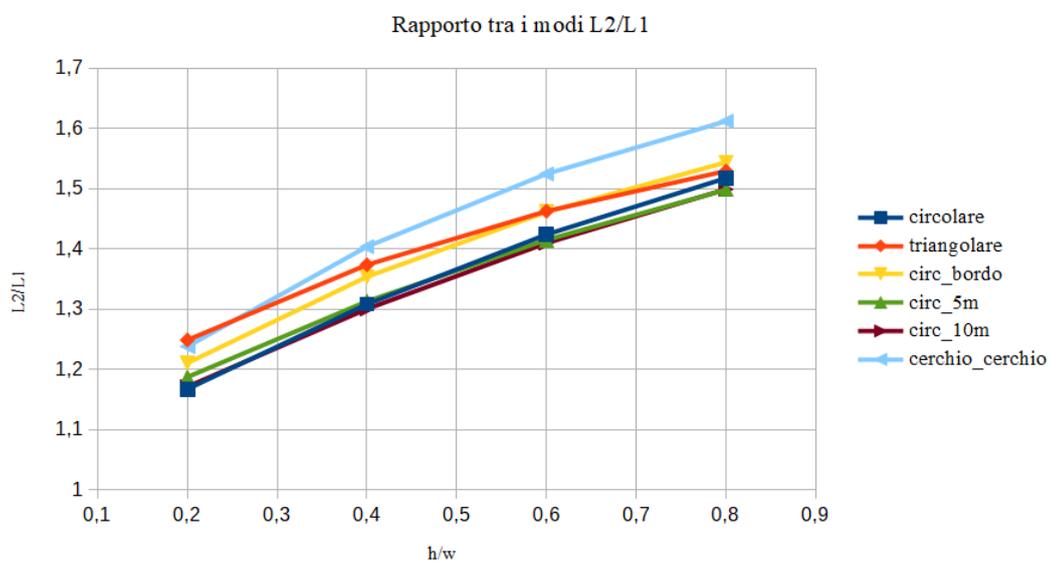
**Tabella 4:** Modi di vibrare di valli simmetriche [S] e asimmetriche [A] con *aspect ratio*  $h/w = 0.8$ .

<b>Geometria</b>	<b>Forma della valle</b>	<b>w</b> [m]	<b>h</b> [m]	<b>h/w</b>	<b>L<sub>1</sub></b> [Hz]	<b>L<sub>2</sub></b> [Hz]	<b>T<sub>1</sub></b> [Hz]	<b>T<sub>1</sub>/L<sub>1</sub></b>	<b>L<sub>2</sub>/L<sub>1</sub></b>
[S]	Triangolare	10	8	<b>0,8</b>	33,792	51,687	44,13	<b>1,306</b>	<b>1,530</b>
[S]	Circolare	10	8	<b>0,8</b>	26,607	40,385	35,947	<b>1,351</b>	<b>1,518</b>
[A]	Circolare taglio 10 m dal bordo	10	8	<b>0,8</b>	27,226	40,816	36,466	<b>1,339</b>	<b>1,499</b>
[A]	Circolare taglio 5 m dal bordo	10	8	<b>0,8</b>	27,906	41,818	37,14	<b>1,331</b>	<b>1,499</b>
[A]	Circolare taglio al bordo	10	8	<b>0,8</b>	29,531	45,599	39,64	<b>1,342</b>	<b>1,544</b>
[A]	Circolare + circolare	10	8	<b>0,8</b>	33,479	53,98	46,535	<b>1,390</b>	<b>1,612</b>

Si riportano anche i grafici in cui si mostra l'andamento dei rapporti tra i modi  $T_1/L_1$  e  $L_2/L_1$  in funzione dei diversi *aspect ratio* presi in esame, per ogni tipo di sezione trasversale analizzata. Questi grafici saranno utilizzati in seguito per ottenere informazioni sulla geometria dei bacini sedimentari, secondo il procedimento in precedenza discusso nella sezione 1.3.



**Figura 16:** Rapporto tra le frequenze dei modi fondamentali in funzione dell'*aspect ratio* e della forma del bacino, per ogni tipo di modello analizzato con ANSYS.



**Figura 17:** Andamento del rapporto dei modi superiori in funzione dell'*aspect ratio* e della forma del bacino, per i modelli ANSYS in esame.

## 2.3 Validazione dei modelli

Per validare i risultati ricavati tramite la modellazione con ANSYS, sono stati effettuati dei confronti tra le soluzioni numeriche ottenute per i casi asimmetrici di cui sopra e:

- i corrispondenti casi simmetrici teorici;
- alcuni casi standard simmetrici riportati nell'articolo Castellaro e Musinu (2022).

### 2.3.1 Confronto con casi simmetrici teorici

Un primo test si può effettuare studiando come variano i modi  $L_1$ ,  $L_2$ ,  $T_1$  via via che ci si allontana dal caso simmetrico di valle circolare fino ad arrivare ai casi limite di valle circolare con taglio al bordo e cerchio + cerchio.

Osservando le tabelle 1, 2, 3 e 4 si possono fare le seguenti considerazioni:

1. Il modello di valle circolare con taglio a 10 m dal bordo è quello più vicino al caso simmetrico; più il taglio si avvicina al centro della valle, più si perde simmetria e più le frequenze si discostano dal caso circolare: la massima asimmetria si verifica per due cerchi accostati (caso misto cerchio + cerchio).
2. Via via che aumenta l'asimmetria aumentano anche le frequenze dei modi, a parità di *aspect ratio*.
3. I valori delle frequenze dei modi di vibrare diminuiscono se aumenta l'*aspect ratio*; i rapporti tra le frequenze  $T_1/L_1$  e  $L_2/L_1$ , invece, crescono all'aumentare dell'*aspect ratio*, come è possibile osservare in Figura 16 e in Figura 17.
4. Per un fissato valore di  $h/w$ , la variazione delle frequenze affligge di più i modi superiori rispetto a quelli fondamentali e questo si può notare studiando come variano i rapporti  $T_1/L_1$  e  $L_2/L_1$  a mano a mano che aumenta l'asimmetria: il rapporto  $L_2/L_1$  varia più marcatamente rispetto a  $T_1/L_1$ .
5. In termini di frequenze, il modello misto con due cerchi accostati è quello che più si avvicina al caso simmetrico triangolare.

### 2.3.2 Confronto con casi standard simmetrici noti

Un ulteriore test di convergenza delle soluzioni può essere eseguito confrontando i risultati ottenuti nei nostri modelli simmetrici (valle circolare e triangolare “EDA”) e quelli considerati nell’articolo Castellaro e Musinu (2022) (valle circolare e triangolare “CM”).

In particolare, è stato eseguito un confronto tra le frequenze di valli circolari con  $h/w = 0.2$  e di valli triangolari con  $h/w = 0.6$  (Tabella 5).

**Tabella 5:** Confronto tra i modelli simmetrici di valli sedimentarie “EDA” e quelli riportati nell’articolo Castellaro e Musinu (2022) “CM”.

	<b>Forma della valle</b>	<b>w [m]</b>	<b>h [m]</b>	<b>h/w</b>	<b>L1 [Hz]</b>	<b>L2 [Hz]</b>	<b>T1 [Hz]</b>	<b>T1/L1</b>	<b>L2/L1</b>
<b>CM</b>	Circolare	1000	200	<b>0,2</b>	0,82118	0,95862	0,88566	<b>1,079</b>	<b>1,167</b>
<b>EDA</b>	Circolare	10	2	<b>0,2</b>	82,118	95,862	88,855	<b>1,082</b>	<b>1,167</b>
<b>CM</b>	Triangolare	1000	600	<b>0,6</b>	0,40244	0,58868	0,50066	<b>1,244</b>	<b>1,463</b>
<b>EDA</b>	Triangolare	10	6	<b>0,6</b>	40,244	58,868	50,361	<b>1,251</b>	<b>1,463</b>

Osservando la Tabella 5, si possono trarre le seguenti conclusioni:

1. Le frequenze proprie dei modi longitudinale  $L_1$  e  $L_2$  di “EDA” sono scalate di un fattore 100 rispetto a quelle di “CM”: questo è dovuto all’effetto di scala per cui, per una data forma geometrica, le frequenze sono proporzionali a  $V_s/h$ . In questo caso,  $V_{SEq} = 600$  m/s in entrambe le modellazioni, ma  $h = 1000$  m in “CM” e  $h = 10$  m in “EDA”. Per questo motivo, lo studio si baserà sull’analisi dei rapporti delle frequenze modali, e non sui loro valori assoluti.
2. Le frequenze proprie del modo trasversale  $T_1$  in “EDA” sono leggermente diverse da quelle in “CM”, pur considerando l’effetto di scala: questo è dovuto al contributo del modulo di Poisson, assunto pari a  $\nu = 0.4$  in “EDA” e a  $\nu = 0.37$  in “CM”. L’effetto del diverso modulo di Poisson interessa tutti i modi non longitudinali ed è tanto più evidente quanto più alto è il rapporto  $h/w$ .

Quanto detto finora è in accordo con quanto riportato nell'articolo Castellaro e Musinu (2022).

Dall'applicazione dei test di convergenza appena effettuati, si può concludere che esiste una concordanza tra i risultati ottenuti nei vari casi presi in esame ed è, quindi, ora possibile testarne l'applicabilità a un caso di studio reale.

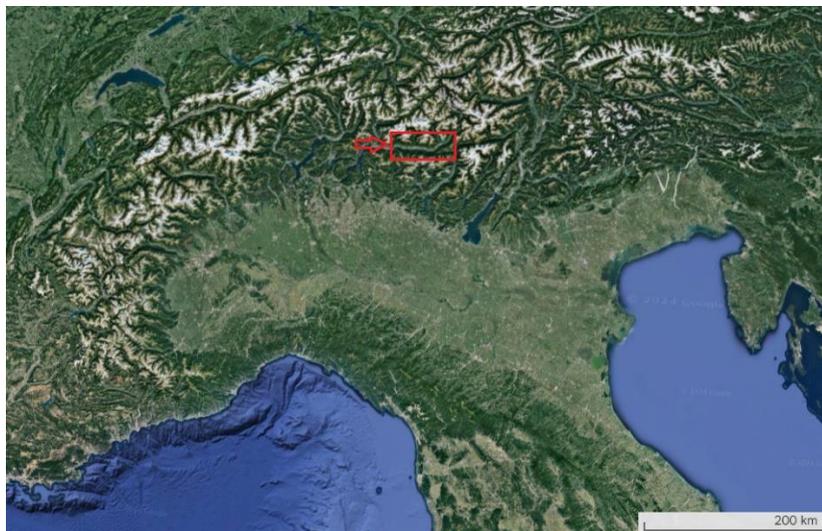
Nei prossimi capitoli verrà descritta la campagna di misura che è stata effettuata a tale scopo.

### 3. LA CAMPAGNA DI MISURA: LA VALTELLINA

Per testare l'applicabilità dei nostri modelli, nell'ottobre del 2021 è stata effettuata una campagna di indagine in un contesto alpino che presenta asimmetrie, note da studi precedenti di tipo geologico-stratigrafico: la Valtellina.

#### 3.1 Inquadramento geografico

La Valtellina è una regione geografica alpina della Lombardia settentrionale, nel nord della penisola italiana (Figura 18). È una delle valli alpine più lunghe e importanti delle Alpi Retiche. La valle si estende per circa 120 km lungo il corso del fiume Adda, da Bormio fino a poco oltre Sondrio, dove il fiume si apre nella Pianura Padana. L'intera valle e la Valchiavenna formano insieme la Provincia di Sondrio.



**Figura 18:** Inquadramento geografico della regione alpina della Valtellina. (Immagine tratta da Google Earth).

## 3.2 Lo stato dell'arte

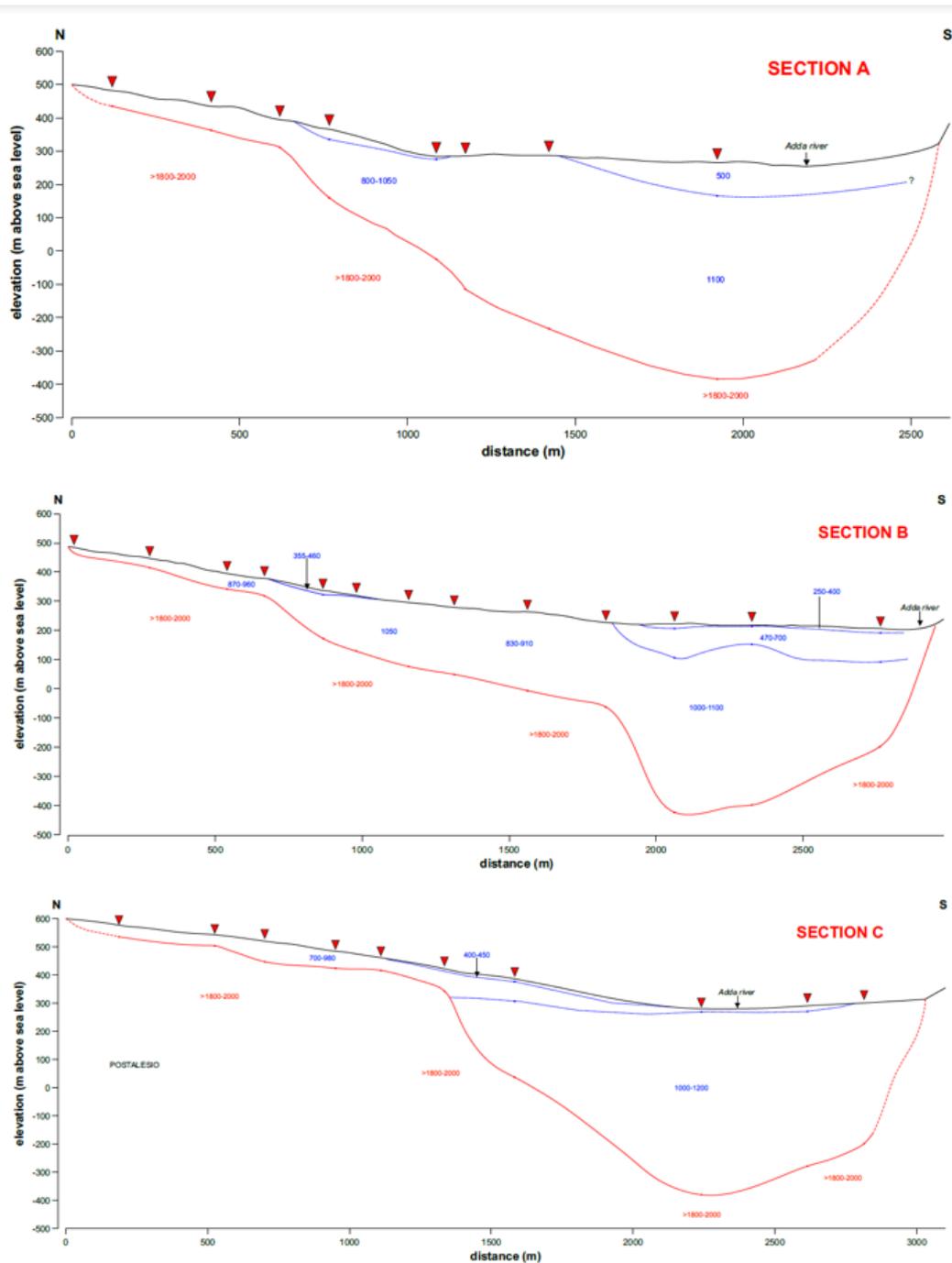
La forma della Valtellina è stata determinata da diversi processi geomorfologici. Tra i più rilevanti, possiamo citare:

- L'erosione glaciale, che ha scavato valli, creato circhi glaciali e depositi di materiale glaciale che possono essere osservati ancora oggi.
- L'erosione fluviale, a opera del fiume Adda, che scorre lungo la valle e che ha portato alla formazione e all'approfondimento del fondovalle.
- I processi fluviali, sia di trasporto che di deposizione. Parallelamente all'erosione, l'Adda e i suoi affluenti hanno depositato materiali alluvionali lungo il loro percorso, formando pianure alluvionali fertili.
- I processi gravitativi di dinamica dei versanti, che determinano il rimaneggiamento di depositi glaciali e la formazione di detriti di versante.
- I processi di deformazione gravitativa profonda, tuttora in attività, che hanno interessato entrambi i versanti della Valle dell'Adda e che contribuiscono alla dinamica dei versanti.

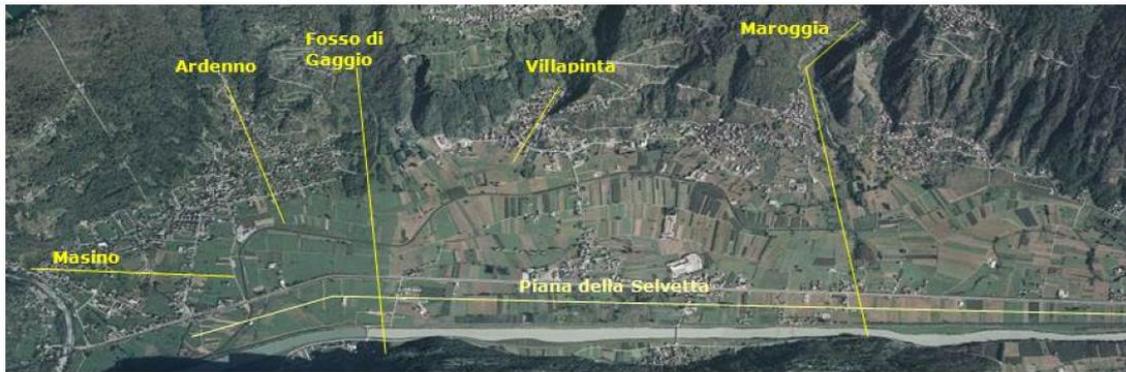
Dall'interazione di questi processi, la Valtellina ha acquisito la conformazione attuale e può essere suddivisa, dal punto di vista morfologico, in settori omogenei, che differiscono sia per le forme del territorio che per i processi geologici e geomorfologici passati o in atto (Bassi, 2011).

Dagli studi di Biella *et al.* (2001), de Franco *et al.* (2009), Bassi (2011) e Mele *et al.* (2012), è possibile concludere che la Valtellina presenta una componente di asimmetria nella sua geometria che la rende perfetta come modello di test per il nostro caso di studio.

In particolare, si è mostrato che la Valtellina è un'ampia paleo-valle asimmetrica (Figura 19), fortemente scentrata rispetto all'asse della valle (Bassi, 2011).



**Figura 19:** Ricostruzioni delle sezioni trasversali della Valtellina (condotte a partire da dati H/V interpretati in ottica 1D) in corrispondenza del Fosso di Gaggio (Ardenno) (SO) (**sezione A**); Maroggia (SO) (**sezione B**); Postalesio (SO) (**sezione C**). La localizzazione di ogni sezione è visibile in Figura 20. La linea rossa spessa corrisponderebbe, secondo Bassi (2011), all'elevazione sopra il livello del mare dell'interfaccia sismica più profonda, corrispondente al picco H/V con la frequenza più bassa e interpretato come il substrato roccioso. Le sottili linee blu tratteggiate si riferirebbero alle interfacce sismiche discontinue all'interno della copertura sedimentaria corrispondenti ai picchi H/V a frequenza più elevata. (*Immagini e rielaborazione didascalica tratte da Bassi, 2011*).



**Figura 20:** Ubicazione delle sezioni lungo cui sono stati acquisiti i profili di sismica passiva in Bassi (2011).

Nella parte centrale si evidenzia la presenza di un versante ripido a Sud e di una serie di ampi terrazzi pianeggianti sottostanti il riempimento sedimentario a Nord. Da Est a Ovest, inoltre, il *bedrock* non presenta una pendenza costante, ma alcuni apparenti depocentri<sup>14</sup>, divisi da soglie rocciose possibilmente corrispondenti a deformazioni gravitazionali profonde del versante o ad un accumulo tettonico e che caratterizzano il fondovalle (Mele *et al.*, 2012).

---

<sup>14</sup> Il depocentro è l'area di massima deposizione all'interno di un bacino sedimentario, dove si può trovare il maggiore sviluppo, ossia il maggior spessore di una sequenza sedimentaria.

### 3.3 La campagna di prospezione

La nostra campagna di misure è stata svolta in un'area di circa 35 km<sup>2</sup> tra Morbegno e Barbenno di Valtellina, in provincia di Sondrio (Figura 21). La zona di indagine è stata suddivisa in quattro sezioni (A, B, C, D), lungo le quali sono state acquisite un totale di 40 misurazioni di micro-tremore sismico (Figura 22). I dati lungo ciascuna sezione sono stati acquisiti in tre giornate diverse (27, 28, 29 ottobre 2021), in condizioni meteo stabili (soleggiate).

Ogni acquisizione è stata effettuata tramite tromografo digitale TROMINO<sup>®</sup> 3G, dotato di tre velocimetri ed accelerometri orientati lungo le due direzioni orizzontali ortogonali e lungo la direzione verticale. Il tratto di valle considerato è totalmente orientato lungo la direzione E-W: lo strumento è stato quindi orientato con gli assi principali in direzione NS e EW (Figura 23).

Per ogni sezione, le due misure in corrispondenza del primo e dell'ultimo punto sono state acquisite su *bedrock* affiorante (Figura 25), mentre le altre sono state distribuite in modo più omogeneo possibile lungo le sezioni trasversali della valle (Figura 26, Figura 27, Figura 28, Figura 29), tenendo ovviamente conto degli ostacoli naturali che potessero impedire di proseguire in maniera diritta (per esempio a causa della presenza del fiume, di strade, ferrovie, edifici, recinti di animali, ecc.).

Ogni misura è stata acquisita con finestre temporali di 14 minuti sul *bedrock* e di 18 minuti per gli altri punti all'interno della valle e a una frequenza fissata a 128 Hz.

Ogni sezione, invece, è stata acquisita nell'arco di poche ore in modo da rendere più verosimile l'interpretazione dei dati nell'ipotesi di sorgente stazionaria (a meno di alcune misure che sono state ribattute nei giorni seguenti, via via che ci si accorgeva in corso d'opera di possibili fonti di disturbo del segnale): quest'accortezza ha permesso di processare i dati (acquisiti in giornate diverse) con gli stessi criteri, al fine di ottenere dei risultati confrontabili.

Nella tabella che segue (Tabella 6) sono sintetizzate le caratteristiche di ogni sezione analizzata e in Appendice sono riportate le coordinate di ogni punto di misura e le mappe delle sezioni A, B e D (Figura 81, Figura 83, Figura 85).

**Tabella 6:** Caratteristiche di ogni sezione analizzata; la lunghezza della sezione è stata misurata da spalla su *bedrock* a spalla su *bedrock* del bacino, in corrispondenza della prima e dell'ultima misura.

<b>SEZIONE</b>	<b>LUNGHEZZA DELLA SEZIONE INDAGATA [m]</b>	<b>AMPIEZZA (2w) DELLA VALLE [m]</b>	<b>NUMERO TOT. DI ACQUISIZIONI</b>	<b>NUMERO DI RIBATTUTE</b>
<b>A</b>	2300	1800	10	0
<b>B</b>	2600	1900	14	1
<b>C</b>	1300	1200	7	1
<b>D</b>	1700	1500	9	2

Si deve precisare, infine, che, in fase di elaborazione del segnale, è stato deciso di scartare l'intera sezione C, visti i numerosi ostacoli naturali (fitti boschi ricchi di ghiaia e rocce, alte recinzioni) (Figura 24) che hanno impedito di poter effettuare le misure in un numero sufficiente di punti per permettere anche la ricostruzione delle forme modali (Figura 48, Figura 49 e Figura 50).

Ogni acquisizione ha fornito delle tracce contenenti gli spettri delle singole componenti lungo le direzioni orizzontali (N-S ed E-W) e lungo la direzione verticale.

In corrispondenza delle misure centrali delle sezioni A, B e D, sono state effettuate anche delle prospezioni sismiche multicanale a onde di superficie di tipo MASW (*Multichannel Analysys of Surface Waves*, Park *et al*, 1999). Le prove sono state condotte attraverso il sismografo SoilSpy e sono consistite nella realizzazione di tre stendimenti da 16 geofoni ciascuno (Figura 30), distanti l'uno dall'altro 4 m (in corrispondenza delle misure A05 e B07) o 5<sup>15</sup> m (vicino al punto D05). In questo modo abbiamo raggiunto per i primi due stendimenti una lunghezza totale di 60 m e per il terzo di 75 m. Dal momento che tutte le misure sono state effettuate in campo aperto, ciascun geofono è stato infilato direttamente nel terreno tramite l'apposito puntale. Dopo aver posizionato lo strumento, abbiamo

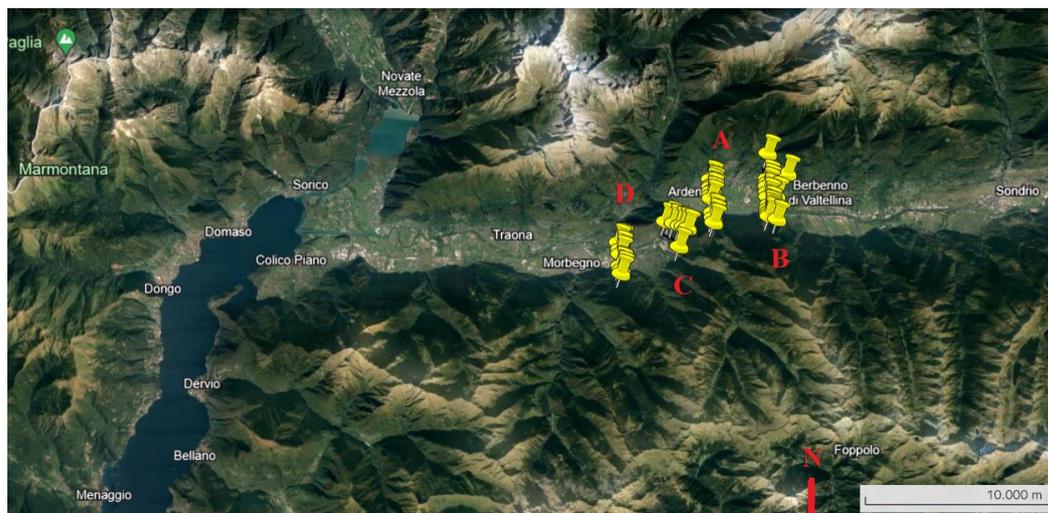
---

<sup>15</sup> La spaziatura tra i geofoni utilizzata per le prove MASW va commisurata in base al tipo di terreno su cui si esegue la prospezione: per terreni molto duri o rocce si utilizzano spaziature di 4-5 m per limitare il fenomeno del sotto-campionamento spaziale.

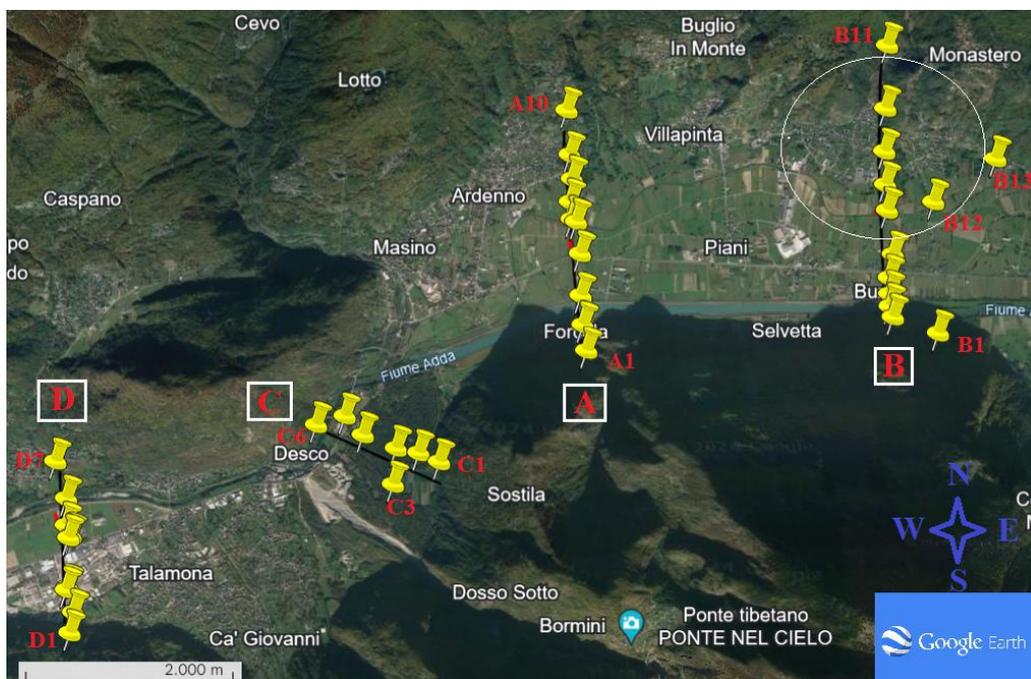
generato una sorgente artificiale di onde sismiche in prossimità del primo geofono di ciascuno stendimento, per mezzo di una decina di salti sul posto ripetuti ad intervalli di tempo il più possibile regolari. I dati relativi alle onde sismiche registrate dai geofoni sono stati raccolti in un sistema di acquisizione elettronico, che ha memorizzato le informazioni sui tempi di arrivo e sull'ampiezza delle onde.

Nel prossimo capitolo verrà descritta nel dettaglio la procedura utilizzata per l'analisi dei dati sperimentali.

Tratto da Google Earth:



**Figura 21:** Inquadramento geografico dell'area di indagine: sono visibili le sezioni A, B, C e D lungo le quali sono state acquisite le misure.



**Figura 22:** Dettaglio delle sezioni su cui sono state effettuate le acquisizioni di micro-tremore sismico. Sono visibili il corso del fiume Adda che attraversa l'intera valle e il conoide (cerchio bianco).



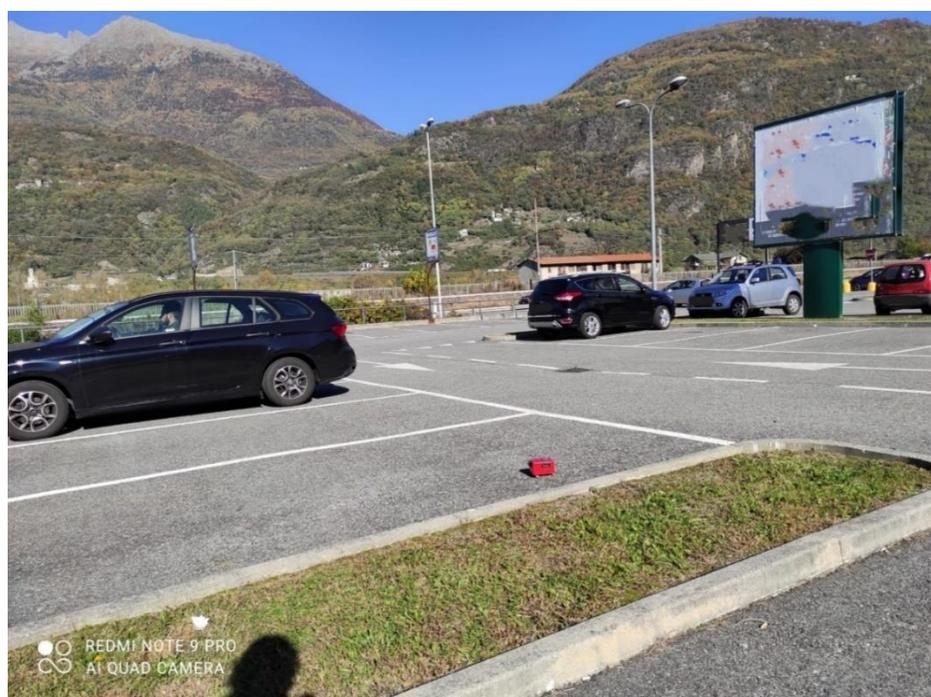
**Figura 23:** Orientazione del TROMINO durante l’acquisizione delle misure di micro-tremore sismico. È possibile notare che il Nord strumentale (evidenziato dalla freccia nera posizionata a sinistra dello schermo del tromografo) è orientato lungo la direzione E-W geografica, misurata tramite bussola.



**Figura 24:** Ostacoli naturali presenti durante le acquisizioni della sezione C.



**Figura 25:** Esempio di misura su *bedrock*.



**Figura 26:** Esempio di misura su asfalto. In presenza di un terreno artificiale rigido come l'asfalto, ci si aspetta la presenza di inversioni di velocità (ossia  $H/V < 1$ ) ad alta frequenza; per lo studio delle risonanze (decisamente al di sotto 1 Hz) non sono attesi problemi maggiori da parte dell'asfalto.



**Figura 27:** Esempio di ostacolo: un recinto di animali. La freccia rossa indica la posizione del tromografo.



**Figura 28:** Misura nel giardino di un privato.



**Figura 29:** Acquisizione in un meleto, per gentile concessione di un'azienda locale.



**Figura 30:** Esempio di stendimento per le prove multicanale a onde di superficie eseguite in Valtellina.

## 4. ELABORAZIONE DEI DATI SPERIMENTALI

Ogni traccia registrata durante le acquisizioni di campagna è stata estratta dal TROMINO<sup>®</sup> ed analizzata inizialmente tramite software Grilla<sup>®</sup>; in seguito, un'ulteriore analisi è stata effettuata con il nuovo software HeeVee di MoHo s.r.l.

### 4.1 Elaborazione con Grilla<sup>®</sup>

Grilla<sup>®</sup> è un software creato per accedere, immagazzinare e analizzare le registrazioni acquisite con TROMINO<sup>®</sup>. Di seguito si riporta procedimento seguito per utilizzare il software, come descritto dal manuale di Grilla<sup>®</sup>.

In primo luogo, abbiamo visualizzato le tracce come in Figura 31. I dettagli relativi ad ogni misura sono schematizzati in un file apposito (Figura 32). Successivamente abbiamo suddiviso delle tracce in finestre temporali non sovrapposte di lunghezza fissata. In ogni finestra sono stati rimossi eventuali *offset* o *trend* non legati al segnale stesso (per esempio di natura elettronica), attraverso un'operazione chiamata *detrending*, poi è stata impostata una pseudo-periodicità tramite moltiplicazione del segnale di input per frequenze di tipo “cappello messicano” (questa operazione va sotto il nome di *tapering*)<sup>16</sup>.

La serie di input è stata ricondotta ad una lunghezza che sia potenza di 2 tramite l'aggiunta di zeri finali (questa operazione va sotto il nome di *padding*)<sup>17</sup> e a questo punto il segnale è stato trasformato dal dominio dei tempi (corrispondente alla serie temporale registrata) al dominio delle frequenze, attraverso la trasformata di Fourier (FFT) per ogni finestra in cui è stato suddiviso il segnale, per ciascun canale strumentale (Nord-Sud/Est-West/Up-Down). A questo punto il programma ha prodotto gli spettri di ampiezza delle diverse componenti del moto<sup>18</sup>. Gli spettri di ampiezza che vengono visualizzati automaticamente

---

<sup>16</sup> In vista del successivo passaggio al dominio delle frequenze tramite la trasformata di Fourier, che impone che il segnale sia periodico.

<sup>17</sup> La trasformata veloce di Fourier (FFT) si applica solo a serie temporali con un numero di campioni che sia potenza di 2.

<sup>18</sup> Gli spettri ottenuti dalle tracce registrate con il TROMINO<sup>®</sup> sono automaticamente corretti per la funzione di trasferimento strumentale.

alla fine di ciascuna analisi (Figura 33) sono in realtà la media degli spettri calcolati per ogni finestra, canale per canale. Abbiamo poi applicato una funzione di *smoothing* (lisciamento), agli spettri di ampiezza, per ciascuna finestra e per ogni canale strumentale. Lo *smoothing* avviene di default per mezzo di funzioni triangolari, la cui ampiezza è stabilita dall'operatore e corrisponde ad una percentuale della frequenza centrale.

Nei passaggi finali il software ha calcolato il rapporto spettrale H/V per ogni finestra temporale e per ciascuna frequenza e ha prodotto un grafico contenente il rapporto spettrale H/V in funzione della frequenza, ottenuto come media dei singoli H/V calcolati per ciascuna finestra.

Si noti che il rapporto H/V finale (Figura 34) che si ottiene alla fine è la media degli spettri delle componenti orizzontali (in termini di ampiezza) diviso per la componente verticale per ciascuna finestra, e si può calcolare in due modi (SESAME 2004): come media RMS (*Root Mean Square*) delle componenti orizzontali sulla componente verticale:

Equazione 5:

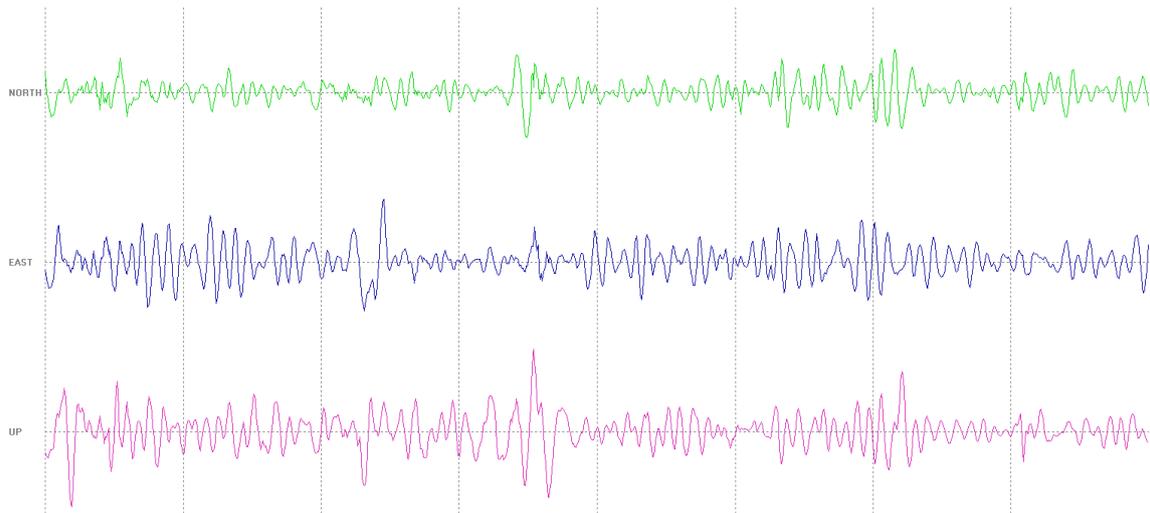
$$\frac{\sqrt{\frac{H_1^2 + H_2^2}{2}}}{V}$$

Oppure come media geometrica delle componenti orizzontali su quella verticale:

Equazione 6:

$$\frac{\sqrt{H_1 \times H_2}}{V}$$

H<sub>1</sub>, H<sub>2</sub> e V rappresentano gli spettri lisciati (*smoothed*), in termini di ampiezza, rispettivamente delle componenti orizzontali (N-S ed E-W strumentali) e della componente verticale (U-D). La tipologia di media utilizzata (RMS o geometrica) può essere stabilita tra le impostazioni del menu del software.



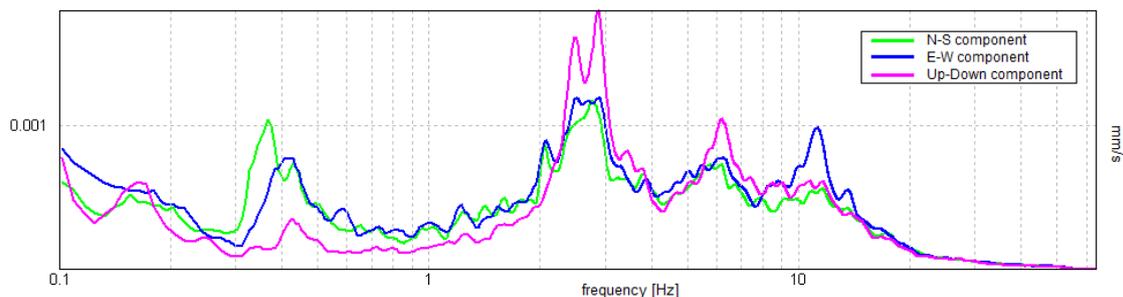
**Figura 31:** Traccia della registrazione (A04) di micro-tremore memorizzata con un TROMINO®, come visualizzata una volta estratta tramite il software Grilla®: la componente N-S del moto è mostrata di default nella prima riga dell'immagine; la componente E-W è sulla seconda riga e la componente verticale (Up-Down) è sulla terza riga. In ascissa si trova il tempo [in s, l'intervallo tra le righe a tratteggio verticale indica 1 secondo] e in ordinata l'ampiezza del moto [in  $\mu\text{V}$ ].

```

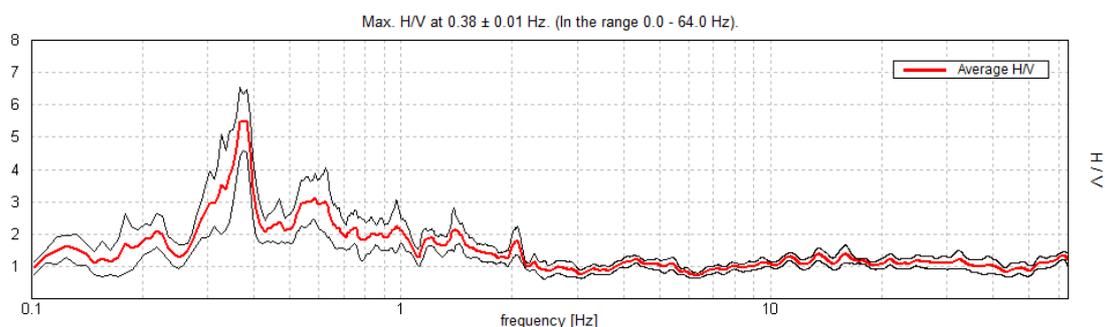
Site ID:           Valtellina, A04
Strumento:        TE3-0083/01-14
Formato dati:     32 bit
Fondo scala [mV]: 51
VELOCIM. - from counts to mm/s (multiply by): 0.00000011659
Num. canali:      3
Freq. campionamento: 128 Hz
Inizio registrazione: 27/10/2021 13:32:06
Fine registrazione:  27/10/2021 13:50:06
Durata registrazione: 0h18'00''
Nomi canali:
    NORTH SOUTH
    EAST  WEST
    UP    DOWN

```

**Figura 32:** Scheda riassuntiva dei dettagli relativi alla registrazione A04 (a titolo di esempio).



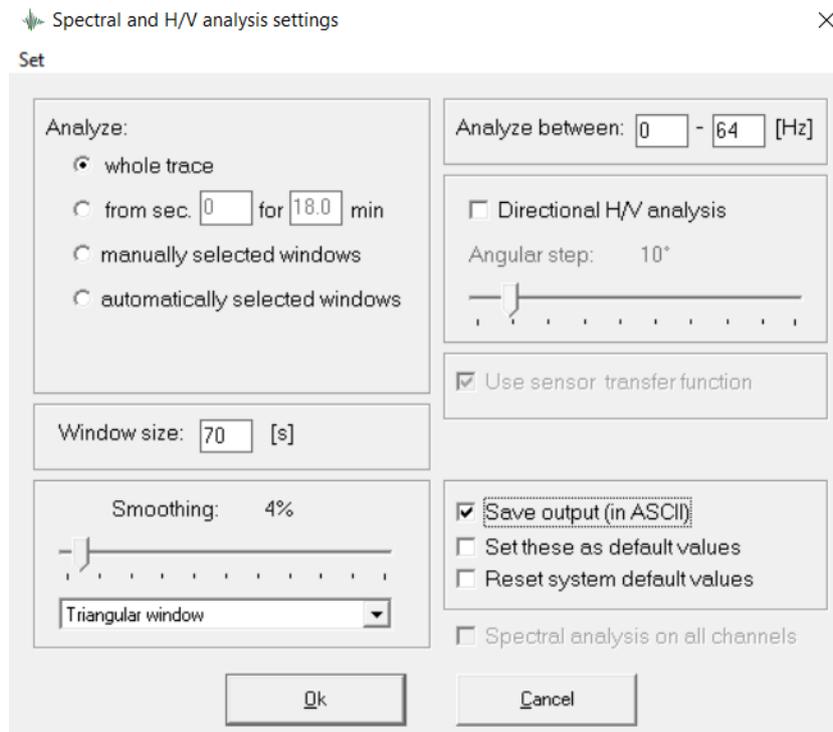
**Figura 33:** Spettri di ampiezza (log-lineari) nei tre canali NS/EW/UD strumentali, per la traccia A04. Gli spettri di ampiezza possono essere visualizzati in termini di spostamento [m], velocità [m/s] (come in questo caso) o accelerazione [m/s<sup>2</sup>].



**Figura 34:** Questo grafico riproduce il rapporto H/V, calcolato come media degli spettri delle componenti orizzontali sulla componente verticale di Figura 33, in funzione della frequenza, per la traccia A04. Il grafico H/V medio è rappresentato da una spessa linea rossa; le due sottili linee nere indicano l'intervallo di confidenza della curva H/V (che permette una valutazione dell'incertezza dei dati acquisiti).

L'elaborazione delle tracce sperimentali acquisite in Valtellina è stata condotta fissando i seguenti parametri (Figura 35):

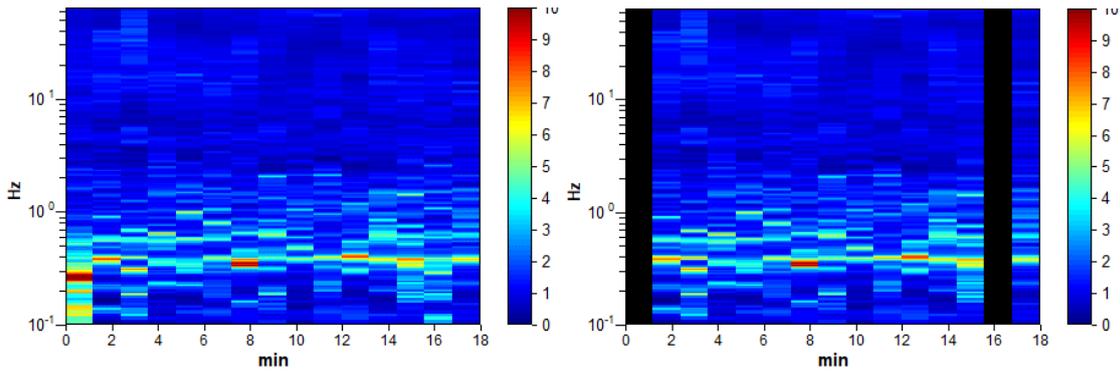
- L'analisi è stata condotta sull'intera traccia.
- Ogni traccia è stata suddivisa in finestre temporali di 70 s.
- È stato applicato uno *smoothing* su finestre triangolari con ampiezza pari al 4% della frequenza centrale.



**Figura 35:** Parametri stabiliti per l'analisi delle tracce acquisite in Valtellina.

Al fine di interpretare la prova nella maniera più corretta possibile, è stato anche necessario pulire le tracce dai possibili disturbi che potessero affliggere il segnale (i transienti): questa operazione è stata condotta eliminando le finestre temporali più disturbate in corrispondenza tipicamente delle basse frequenze, a cui viene registrato il micro-tremore sismico (Figura 36).

È bene ricordare anche che, per una corretta interpretazione dei dati, il grafico del rapporto H/V deve essere visualizzato in contemporanea agli spettri di ampiezza delle singole componenti del moto. Nel caso 1D questo è indispensabile per poter distinguere, per esempio, i picchi stratigrafici da quelli antropici nelle curve H/V; nel caso 2D, sono proprio gli spettri di ampiezza, con i loro picchi a frequenze diverse, a permettere di identificare le frequenze dei naturali modi di vibrare del bacino: in questo caso, guardare lo spettro H/V è utile per riconoscere le misure effettuate sul *bedrock* (in cui il rapporto H/V mostra un andamento piatto e non si allontana mai dal valore 1).



**Figura 36:** Esempio di pulizia dalle bande disturbate del segnale per la traccia A04: eliminare i disturbi permette di minimizzare la deviazione standard nel grafico del rapporto spettrale H/V.

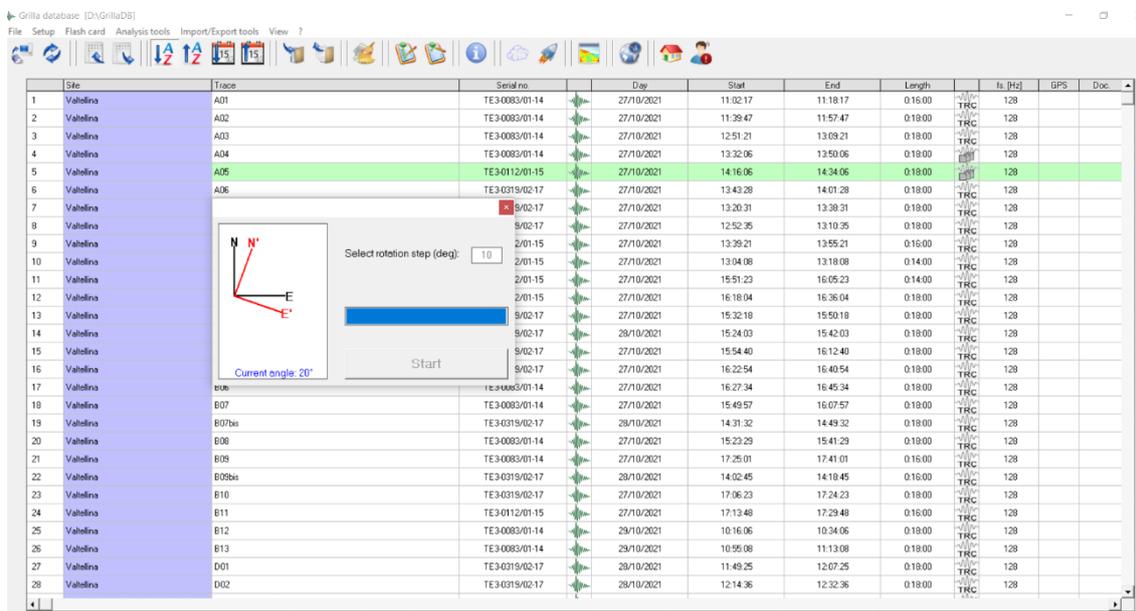
Una volta stabiliti i criteri da seguire per poter effettuare un'analisi il più possibile accurata, si è potuto procedere all'elaborazione delle tracce relative alle sezioni A, B e D. Per prima cosa, è stato necessario verificare quale fosse la direzione degli assi principali del moto della valle rispetto all'orientazione del TROMINO®.

È importante notare infatti che, per poter riconoscere le reali frequenze longitudinali e trasversali di un corpo risonante, è fondamentale riferirsi a misure fatte o proiettare lungo gli assi principali delle strutture geologiche (Sgattoni e Castellaro, 2020): spesso questi assi non coincidono con la direzione geografica NS ed EW (che è l'allineamento lungo cui spesso, per convenzione, di effettuano le misure). Non tenere conto di questo, può portare ad un'interpretazione totalmente errata dei dati sperimentali.

Nel nostro caso, il tratto di Valtellina considerato è orientato totalmente con il suo asse più lungo (longitudinale) nella direzione E-W e il tromografo era stato orientato con il N-S strumentale allineato alla direzione E-W. Il Nord-Sud che si legge sugli assi degli spettri di ampiezza, perciò, identifica in realtà il NS strumentale (Figura 23). Ci si aspetta che la Valtellina vibri di più lungo la componente EW reale (in direzione longitudinale), dato che lungo la direzione NS (reale) il moto è limitato dalla presenza delle catene alpine. Sugli spettri delle singole componenti del moto, perciò, ci si aspetta di osservare delle componenti orizzontali disaccoppiate (caso 2D) e che lungo la direzione NS strumentale (ovvero EW vera) il moto sia più ampio.

Per determinare gli assi principali del moto, sono state prese in esame le acquisizioni effettuate a centro-valle (misure A05, B05, D04bis), dove sono più visibili i modi fondamentali di vibrare ( $L_1$  e  $T_1$ ) e, per ciascuna sezione, sono stati fatti ruotare

virtualmente gli assi dello strumento di  $10^\circ$  in  $10^\circ$ , fino ad arrivare ad una rotazione massima di  $90^\circ$  rispetto alla direzione originaria (Figura 37).



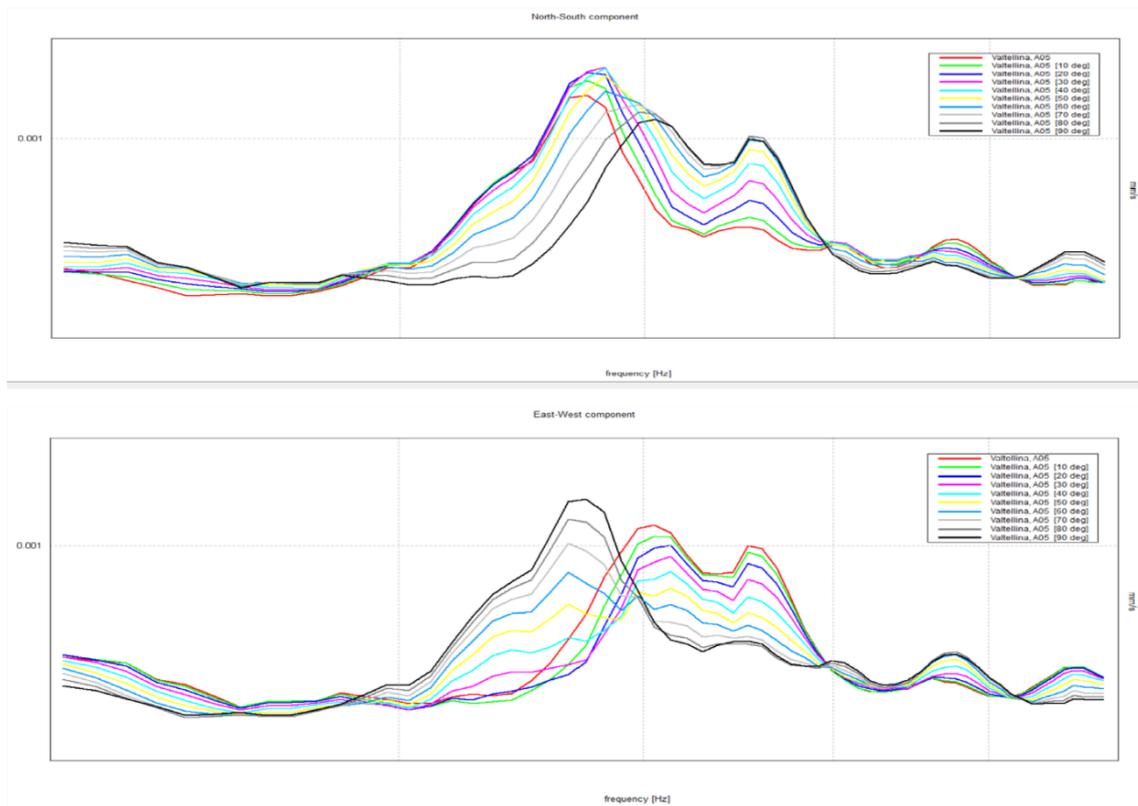
**Figura 37:** Rotazione degli assi per la misura a centro-valle della sezione A (A05), per la ricerca della direzione giusta del moto rispetto all'orientazione del TROMINO<sup>®</sup>. Gli assi sono stati ruotati virtualmente di  $10^\circ$  in  $10^\circ$ , fino ad una rotazione massima di  $90^\circ$  rispetto alla direzione originaria.

L'analisi descritta all'inizio di questo capitolo e la pulizia degli elementi di disturbo non sono state applicate solamente alle tracce originali, ma anche a quelle ruotate: è stato, quindi, possibile produrre un grafico che permette di visualizzare contemporaneamente, sezione per sezione, gli spettri di ampiezza di tutte le tracce ruotate, pulite ed analizzate (Figura 38, Figura 39, Figura 40).

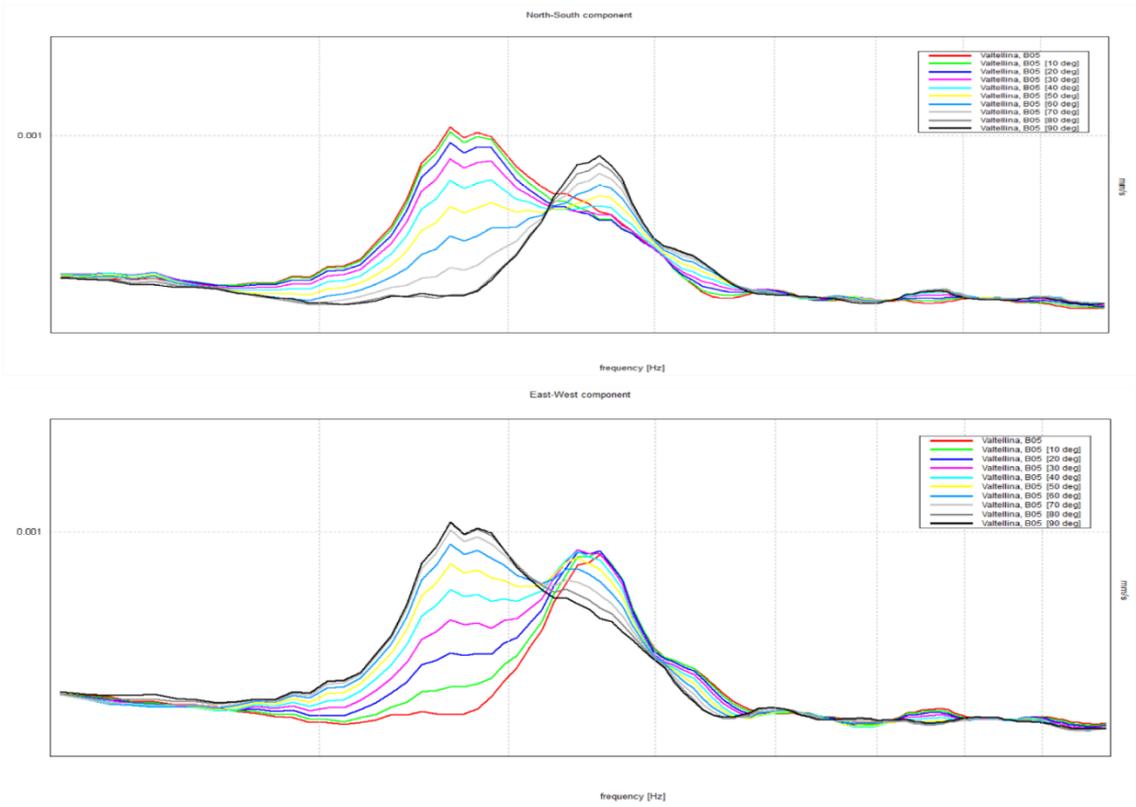
È stata, quindi, determinata la direzione principale del moto in ciascuna sezione, osservando i grafici appena costruiti: la direzione corretta è quella per cui i modi di vibrare ( $L_1$  e  $T_1$ ) mostrano la massima ampiezza in entrambe le componenti orizzontali del moto (NS ed EW).

Nel nostro caso, si nota che tutte e tre le sezioni A, B e D mostrano dei massimi per i modi fondamentali in corrispondenza della traccia nera, che corrisponde ad una rotazione di  $90^\circ$  rispetto alla direzione originaria, in entrambe le componenti orizzontali. Dato che l'effetto di una rotazione di  $90^\circ$  è solamente quello di indurre uno scambio degli assi EW,

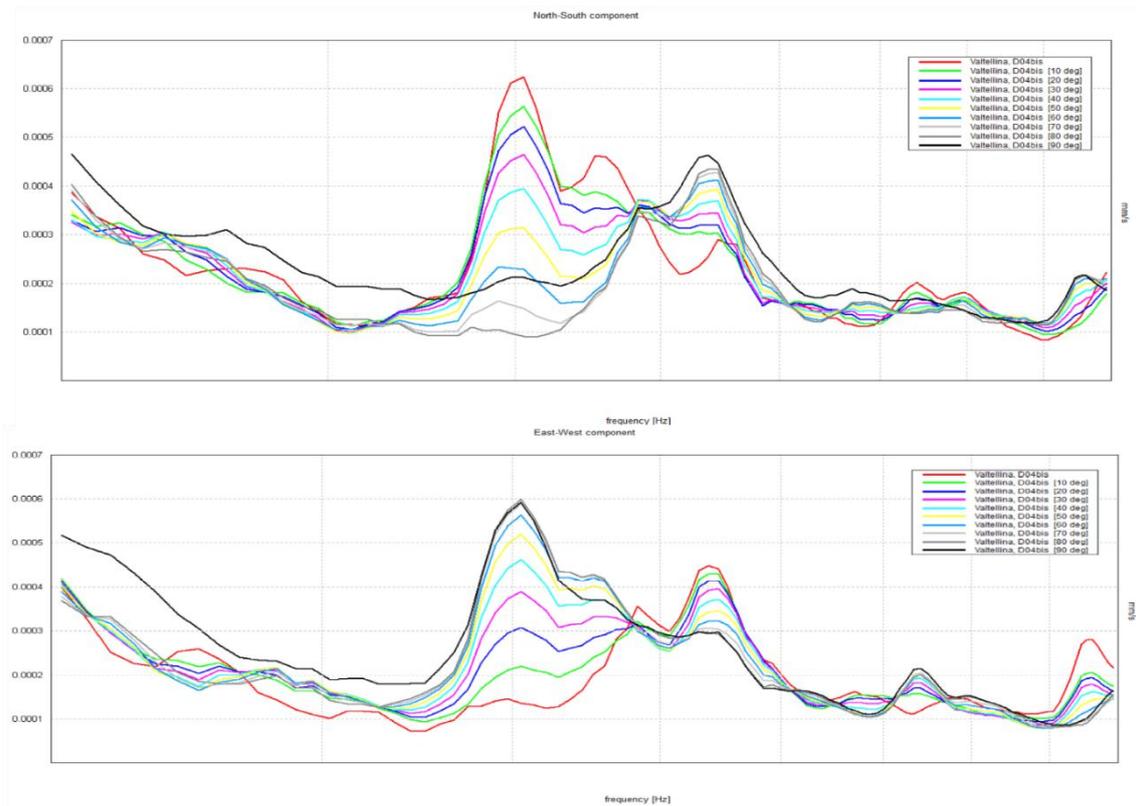
è stato possibile continuare ad utilizzare le tracce originarie non ruotate nel resto dell'analisi.



**Figura 38:** Confronto tra tutte le tracce ruotate della misura A05 acquisita a centro-valle, per la sezione A. Il confronto serve all'identificazione delle direzioni principali di vibrazione.



**Figura 39:** Confronto tra tutte le tracce ruotate della misura B05 acquisita a centro-valle, per la sezione B. Il confronto serve all'identificazione delle direzioni principali di vibrazione.



**Figura 40:** Confronto tra tutte le tracce ruotate della misura D04bis acquisita a centro-valle, per la sezione D. Il confronto serve all'identificazione delle direzioni principali di vibrazione.

Quanto concluso conferma le attese: le sezioni A, B e D, infatti, mostrano la stessa orientazione (trasversale rispetto al lato lungo della Valtellina) anche dal punto di vista geografico (Figura 21 e Figura 22).

Una volta determinata la giusta direzione del moto, si è proseguito nello studio dei dati sperimentali costruendo una tabella (per ciascuna sezione) con le frequenze dei modi di vibrare nella sezione di misura, determinate dagli spettri di ampiezza (Tabella 7, Tabella 8, Tabella 9). Sono stati identificati i modi  $L_1$ ,  $T_1$  e, dove possibile,  $L_2$ . Si noti che non è stato possibile determinare con sufficiente sicurezza i modi di vibrare per ciascun punto di misura di ogni sezione, a causa di alcuni disturbi nel segnale. Questo, in aggiunta alle acquisizioni effettuate su *bedrock* (su cui il moto non è osservabile), ha determinato che siano stati utilizzati pochi punti di misura tra tutti quelli acquisiti (sei punti per la sezione A e B; cinque punti per la sezione D) ma comunque in numero sufficiente da consentire la costruzione dei grafici delle deformate modali per ogni modo (Figura 48, Figura 49, Figura 50).

L'utilità della costruzione delle forme modali risiede nella possibilità di condurre una valutazione qualitativa della dinamica della valle, in corrispondenza delle sezioni su cui sono state effettuate le misure: esse rappresentano, infatti, la deformazione del bacino, generata dalla vibrazione per micro-tremore sismico, per i modi  $L_1$ ,  $L_2$  e  $T_1$

Sotto l'ipotesi di sorgente stazionaria, la ricostruzione delle forme modali non richiede l'utilizzo di misure sincronizzate: osservare i picchi di ampiezza negli spettri di spostamento (o di velocità, nel nostro caso) è sufficiente per ricostruire il valore assoluto delle forme modali (Castellaro e Isani, 2019). Per chiarire questo punto, citiamo il lavoro di Sgattoni e Castellaro (2020): *“La valutazione della fase delle forme modali necessita di almeno due strumenti, ma ciò è richiesto soltanto per i modi superiori (il modo fondamentale ha per definizione la stessa fase in tutti i punti) e, quando sono disponibili più misure, è piuttosto facile valutare i nodi di spostamento e dedurre i cambiamenti di fase nelle deformazioni acquisite anche con un solo strumento. L'aspetto pratico più delicato nella ricostruzione delle forme modali è la stazionarietà della funzione livello di rumore/eccitazione. Poiché nel caso 2-D siamo normalmente interessati a frequenze piuttosto basse, la principale sorgente di rumore ambientale al di sotto di 1 Hz è quella atmosferica (Gutenberg 1931, 1947, 1958). Se le registrazioni vengono acquisite nelle stesse condizioni meteorologiche (preferibilmente nello stesso giorno) questa condizione è normalmente soddisfatta”*. Nel nostro caso, le acquisizioni lungo ciascuna sezione sono

state acquisite nell'arco di poche ore, per un totale di tre giorni, e in condizioni meteo stabili. Si può quindi ritenere soddisfatta la condizione di sorgente stazionaria.

**Tabella 7:** Frequenze dei modi di vibrare per i punti di misura della sezione A. Sono escluse le acquisizioni su *bedrock* e i segnali troppo disturbati.

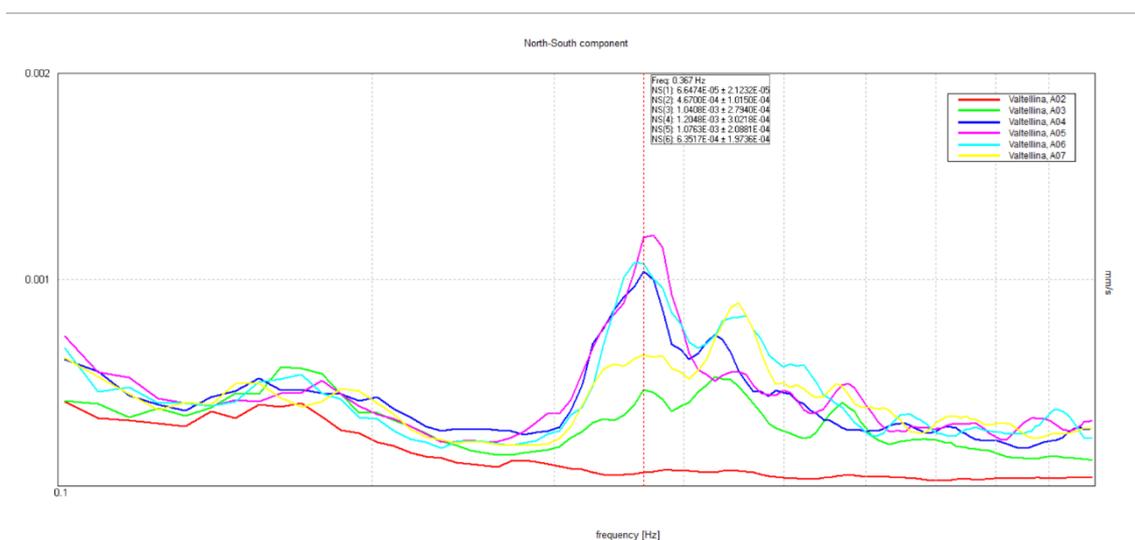
MISURE	L <sub>1</sub> [Hz]	T <sub>1</sub> [Hz]	L <sub>2</sub> [Hz]	T <sub>1</sub> /L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub> /L <sub>1</sub>
<b>A02</b>	0.217	0.324		1.493	
<b>A03</b>	0.368	0.413	0.431	1.122	1.171
<b>A04</b>	0.367	0.414	0.43	1.128	1.172
<b>A05</b>	0.372	0.405		1.089	
<b>A06</b>	0.358	0.412	0.438	1.151	1.223
<b>A07</b>	0.361	0.413		1.144	

**Tabella 8:** Frequenze dei modi di vibrare per i punti di misura della sezione B. Sono escluse le acquisizioni su *bedrock* e i segnali troppo disturbati.

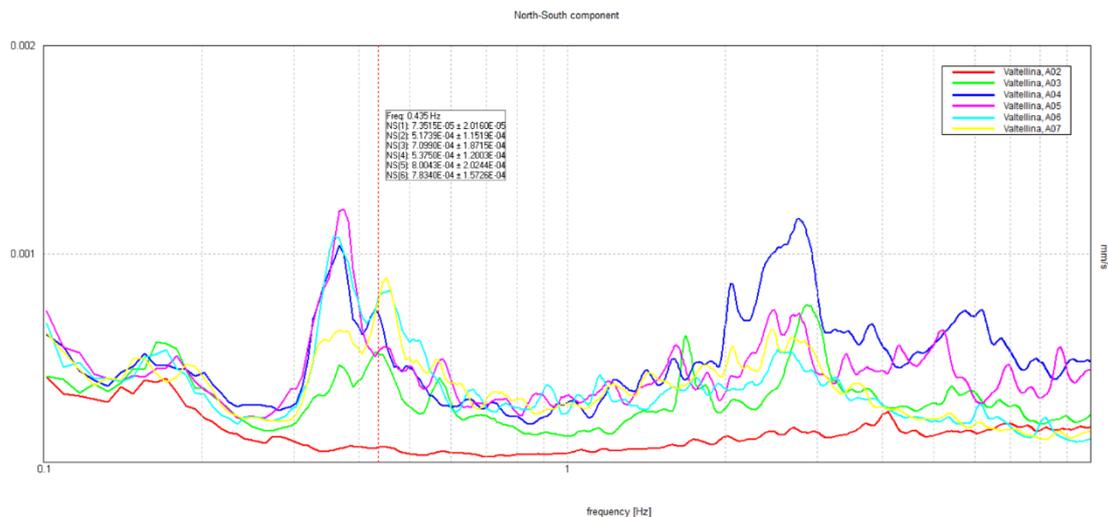
MISURE	L <sub>1</sub> [Hz]	T <sub>1</sub> [Hz]	T <sub>1</sub> /L <sub>1</sub>
<b>B03</b>	0.365	0.458	1.255
<b>B04</b>	0.361	0.452	1.252
<b>B05</b>	0.367	0.461	1.256
<b>B06</b>	0.367	0.469	1.278
<b>B07</b>	0.358	0.437	1.221
<b>B13</b>	0.365	0.421	1.153

**Tabella 9:** Frequenze dei modi di vibrare per i punti di misura della sezione D. Sono escluse le acquisizioni su *bedrock* e i segnali troppo disturbati.

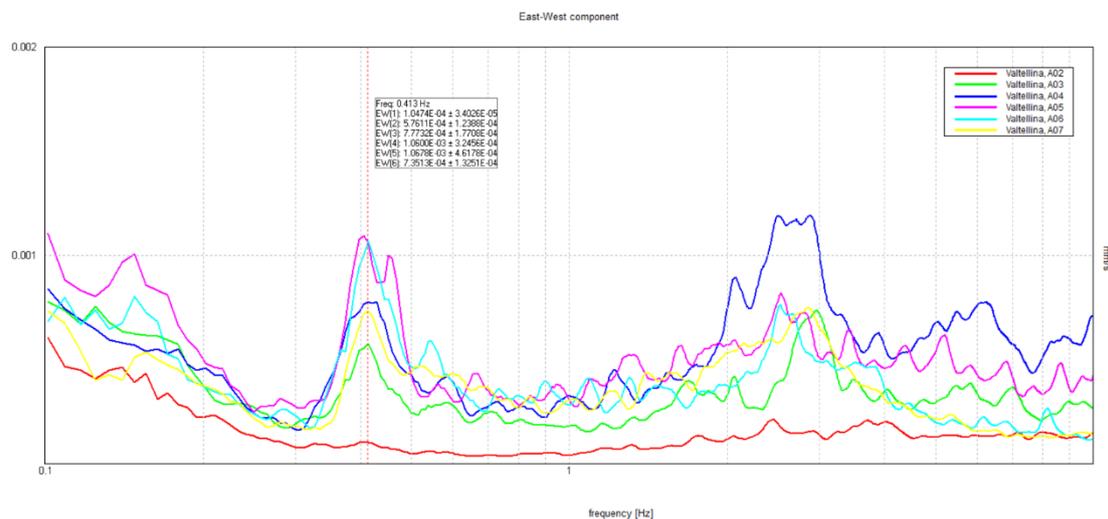
MISURE	$L_1$ [Hz]	$T_1$ [Hz]	$T_1/L_1$
<b>D03bis</b>	0.395	0.522	1.322
<b>D03</b>	0.395	0.542	1.372
<b>D04bis</b>	0.405	0.542	1.338
<b>D05</b>	0.409	0.537	1.313
<b>D06</b>	0.406	0.525	1.293



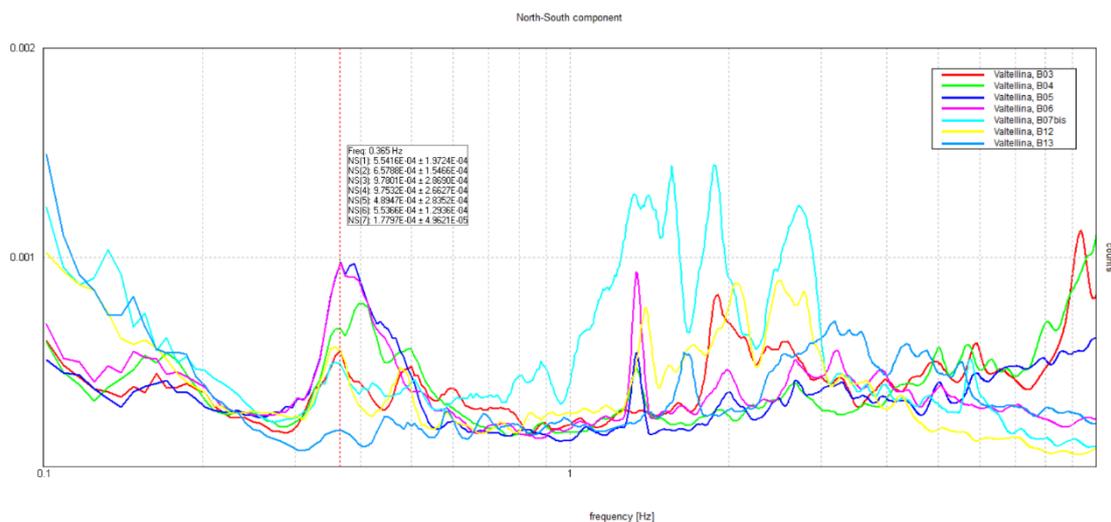
**Figura 41:** Spettri di ampiezza della componente orizzontale longitudinale della sezione A. In ascissa viene identificato il modo  $L_1 = 0.367$  Hz [*L'ordine di grandezza delle incertezze è scritto nella figura*]; in ordinata viene mostrata la velocità del moto del terreno [mm/s] indotto dal micro-tremore sismico, in corrispondenza dei punti di misura lungo la sezione.



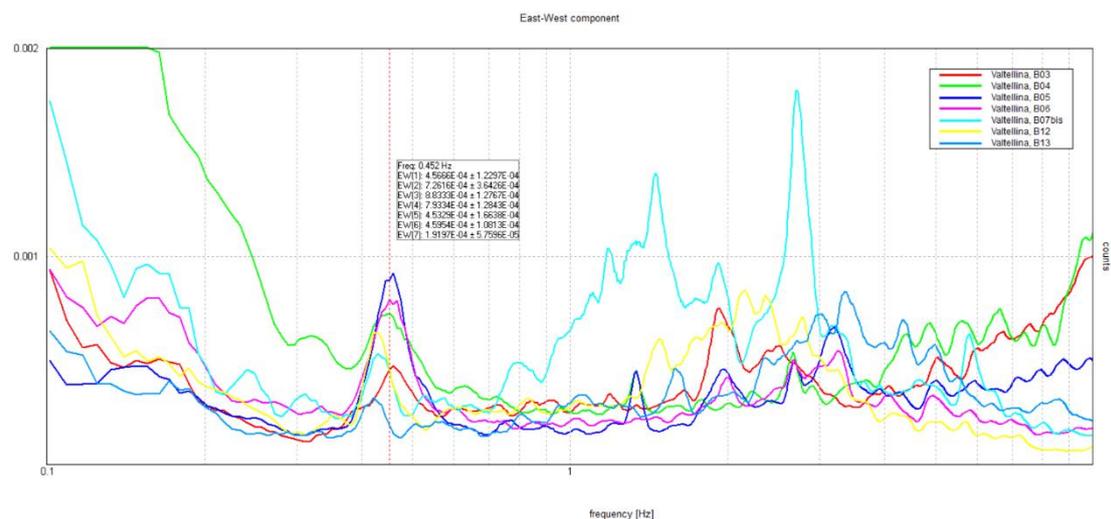
**Figura 42:** Spettri di ampiezza della componente orizzontale longitudinale della sezione A. In ascissa viene identificato il modo  $L_2 = 0.435$  Hz [*L'ordine di grandezza delle incertezze è scritto nella figura*]; in ordinata viene mostrata la velocità del moto del terreno [mm/s] indotto dal micro-tremore sismico, in corrispondenza dei punti di misura lungo la sezione.



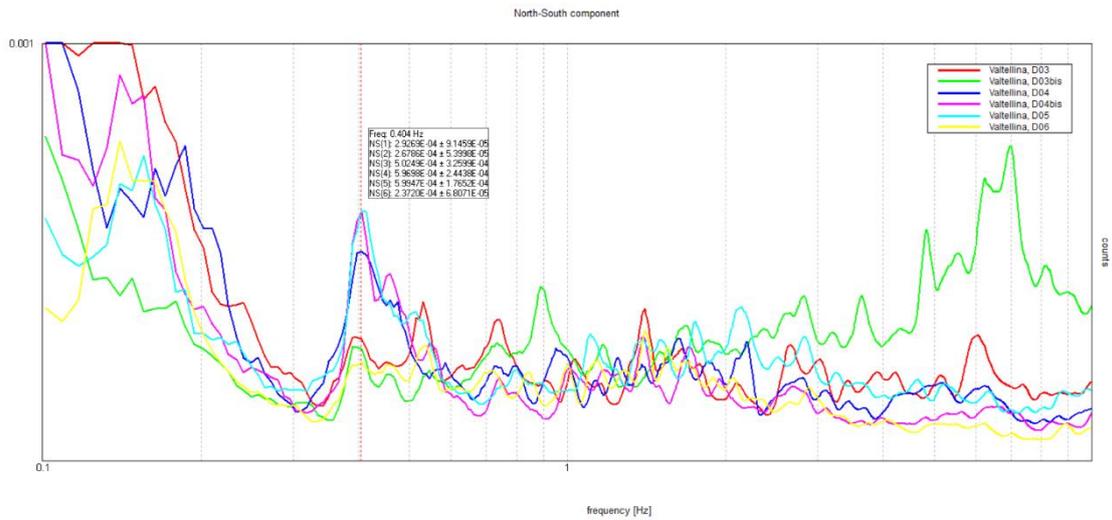
**Figura 43:** Spettri di ampiezza della componente orizzontale trasversale della sezione A. In ascissa viene identificato il modo  $T_1 = 0.413$  Hz [*L'ordine di grandezza delle incertezze è scritto nella figura*]; in ordinata viene mostrata la velocità del moto del terreno [mm/s] indotto dal micro-tremore sismico, in corrispondenza dei punti di misura lungo la sezione.



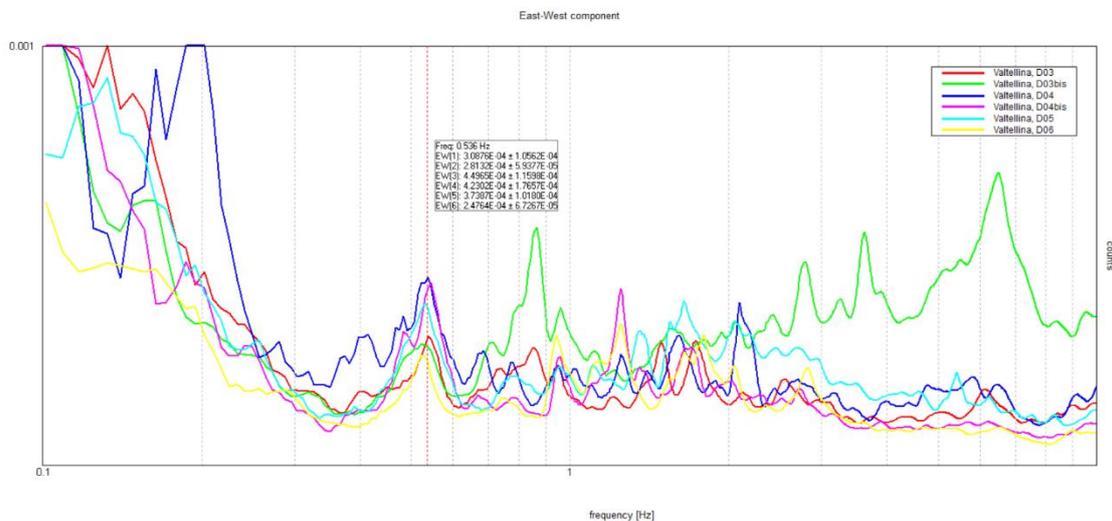
**Figura 44:** Spettri di ampiezza della componente orizzontale longitudinale della sezione B. In ascissa viene identificato il modo  $L_1 = 0.365$  Hz [*L'ordine di grandezza delle incertezze è scritto nella figura*]; in ordinata viene mostrata la velocità del moto del terreno [mm/s] indotto dal micro-tremore sismico, in corrispondenza dei punti di misura lungo la sezione.



**Figura 45:** Spettri di ampiezza della componente orizzontale trasversale della sezione B. In ascissa viene identificato il modo  $T_1 = 0.452$  Hz [*L'ordine di grandezza delle incertezze è scritto nella figura*]; in ordinata viene mostrata la velocità del moto del terreno [mm/s] indotto dal micro-tremore sismico, in corrispondenza dei punti di misura lungo la sezione.



**Figura 46:** Spettri di ampiezza della componente orizzontale longitudinale della sezione D. In ascissa viene identificato il modo  $L_1 = 0.404$  Hz [L'ordine di grandezza delle incertezze è scritto nella figura]; in ordinata viene mostrata la velocità del moto del terreno [mm/s] indotto dal micro-tremore sismico, in corrispondenza dei punti di misura lungo la sezione.



**Figura 47:** Spettri di ampiezza della componente orizzontale longitudinale della sezione D. In ascissa viene identificato il modo  $T_1 = 0.536$  Hz [L'ordine di grandezza delle incertezze è scritto nella figura]; in ordinata viene mostrata la velocità del moto del terreno [mm/s] indotto dal micro-tremore sismico, in corrispondenza dei punti di misura lungo la sezione.

**Tabella 10:** Velocità del moto del terreno per i modi  $L_1 = 0.367$  Hz;  $L_2 = 0.435$  Hz;  $T_1 = 0.413$  Hz (sezione A). I punti di misura vengono riportati insieme alla loro distanza relativa (x).

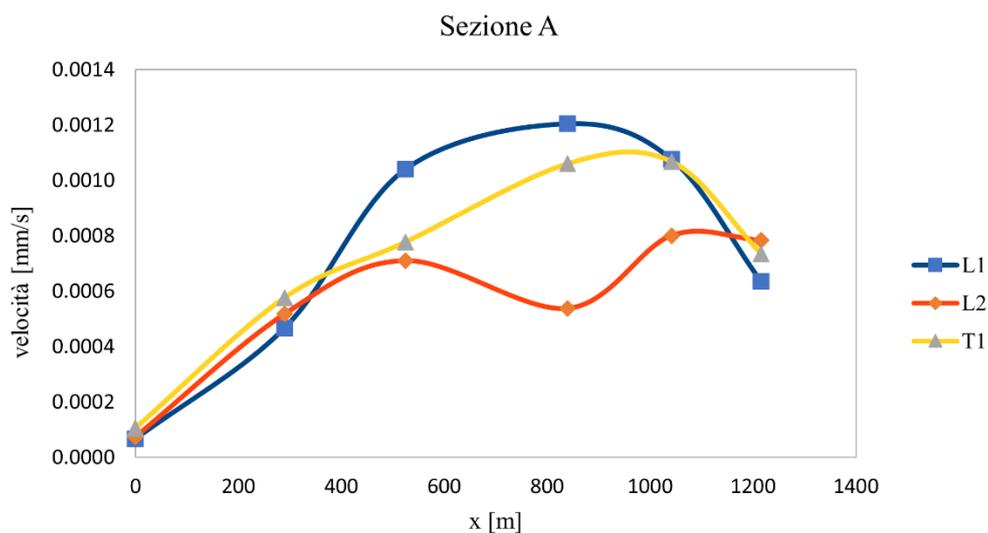
MISURE	x [m]	Velocità $L_1$ [mm/s]	Velocità $T_1$ [mm/s]	Velocità $L_2$ [mm/s]
<b>A02</b>	0	0.000066474	0.00010474	0.000073515
<b>A03</b>	290	0.000467	0.00057611	0.00051739
<b>A04</b>	525	0.0010408	0.00077732	0.0007099
<b>A05</b>	840	0.0012048	0.00106	0.0005375
<b>A06</b>	1042	0.0010763	0.0010678	0.00080043

**Tabella 11:** Velocità del moto del terreno per i modi  $L_1 = 0.365$  Hz;  $T_1 = 0.452$  Hz (sezione B). I punti di misura vengono riportati insieme alla loro distanza relativa (x).

MISURE	x [m]	Velocità $L_1$ [mm/s]	Velocità $T_1$ [mm/s]
<b>B03</b>	0	0.00055416	0.00045666
<b>B04</b>	150	0.00065788	0.00072616
<b>B05</b>	392	0.00097801	0.00088333
<b>B06</b>	631	0.00097532	0.00079334
<b>B07</b>	830	0.00048947	0.00045329

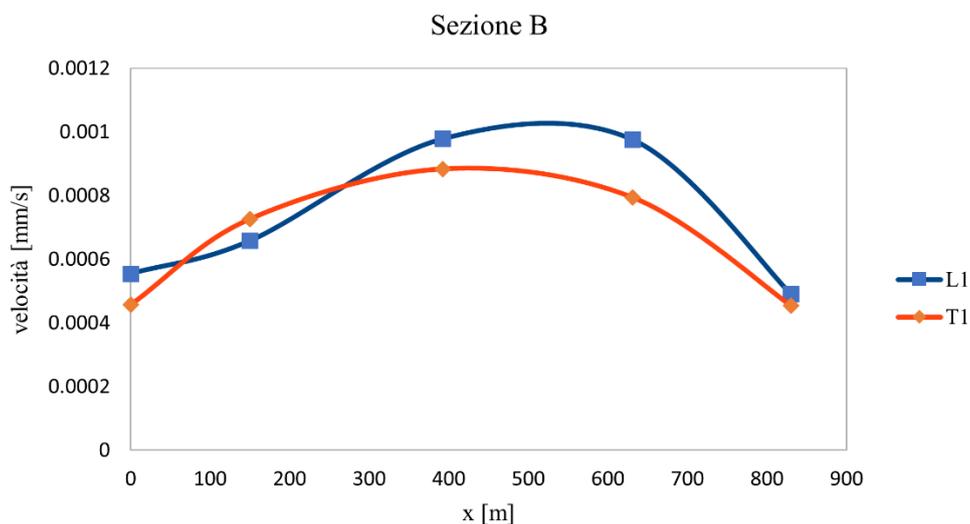
**Tabella 12:** Velocità del moto del terreno per i modi  $L_1 = 0.404$  Hz;  $T_1 = 0.536$  Hz (sezione D). I punti di misura vengono riportati insieme alla loro distanza relativa (x).

<b>MISURE</b>	<b>x [m]</b>	<b>Velocità <math>L_1</math> [mm/s]</b>	<b>Velocità <math>T_1</math> [mm/s]</b>
<b>D03bis</b>	0	0.00026786	0.00028132
<b>D03</b>	27	0.00029269	0.00030876
<b>D04bis</b>	303	0.00059698	0.00042302
<b>D05</b>	640	0.00059947	0.00037387
<b>D06</b>	907	0.0002372	0.00024764

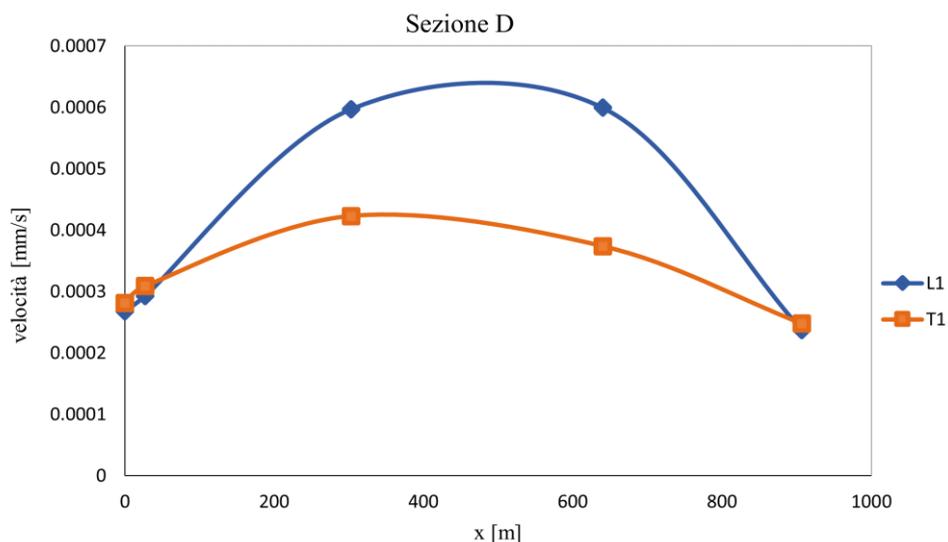


**Figura 48:** Forma modale della sezione A, riferita ai modi  $L_1 = 0.350$  Hz,  $L_2 = 0.435$  Hz e  $T_1 = 0.413$  Hz. I punti di misura e i valori della velocità del moto sono riportati in

Tabella 10.



**Figura 49:** Forma modale della sezione B, riferita ai modi  $L_1 = 0.365$  Hz e  $T_1 = 0.452$  Hz. I punti di misura e i valori della velocità del moto sono riportati in Tabella 11.



**Figura 50:** Forma modale della sezione D, riferita ai modi  $L_1 = 0.404$  Hz e  $T_1 = 0.536$  Hz. I punti di misura e i valori della velocità del moto sono riportati in

Tabella 12.

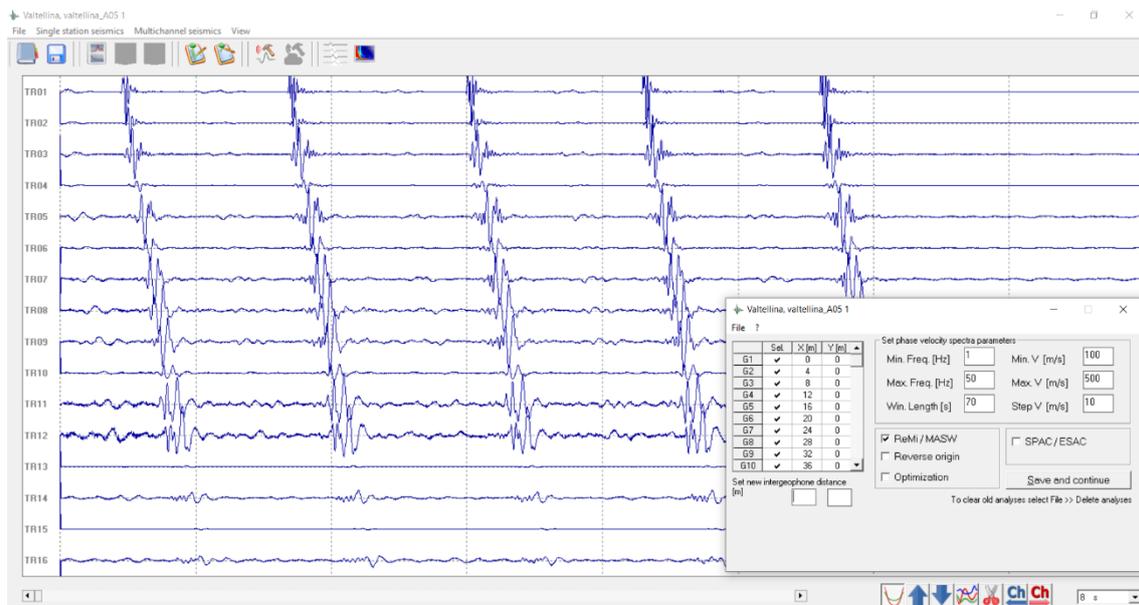
Dall'osservazione delle forme modali, possiamo notare come il massimo spostamento indotto dal modo fondamentale longitudinale ( $L_1$ ) avvenga effettivamente nella parte centrale della valle; il primo modo superiore longitudinale ( $L_2$ ) interessa un terzo o due terzi della valle e il modo fondamentale trasversale ( $T_1$ ) è massimo in corrispondenza di un quarto e tre quarti dell'ampiezza del bacino.

Le forme modali, infine, rispecchiano quanto predetto dai modelli numerici (Figura 3). Risulta, inoltre, evidente dagli stessi grafici come il moto si attenui in corrispondenza dei bordi della valle: il moto non si annulla completamente nei grafici di Figura 48, Figura 49 e Figura 50 a causa del fatto che non sono stati rappresentati i valori di riferimento per le misure sul *bedrock*. Per la sezione A è stato indentificato anche il modo superiore  $L_2$ , che è facilmente riconoscibile in Figura 49.

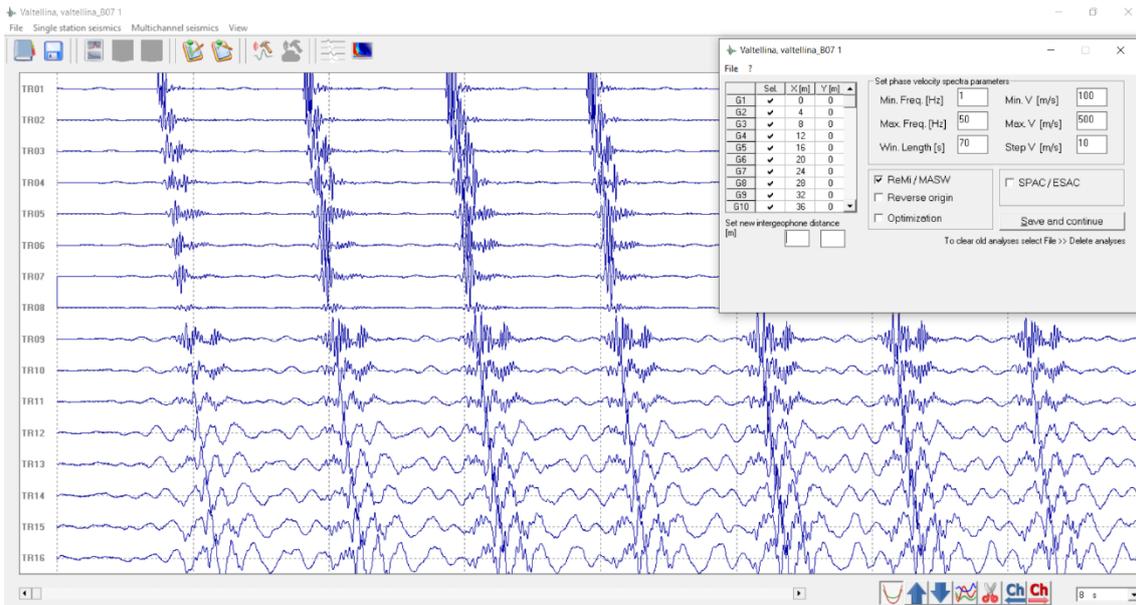
### 4.1.1 Elaborazione della MASW

Riportiamo ora brevemente i risultati dell'analisi dei dati acquisiti dalla prova multicanale a onde di superficie. L'esecuzione di questa prova si è resa necessaria per poter effettuare l'analisi a *contour* che descriveremo nel prossimo paragrafo. La tecnica si basa sull'utilizzo delle onde superficiali di Rayleigh, registrate da una serie di geofoni a bassa frequenza e polarizzazione verticale, collegati insieme lungo uno stendimento rettilineo e permette stimare dei profili di velocità delle onde di taglio ( $V_s$ ) nei terreni a partire dalla velocità delle onde di superficie. L'analisi dei dati sperimentali si basa sulle operazioni di *slant-stack* e trasformata di Fourier;; i parametri che è necessario impostare nel programma riguardano la frequenza minima e massima di indagine, la velocità minima e massima di indagine, la larghezza delle finestre in cui suddividere il segnale e l'intervallo di velocità entro cui eseguire l'analisi (Figura 51, Figura 52, Figura 53).

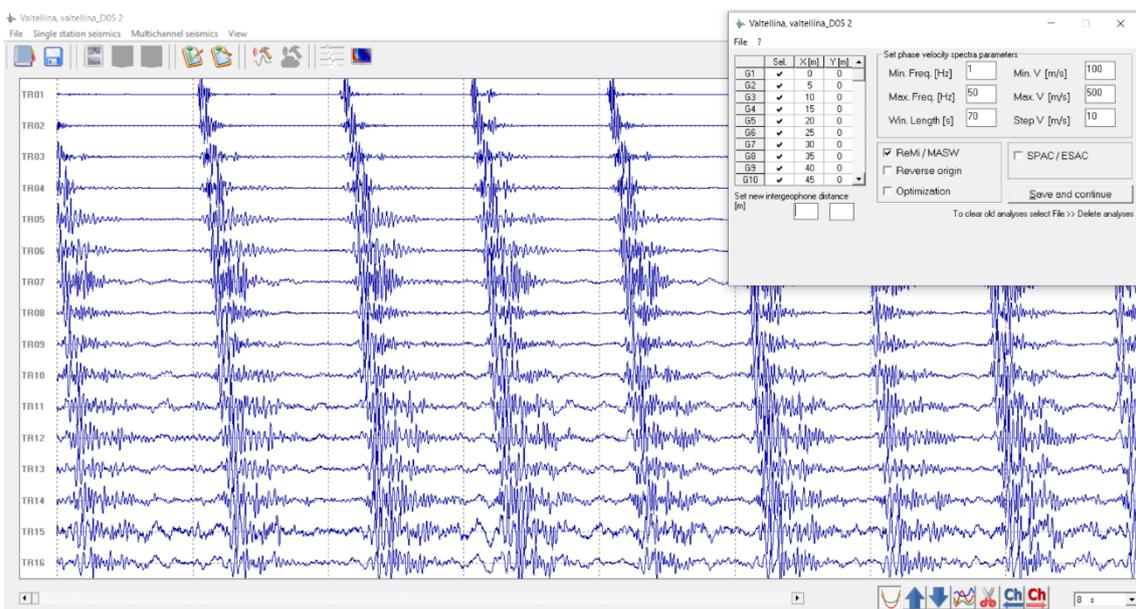
Si riportano i grafici degli spettri di velocità di fase delle onde R (Figura 54, Figura 55, Figura 56), da cui sono state ottenute le curve di dispersione e i profili di velocità delle onde S per la sezione principale A.



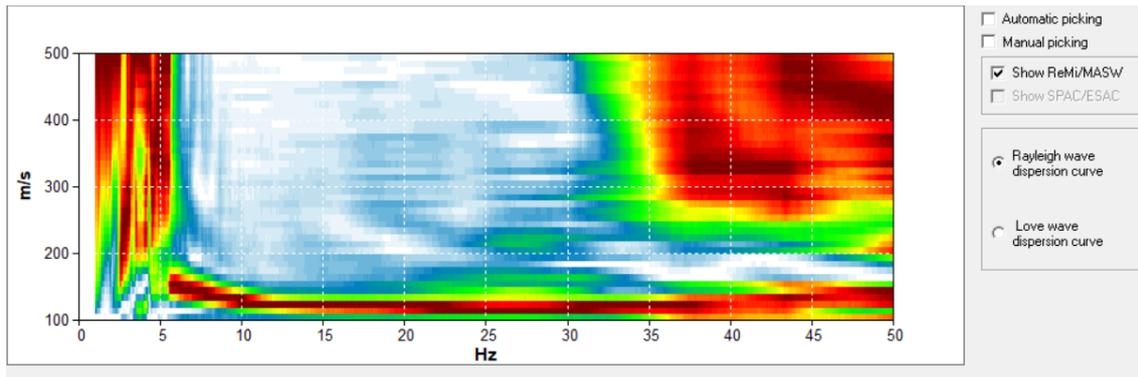
**Figura 51:** Tracce normalizzate e parametri per l'analisi dei dati acquisiti attraverso la prova multicanale in prossimità del punto di misura A05 (sezione A). La spaziatura tra i geofoni è fissata a  $x = 4$  m.



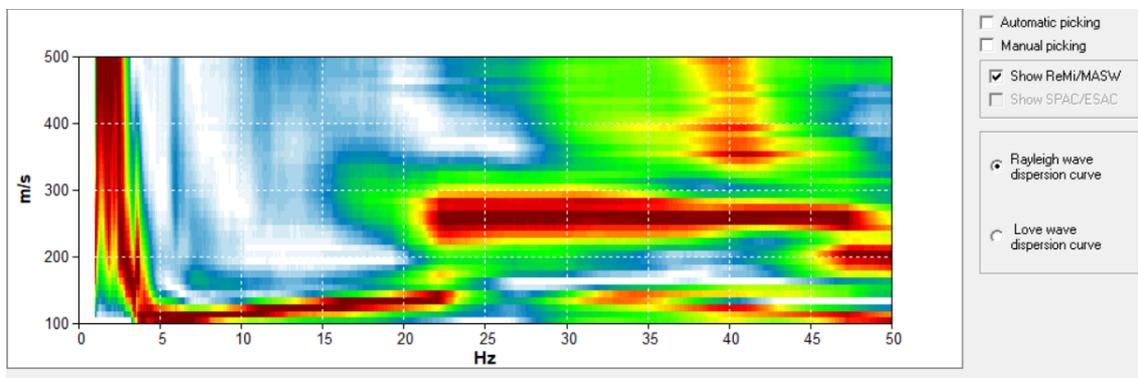
**Figura 52:** Tracce normalizzate e parametri per l'analisi dei dati acquisiti attraverso la prova multicanale in prossimità del punto di misura B07 (sezione B). La spaziatura tra i geofoni è fissata a  $x = 4$  m.



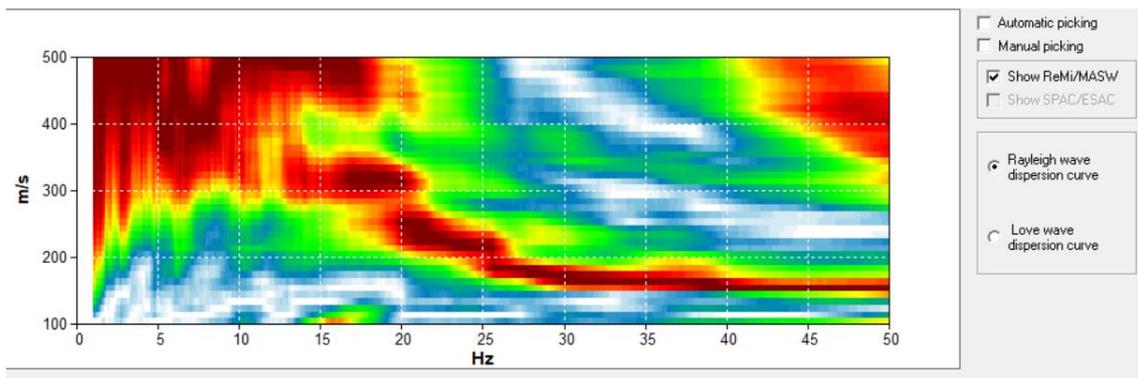
**Figura 53:** Tracce normalizzate e parametri per l'analisi dei dati acquisiti attraverso la prova multicanale in prossimità del punto di misura D05 (sezione D). La spaziatura tra i geofoni è fissata a  $x = 5$  m.



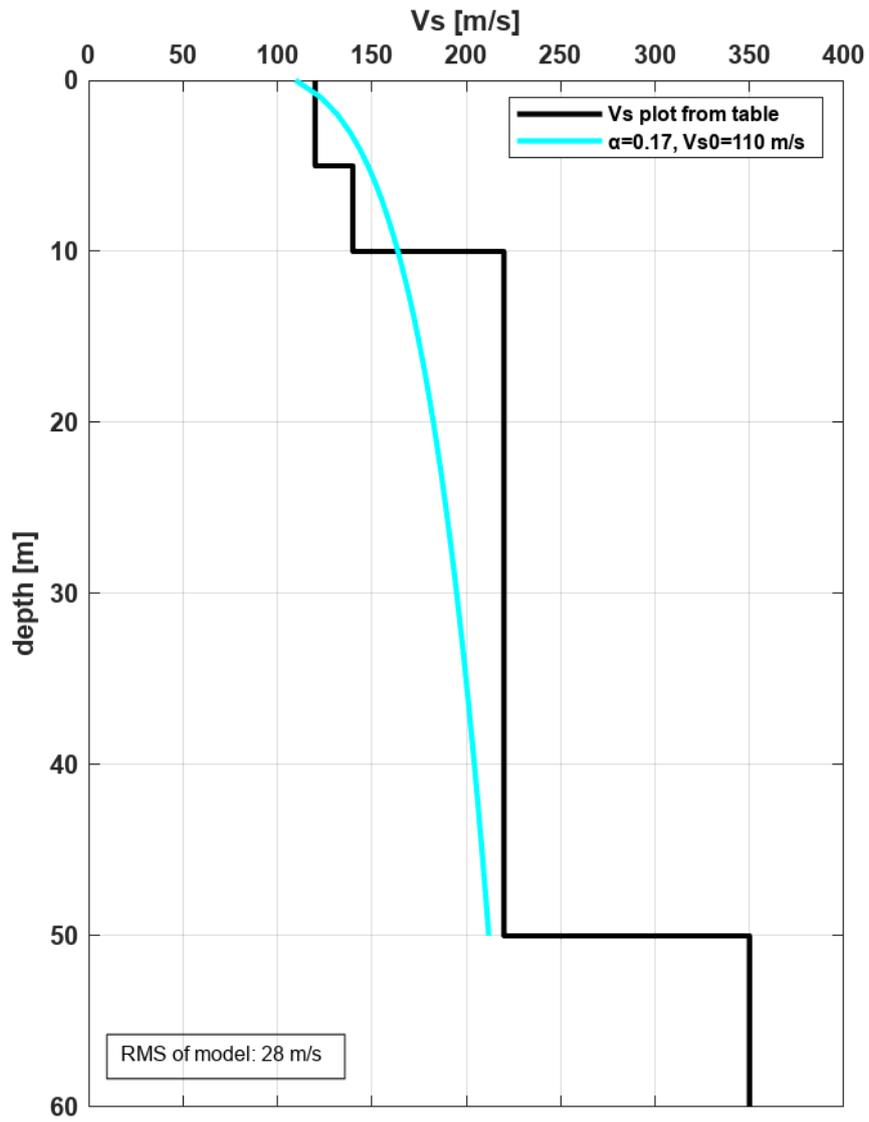
**Figura 54:** Spettro della velocità di fase delle componenti verticali delle onde di Rayleigh, da cui si ottiene la curva di dispersione per la prova multicanale relativa alla sezione A.



**Figura 55:** Spettro della velocità di fase delle componenti verticali delle onde di Rayleigh, da cui si ottiene la curva di dispersione per la prova multicanale relativa alla sezione B.



**Figura 56:** Spettro della velocità di fase delle componenti verticali delle onde di Rayleigh, da cui si ottiene la curva di dispersione per la prova multicanale relativa alla sezione D.



**Figura 57:** Profilo di velocità delle onde S negli strati di terreno fino al *bedrock*. (Sezione A).

## 4.2 Elaborazione con HeeVee

A questo punto abbiamo pensato fosse utile dare una visione di sintesi degli H/V acquisiti lungo le sezioni di Figura 22. Una visione di sintesi è per esempio data dal migrare le curve H/V dal dominio della frequenza a quello della profondità, trovare una legge di calibrazione che consenta tale migrazione e rappresentare l'andamento H/V-profondità per mezzo di grafici a *contour*.

Per questi scopi abbiamo impiegato il software HeeVee (MoHo s.r.l.) che permette di:

1. Creare grafici di *contour* del rapporto spettrale H/V del micro-tremore sismico nel caso 1D.
2. Interpretare gli spettri orizzontali (H) e verticali (V) di micro-tremore, nel caso 2D.
3. Creare dei grafici di *contour* dei profili di velocità  $V_S$  e  $V_P$ .

È indispensabile che le curve H/V che vengono processate con HeeVee siano prima analizzate e che da esse siano rimossi tutti i transienti che disturbano il segnale.

L'operazione di *contour* consiste prima di tutto nel migrare le curve H/V dal dominio della frequenza a quello della profondità (questo è possibile attraverso i profili di velocità ricavati per ogni sezione con le prove MASW), poi nell'associare alle curve H/V una scala cromatica per rappresentare e interpolare le ampiezze dei picchi (blu per l'ampiezza minore, rosso per l'ampiezza massima).

Consideriamo un bacino sedimentario reale, di cui vogliamo conoscere la stratigrafia per mezzo della tecnica H/V e proviamo ad applicare il metodo del *contour* alle curve H/V.

Le considerazioni effettuate di seguito si basano su quanto riportato in “*HeeVee user's manual*” (2023).

### 4.2.1 *Contouring H/V nel caso 1D*

Nel caso 1D, sappiamo che ogni picco H/V è legato alla presenza delle onde di superficie e rappresenta un contrasto di impedenza; pertanto, il *contouring* permette di visualizzare il contrasto tra strato duro e strato tenero. I diversi colori mostrati nel grafico del *contour* (Figura 60, Figura 67, Figura 75) non mostreranno l'andamento delle velocità  $V_S$  o  $V_P$  (come in una tomografia sismica), ma rappresenteranno la geometria del riflettore sismico.

Per tracciare graficamente l'andamento del riflettore sismico, è necessario convertire le curve H/V (nel dominio della frequenza) in curve nel dominio della profondità, secondo il procedimento già esposto per il software Grilla® (pag. 45): in questo modo viene prodotto un grafico come quello in Figura 67.

Tramite l'Equazione 4 della risonanza, poi, è possibile calcolare lo spessore  $h$  dello strato dei sedimenti, se è noto un profilo di  $V_S$  per il terreno.

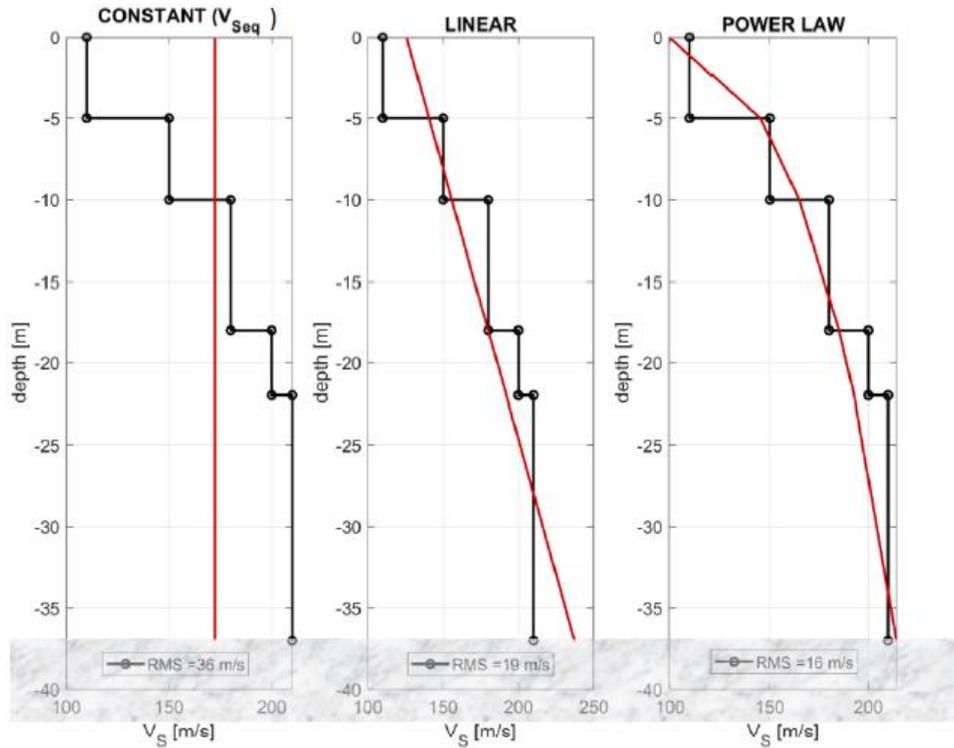
Nel caso più semplice, la velocità è assunta costante all'interno dello strato morbido. In tutti gli altri casi bisogna considerare la dipendenza di  $V_S$  dalla profondità  $h$ , per cui l'Equazione 4 diventa:

Equazione 7:

$$h = \frac{V_S(h)}{4f_0}$$

L'inversione è semplice anche nel caso in cui l'andamento di  $V_S$  con la profondità sia lineare o a legge di potenza (Figura 58).

In generale, se lungo una sezione sono attesi andamenti diversi di rigidità dei terreni, è possibile adottare profili di velocità delle onde di taglio diversi lungo la sezione analizzata.



**Figura 58:** Profili di velocità equivalente costanti (delle onde di taglio), lineari o a legge di potenza proposti dal software HeeVee come miglior fit al profilo stratigrafico evidenziato tra tratti in nero.

Un punto di forza dell'analisi con *contour* nel caso 1D riguarda la gestione delle ampiezze dei picchi H/V: in alcuni casi, infatti, per motivi di visualizzazione può essere conveniente enfatizzare solo alcuni contrasti di impedenza rispetto ad altri, oppure dare la stessa enfasi a tutti i picchi.

A questo scopo è possibile, ed il software le mette a disposizione, applicare funzioni specifiche:

- Per dare lo stesso peso a tutti i picchi H/V:  $\log_{10}(H/V)$ .
- Per enfatizzare solo il riflettore con la massima ampiezza:  $(H/V)^n$ , con  $n > 1$ : all'aumentare di  $n$ , aumenta il peso assegnato al picco massimo rispetto agli altri.

Quando la profondità di un riflettore cambia molto lungo una sezione può essere utile normalizzare l'ampiezza della curva H/V (o delle sue funzioni) prima delle *contourizzazioni*: l'ampiezza dei picchi H/V, infatti, tende a diminuire scendendo in profondità (alle basse frequenze), a causa di una diminuzione del contrasto d'impedenza. In questi casi, è possibile utilizzare la funzione di normalizzazione messa a disposizione dal software, che garantisce maggiore continuità visiva agli stessi riflettori tra diverse

tracce. Il processo di normalizzazione consiste nel dividere tutti i dati per il loro valore massimo, così da limitare l'intervallo di ampiezza dei picchi H/V tra [0,1]. Nel caso di un bacino sedimentario, per esempio, la normalizzazione consente di visualizzare il contatto tra il *bedrock* e i sedimenti che avviene superficialmente con lo stesso colore di un contatto che avviene in profondità. In ogni caso, particolare attenzione va posta quando viene applicata la normalizzazione, perché è perso il significato di vera ampiezza dei picchi.

#### **4.2.1 Contouring H e V nel caso 2D**

In condizioni 2D, l'H/V non può più riprodurre l'andamento dei riflettori, perché la vera risonanza delle onde di volume diventa dominante rispetto alle onde di superficie ed essa è unica per tutta la sezione trasversale indagata. Questa condizione risulta evidente osservando gli spettri orizzontali delle singole componenti del moto, in cui sono presenti picchi a frequenze diverse e con ampiezza differente (Figura 2). In questi casi, non è più possibile ottenere informazioni dal grafico della curva H/V, ma bisogna ricondursi allo studio delle singole componenti spettrali.

Il software HeeVee implementa l'approccio basato sul rapporto tra le frequenze modali trasversali e longitudinali, descritto nel Capitolo 1 (noi considereremo solamente i rapporti  $T_1/L_1$ ,  $L_2/L_1$ ). Il programma permette di inserire manualmente i valori di frequenza modale riconosciuti sugli spettri, oppure di eseguire il *picking* dei picchi spettrali direttamente tramite il software (Figura 62). Il numero minimo di frequenze modali necessarie per eseguire un'interpretazione 2D sono due: il primo modo longitudinale ( $L_1$ ) e il primo modo trasversale ( $T_1$ ).

Il passaggio finale per accedere all'interpretazione 2D consiste nell'impostare la larghezza del bacino in corrispondenza della sezione su cui sono state acquisite le misure di micro-tremore: in questo modo è possibile trovare la profondità massima  $h_{max}$  del bacino.

A prescindere dal tipo di interpretazione che viene effettuata (1D o 2D), degna di nota è la possibilità di caricare sul programma le coordinate relative alle diverse curve H/V analizzate: in questo modo verrà prodotta una finestra in cui è mostrata una mappa satellitare delle sezioni analizzate, con la localizzazione precisa di tutti i punti acquisiti.

Le coordinate dei punti possono essere fornite in termini di latitudine e longitudine (in gradi) e di elevazione sul livello del mare (in [m]). In caso in cui non siano disponibili le informazioni sulla posizione, le curve H/V possono comunque essere rappresentate a una distanza uniforme convenzionale.

#### **4.2.3 Contouring dei dati sperimentali della Valtellina**

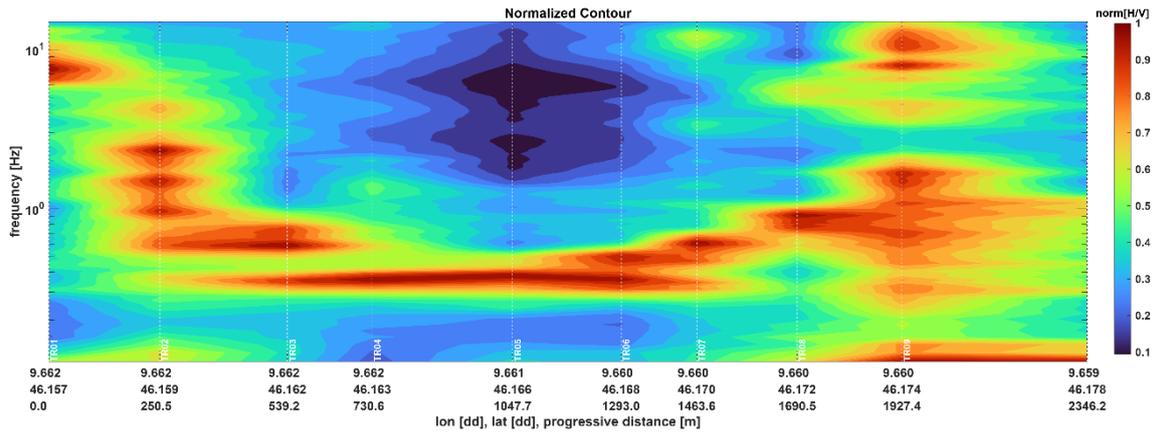
Cominciamo ora la descrizione dell'analisi dei grafici di *contour* del rapporto spettrale H/V relativo al micro-tremore sismico acquisito lungo le tre sezioni A, B, D della Valtellina.

Le curve H/V, già pulite e quindi con deviazione standard ridotta, sono state caricate sul programma HeeVee insieme alle coordinate di ciascun punto di misura delle tre sezioni (le coordinate sono disponibili in Appendice). Questo ha permesso di generare le mappe satellitari di Figura 81, Figura 83 e Figura 85 e le immagini dei profili di elevazione lungo cui sono state acquisite le misure (Figura 82, Figura 84, Figura 86).

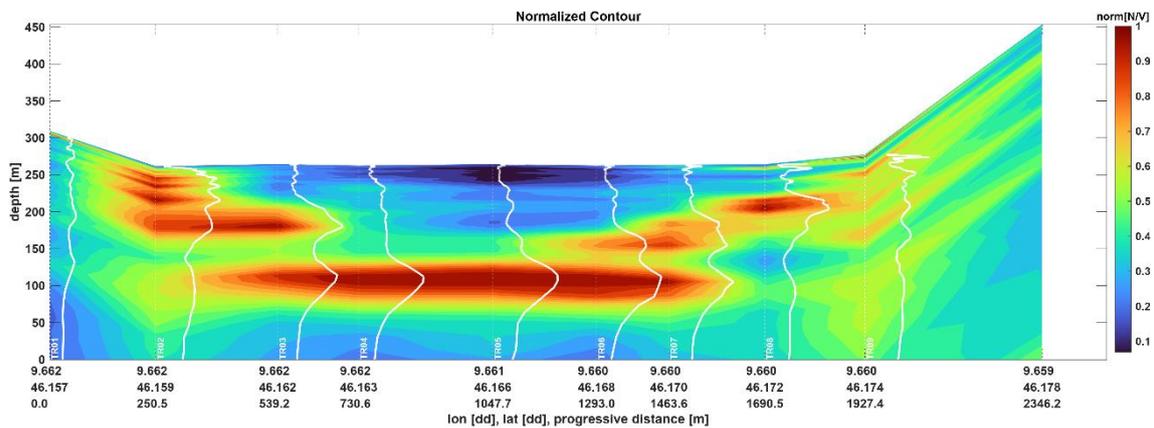
In prima analisi è stata tentata un'interpretazione 1D delle curve H/V, per provare a tracciare l'andamento dei riflettori nel sottosuolo in corrispondenza di ciascuna sezione. Successivamente, in seguito al fallimento di un approccio puramente 1D, si è passati all'analisi 2D degli spettri delle singole componenti del moto.

Riportiamo per esteso il procedimento seguito solamente per la sezione A; negli altri casi, data la somiglianza delle considerazioni effettuate, si riportano in maniera più sintetica direttamente i risultati ottenuti.

In Figura 59 è visibile il *contour* in frequenza delle curve H/V riferite ai punti di misura della sezione A, mentre in Figura 60 è possibile visualizzare le stesse curve in funzione della profondità.



**Figura 59:** *Contour* (normalizzato) in frequenza delle curve H/V per i punti di misura della sezione A. Il colore blu si riferisce alle frequenze H/V di minor ampiezza; il rosso alle frequenze relative ai massimi della curva H/V.

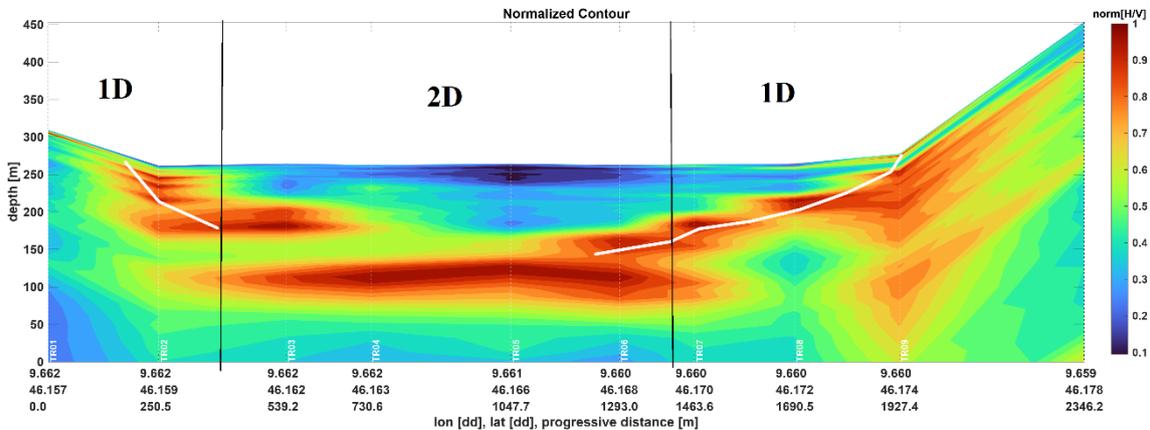


**Figura 60:** *Contour* (normalizzato) con le curve H/V rappresentate in funzione della profondità per i punti di misura della sezione A (è tenuto in conto anche il profilo altimetrico). Il colore blu si riferisce alla frequenza H/V di minor ampiezza; il rosso alle frequenze relative ai massimi della curva H/V. Sono visibili anche le curve H/V ruotate di 90° rispetto al solito (in bianco) e localizzate in corrispondenza dei punti in cui sono state acquisite le misure lungo la sezione.

Dai profili delle curve H/V si è potuto notare un chiaro spostamento delle frequenze dei picchi scendendo in profondità in corrispondenza dei bordi della sezione e andando verso il centro, e un chiaro assestamento attorno ad un valore che si mantiene pressoché costante nella parte centrale del bacino. È il tipico esempio di coesistenza di risonanze 1D e 2D all'interno dello stesso bacino sedimentario.

Provando a tracciare un profilo del riflettore nei punti in cui sono dominanti le risonanze 1D (Figura 61), è stato possibile intuire una certa asimmetria nella sezione A: si nota una

pendenza maggiore nelle misure di sinistra e una pendenza minore salendo verso destra (consideriamo la sinistra e la destra idrografiche).

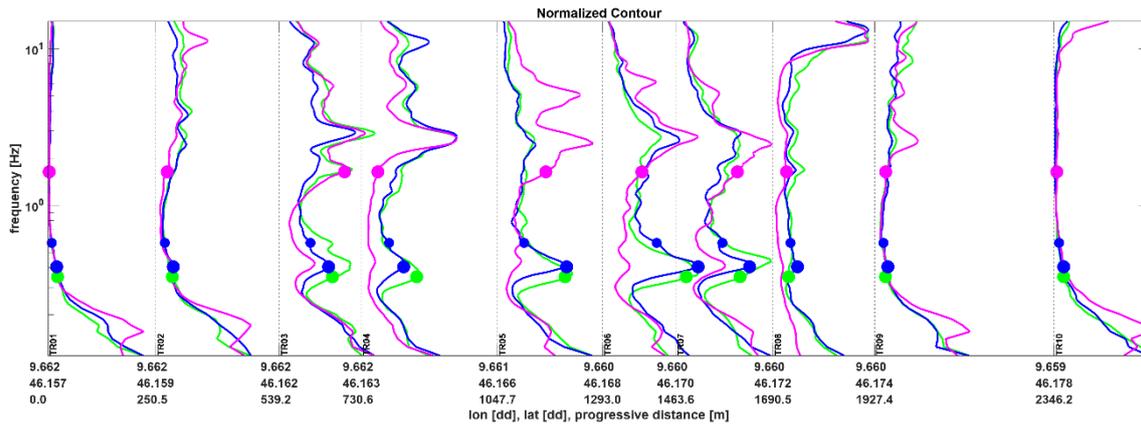


**Figura 61:** *Contour* (normalizzato) delle curve H/V in funzione della profondità la sezione A. La linea bianca traccia l'andamento del riflettore sismico seguendo i picchi di massima ampiezza (in rosso), fin dove è possibile l'interpretazione 1D.

Per poter analizzare il centro della sezione A, in cui sono dominanti le risonanze 2D, è stato necessario procedere con lo studio degli spettri delle singole componenti del moto per ciascun punto di misura (approccio 2D). In Figura 62 sono mostrati gli spettri di velocità delle tre componenti del moto per le misure acquisite lungo la sezione A e sono visibili i picchi in corrispondenza dei quali sono state individuate le frequenze dei modi di vibrare per la direzione longitudinale (L), trasversale (T) e verticale (V).

Notiamo che i picchi che individuano le frequenze 2D diventano naturalmente meno visibili avvicinandosi ai bordi della valle, che sono i nodi con spostamento zero.

Notiamo anche che, in corrispondenza del centro del bacino, il picco del modo fondamentale longitudinale (verde) ha sempre un'ampiezza maggiore rispetto al picco del modo trasversale (blu), in accordo con le considerazioni già fatte nel capitolo 1.1 sulla direzione di minor rigidità della valle; invece, avvicinandosi ai bordi, gli spettri nelle direzioni orizzontali diventano sempre più indistinguibili, rendendo possibile localmente l'interpretazione 1D.



**Figura 62:** Spettri di velocità delle singole componenti del moto per tutte le misure acquisite lungo la sezione A. I cerchi blu, verdi e viola identificano le frequenze dei modi di vibrare lungo le tre direzioni longitudinale (verde), trasversale (blu) e verticale (viola).

Dopo aver stabilito le frequenze dei modi principali di vibrare nelle tre direzioni del moto lungo questa sezione della Valtellina (Figura 63), è stato possibile passare al calcolo del rapporto  $T_1/L_1$ .

In Figura 64 sono riportati i grafici che rappresentano il rapporto  $T_1/L_1$  in funzione dell'*aspect ratio* per le diverse forme dei bacini.

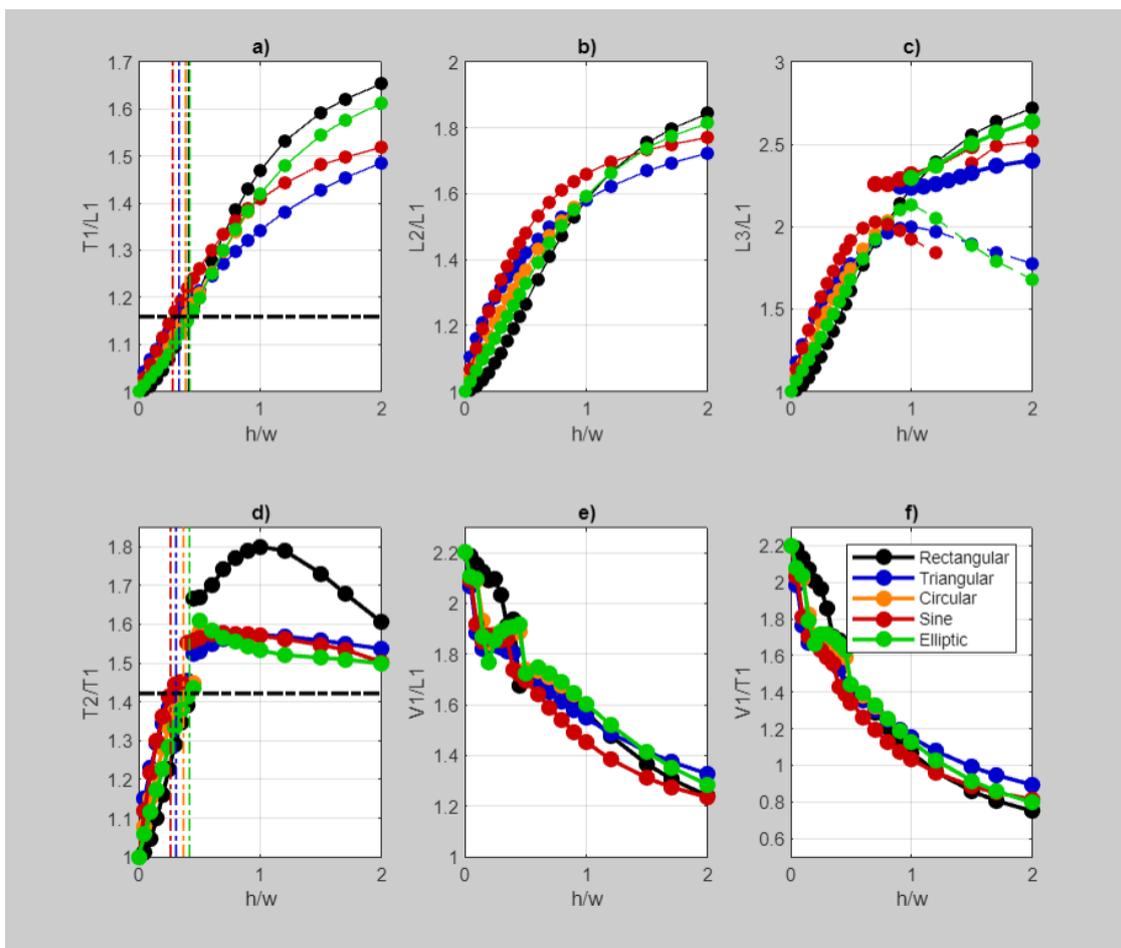
Infine, sapendo che l'ampiezza del bacino (misurabile in campagna) risulta essere  $2w \approx 2000$  m, è stato possibile stimare la profondità massima del bacino in corrispondenza della sezione A per diversi *aspect ratio* e per diverse sezioni trasversali.

Modal Frequencies [Hz]		
Mode 1	Mode 2	Mode 3
L1	L2	L3
0.34997	-	-
T1	T2	-
0.40559	0.57657	-
V1	-	-
1.6376	-	-

Basin Shape:  Basin Width (2w) [m]:

**Figura 63:** Tabella con le frequenze dei modi principali nelle tre direzioni di vibrazione della valle, in corrispondenza della sezione A. Deve essere inserita la misura dell'ampiezza del bacino in corrispondenza della sezione.



**Figura 64:** Rapporti tra le frequenze dei modi di vibrare della sezione A, nelle due direzioni longitudinale e trasversale, e successione dei modi per ciascuna direzione, in funzione dell'*aspect ratio* e dei diversi tipi di bacino. Per la sezione A ci limiteremo allo studio del rapporto  $T_1/L_1$ .

	$h/w$	$h_{max}$ [m]
Rectangular	0.41084	411
Triangular	0.32044	320
Circular	0.37791	378
Sine	0.27189	272
Elliptic	0.42016	420

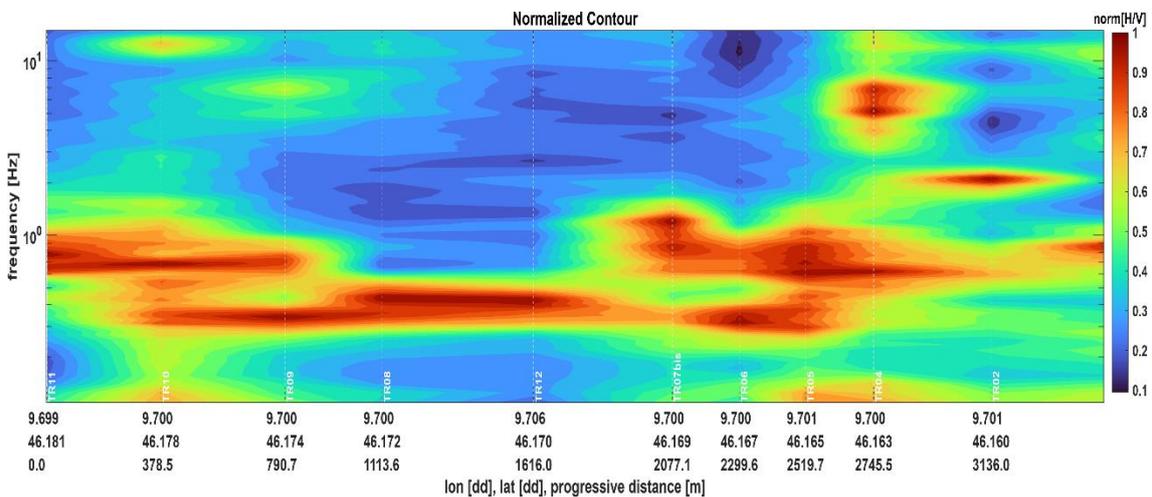
**Figura 65:** Risultati generali per la sezione A. Sono fornite le profondità massime possibili per *aspect ratio* diversi e per diverse forme del bacino. (Immagine tratta dal software HeeVee).

Si ripete in maniera sintetica la stessa procedura di analisi dei dati descritta fin qui, per le sezioni B e D.

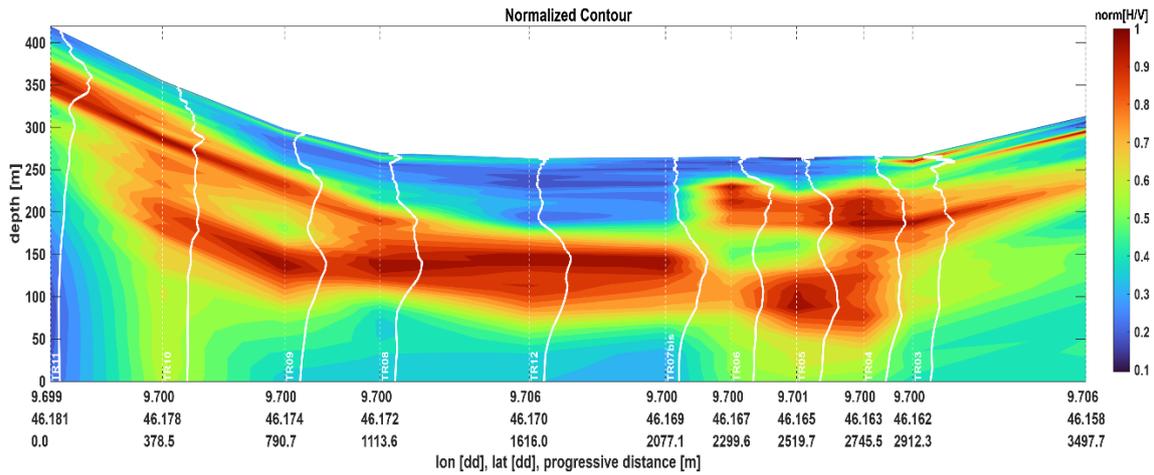
Per quanto riguarda la sezione B, le misure 12B e 13B si discostano in maniera evidente dalle altre (Figura 22), ma è stato deciso di acquisirle per valutare fino a dove la presenza del conoide (visibile nella stessa figura) potesse alterare la registrazione del segnale.

Si sottolinea solamente che, per quanto riguarda la sezione B, non è stata utilizzata la misura B13, perché troppo decentrata rispetto agli altri punti della sezione.

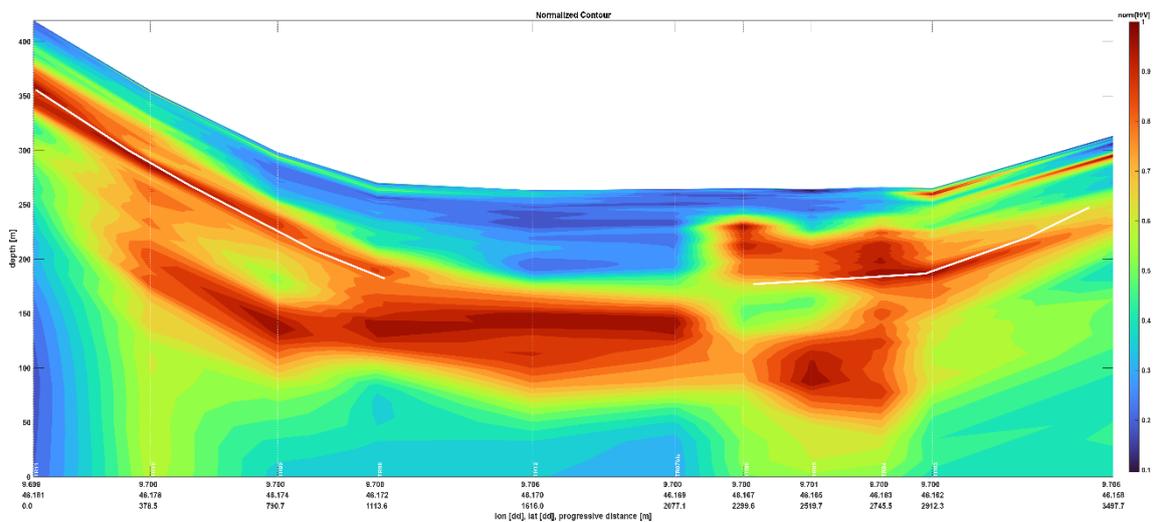
Nel tentativo di un'interpretazione 1D sono stati prodotti i grafici di seguito.



**Figura 66:** Contour (normalizzato) in frequenza delle curve H/V per i punti di misura della sezione B. Il colore blu si riferisce alle frequenze H/V di minor ampiezza; il rosso alle frequenze relative ai massimi della curva H/V.

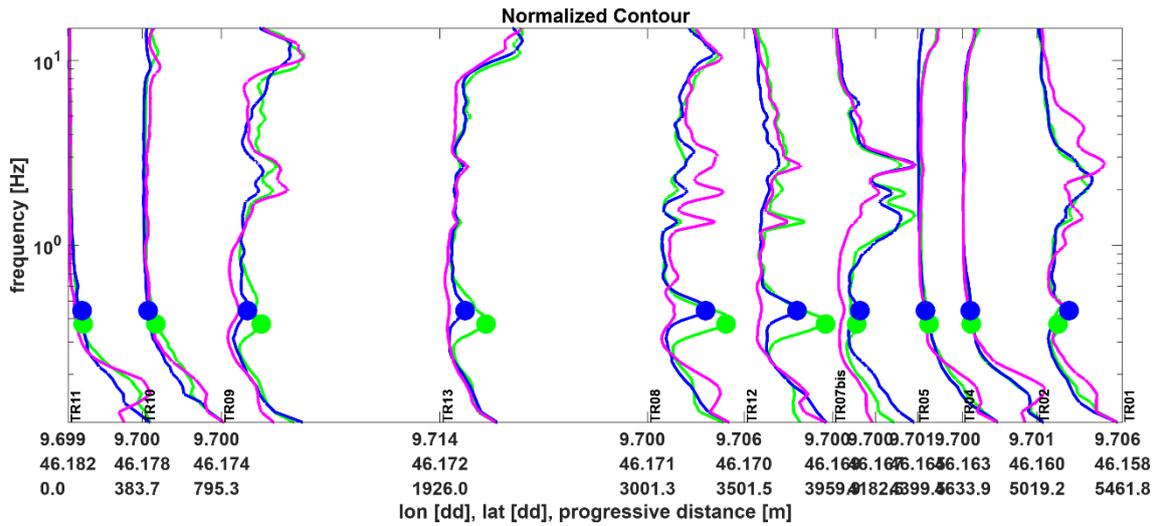


**Figura 67:** *Contour* (normalizzato) con le curve H/V rappresentate in funzione della profondità per i punti di misura della sezione B (è tenuto in conto anche il profilo altimetrico). Il colore blu si riferisce alla frequenza H/V di minor ampiezza; il rosso alle frequenze relative ai massimi della curva H/V. Sono visibili anche le curve H/V ruotate di 90° rispetto al solito (in bianco) e localizzate in corrispondenza dei punti in cui sono state acquisite le misure lungo la sezione.



**Figura 68:** *Contour* (normalizzato) delle curve H/V in funzione della profondità la sezione B. La linea bianca traccia l'andamento del riflettore sismico seguendo i picchi di massima ampiezza (in rosso), fin dove è possibile l'interpretazione 1D.

Si esegue nuovamente l'approccio 2D, attraverso lo studio degli spettri delle singole componenti del moto nelle direzioni longitudinale (L), trasversale (T) e verticale (V) (Figura 69). Si determinano le frequenze dei modi  $L_1$  e  $T_1$  (Figura 70) e se ne calcola il rapporto, per ottenere i modelli di Figura 71 e le stime per le profondità massime in Figura 72.



**Figura 69:** Spettri di velocità delle singole componenti del moto per tutte le misure acquisite lungo la sezione B. I cerchi blu e verdi identificano le frequenze dei modi di vibrare lungo le tre direzioni longitudinale (verde), trasversale (blu) e verticale (viola).

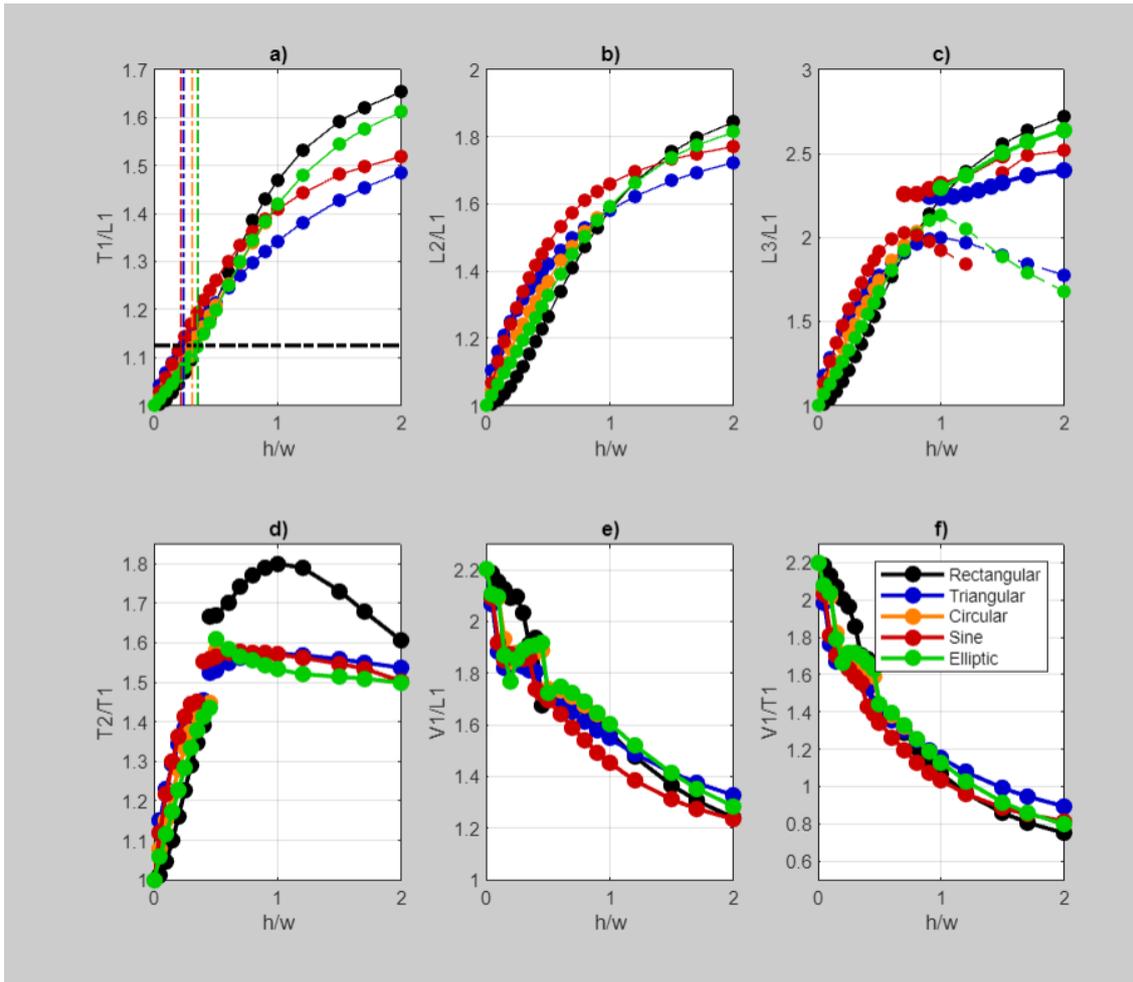
Modal Frequencies [Hz]		
Mode 1	Mode 2	Mode 3
L1	L2	L3
0.40	-	-
T1	T2	-
0.45	-	-
V1	-	-
-	-	-

**Basin Shape**
**Basin Width (2w) [m]**
Compute Basin Parameters

Any ▾
2100

Modal Shapes
Clear Table

**Figura 70:** Tabella con le frequenze del modo fondamentale longitudinale (L<sub>1</sub>) e del modo fondamentale trasversale (T<sub>1</sub>) per la sezione B. Va inserita anche la misura dell'ampiezza della valle in corrispondenza della sezione B.



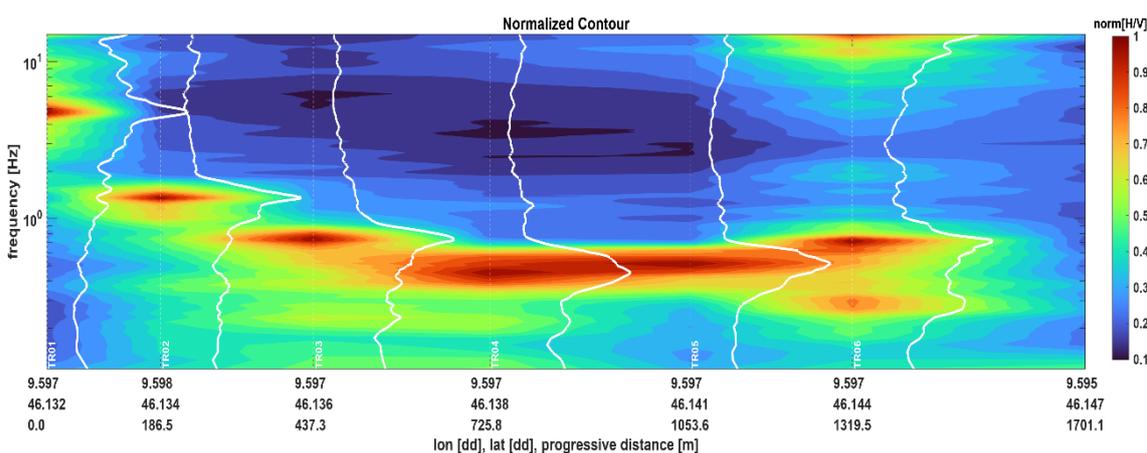
**Figura 71:** Rapporti tra le frequenze dei modi di vibrare per la sezione B nelle due direzioni longitudinale e trasversale, e successione dei modi per ciascuna direzione, in funzione dell'*aspect ratio* e di diversi tipi di bacino. Per la sezione B ci limiteremo allo studio del rapporto  $T_1/L_1$ .

	$h/w$	$h_{max}$ [m]
Rectangular	0.35505	373
Triangular	0.23956	252
Circular	0.30943	325
Sine	0.21796	229
Elliptic	0.35276	370

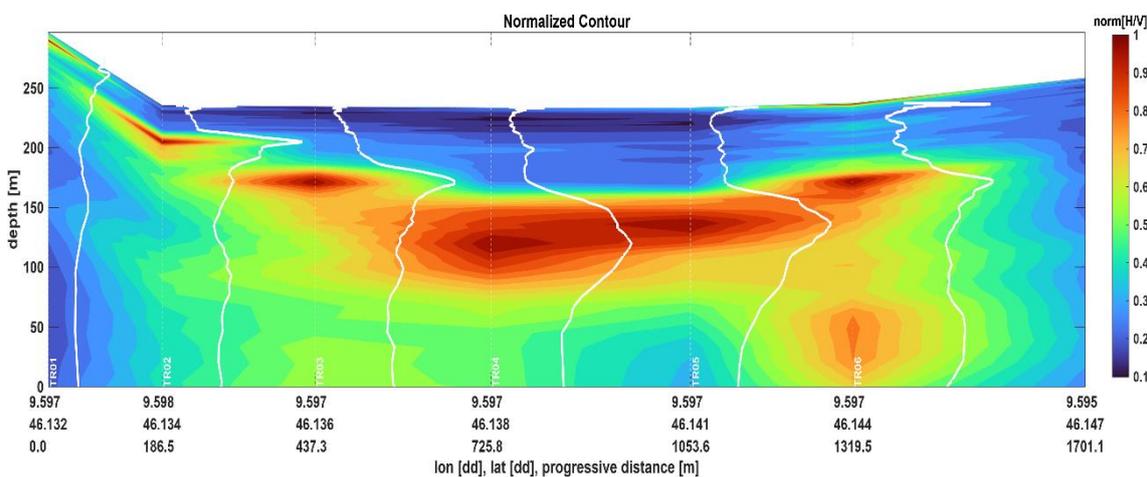
**Figura 72:** Risultati generali per la sezione B. Sono fornite le profondità massime possibili per *aspect ratio* diversi e per diverse forme del bacino. (Immagine tratta dal software HeeVee).

Si riportano, infine, i risultati ottenuti dall'elaborazione dei dati relativi alla sezione D.

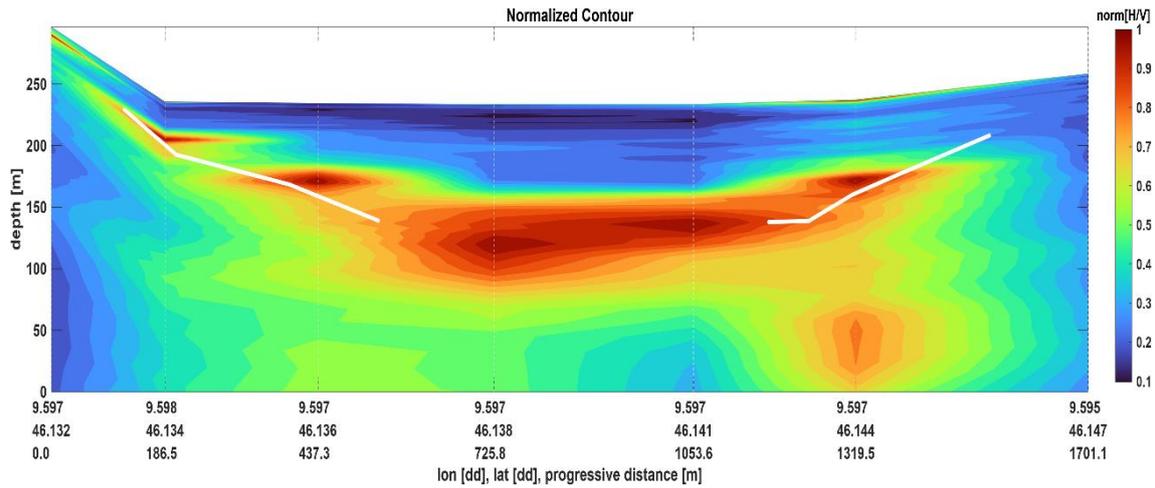
Nel tentativo di un'interpretazione 1D, sono prodotti i grafici in Figura 73, Figura 74 e Figura 75.



**Figura 73:** *Contour* (normalizzato) in frequenza delle curve H/V per i punti di misura della sezione D. Il colore blu si riferisce alle frequenze H/V di minor ampiezza; il rosso alle frequenze relative ai massimi della curva H/V.



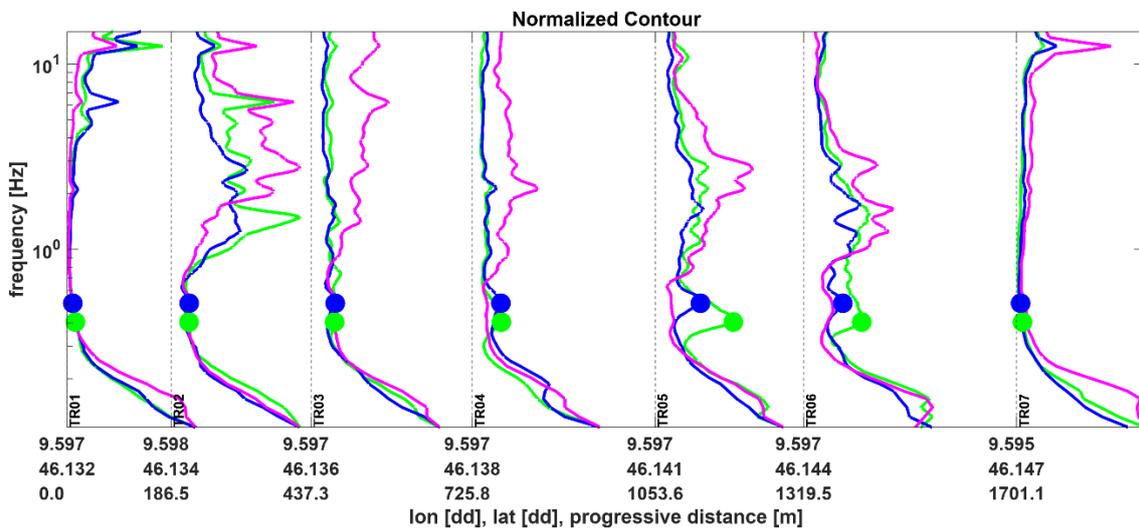
**Figura 74:** *Contour* (normalizzato) con le curve H/V rappresentate in funzione della profondità per i punti di misura della sezione D (è tenuto in conto anche il profilo altimetrico). Il colore blu si riferisce alla frequenza H/V di minor ampiezza; il rosso alle frequenze relative ai massimi della curva H/V. Sono visibili anche le curve H/V ruotate di 90° rispetto al solito (in bianco) e localizzate in corrispondenza dei punti in cui sono state acquisite le misure lungo la sezione.



**Figura 75:** *Contour* (normalizzato) delle curve H/V in funzione della profondità la sezione D. La linea bianca traccia l'andamento del riflettore sismico seguendo i picchi di massima ampiezza (in rosso), fin dove è possibile l'interpretazione 1D.

Si riportano i risultati derivanti dall'analisi 2D degli spettri delle singole componenti del moto.

Per la sezione D, è possibile avvalersi anche del grafico  $L_2/L_1 - h/w$  (**Figura 78**) per ottenere un'ulteriore conferma della stima della profondità massima della valle.



**Figura 76:** Spettri di velocità delle singole componenti del moto per tutte le misure acquisite lungo la sezione D. I cerchi blu e verdi identificano le frequenze dei modi di vibrare lungo le tre direzioni longitudinale (verde), trasversale (blu) e verticale (viola).

Modal Frequencies [Hz]		
Mode 1	Mode 2	Mode 3
L1	L2	L3
0.41	0.52	-
T1	T2	-
0.53	-	-
V1	-	-
-	-	-

Basin Shape

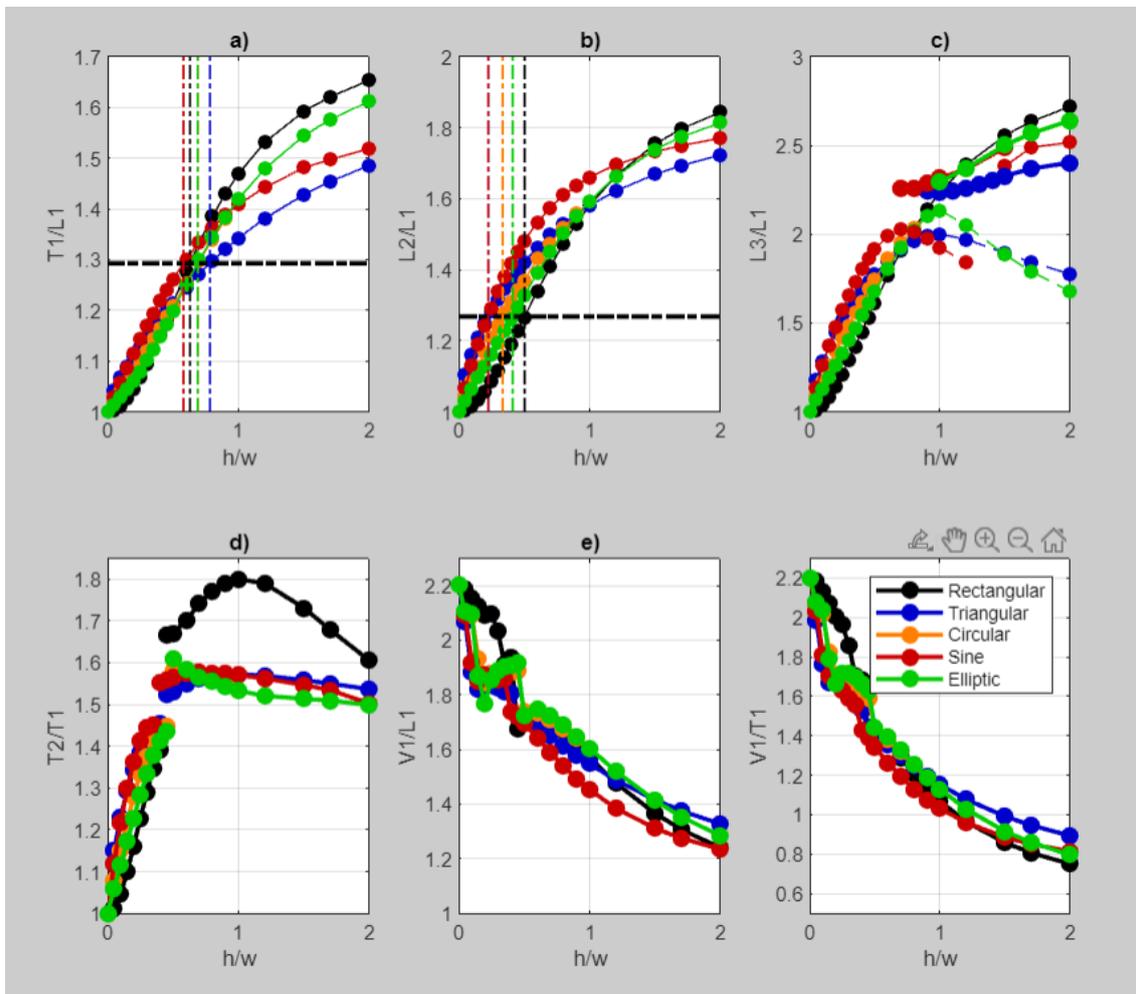
Basin Width (2w) [m]

Compute Basin Parameters

Modal Shapes

Clear Table

**Figura 77:** Tabella con le frequenze del modo fondamentale longitudinale ( $L_1$ ), del primo modo superiore longitudinale ( $L_2$ ) e del modo fondamentale trasversale ( $T_1$ ). È inserita anche la misura dell'ampiezza della Valtellina in corrispondenza della sezione D.



**Figura 78:** Rapporti tra le frequenze dei modi di vibrare della sezione D, nelle due direzioni longitudinale e trasversale e successione dei modi per ciascuna direzione, in funzione dell'*aspect ratio* e di diversi tipi di bacino. Per questa sezione studieremo il rapporto  $T_1/L_1$  e il rapporto  $L_2/L_1$ .

	h/w	h_max [m]
Rectangular	0.56694	505
Triangular	0.50437	449
Circular	0.51375	457
Sine	0.40345	359
Elliptic	0.54971	489

**Figura 79:** Risultati generali per la sezione D. Sono fornite le profondità massime possibili per *aspect ratio* diversi e per diverse forme del bacino. (*Immagine tratta dal software HeeVee*).

Nel prossimo capitolo confronteremo i risultati ottenuti dall'elaborazione dei dati sperimentali con quanto si può osservare dai modelli numerici, e valuteremo quanto il caso asimmetrico si discosta da quello simmetrico.

## 5. DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Lo studio delle geometrie dei bacini profondi è un fenomeno complesso e costoso; per questo motivo, è importante trovare dei metodi semplici che permettano di stimare i loro parametri fondamentali.

Castellaro e Musinu (2022) hanno stimato la forma, la profondità massima dello strato dei sedimenti e la velocità equivalente delle onde di taglio per bacini sedimentari omogenei e con sezioni trasversali simmetriche; tuttavia, nell'applicare lo stesso procedimento al caso di bacini sedimentari reali, il grado di approssimazione di questa valutazione dipende anche dalla simmetria della forma del bacino (Castellaro e Musinu, 2022).

In questo lavoro di tesi ci siamo concentrati sull'analisi del comportamento dinamico di bacini sedimentari asimmetrici, per valutare come variano i loro modi di vibrare quando ci si allontana dal caso idealizzato simmetrico.

Per estendere i risultati del loro lavoro, come prima cosa abbiamo costruito dei modelli numerici per diverse possibili forme di bacini sedimentari asimmetrici (Figura 12) e abbiamo valutato per ciascuno di essi i modi di vibrare  $L_1$ ,  $L_2$  e  $T_1$  (tramite analisi modale agli elementi finiti); abbiamo calcolato i loro rapporti modali e li abbiamo messi a confronto con i risultati del caso simmetrico (Tabella 1, Tabella 2, Tabella 3, Tabella 4). Da questo confronto abbiamo potuto concludere che, a parità di *aspect ratio*, l'aumento dell'asimmetria produce un aumento delle frequenze dei modi e che questa variazione affligge di più i modi superiori rispetto a quelli fondamentali; inoltre, all'aumentare dell'*aspect ratio*, i valori delle frequenze dei modi diminuiscono, ma crescono i loro rapporti. Abbiamo, infine, costruito i grafici che relazionano le variazioni dei rapporti  $T_1/L_1$  e  $L_2/L_1$  ai diversi *aspect ratio* dei modelli numerici (Figura 16, Figura 17).

Dal confronto con i casi standard simmetrici di Castellaro e Musinu (2022), abbiamo potuto notare anche che, mentre le frequenze assolute dei modi di vibrare dipendono dalla geometria del bacino, i loro rapporti dipendono solo dai rapporti di forma, a parità di rigidità: questo risultato si rivela molto utile per poter confrontare i risultati numerici con quanto ottenuto da un caso di studio reale.

A questo scopo, nel 2021 abbiamo effettuato una campagna di misura di micro-tremore sismico ambientale lungo quattro sezioni della Valtellina (Figura 22) ma, a causa dei

disturbi nel segnale registrato, abbiamo condotto la nostra analisi solamente lungo tre sezioni (A, B e D).

Per quanto riguarda l'elaborazione dei dati, per prima cosa abbiamo pulito il segnale dai transienti così da ottenere gli spettri di ampiezza delle singole componenti del moto e i grafici delle curve H/V per ciascun punto di misura: dall'osservazione degli spettri delle singole componenti del moto abbiamo potuto valutare se, lungo le sezioni A, B e D, la valle potesse essere ricondotta al caso 1D o al caso 2D. Abbiamo concluso che lungo tutte e tre le sezioni il bacino mostra un comportamento 2D, con le frequenze dei modi di vibrare  $L_1$  e  $T_1$  che differiscono tra loro per più del 10% (per distanze al di sotto del 10% ci si può ricondurre al caso 1D). Per l'identificazione delle frequenze dei modi di vibrare (Tabella 7, Tabella 8 e Tabella 9) abbiamo selezionato solamente le tracce meno disturbate del segnale: infatti, alle frequenze tipiche del micro-tremore sismico (sotto 1 Hz), una valutazione non precisa della frequenza del modo porta ad una grande variazione nel calcolo dei rapporti di rigidezza e, di conseguenza, nella stima della profondità del riflettore sismico. In ciascuna sezione, il modo  $L_1$  è risultato particolarmente visibile in corrispondenza delle misure centrali,  $L_2$  in corrispondenza di un terzo e due terzi circa dell'ampiezza del bacino e  $T_1$  in corrispondenza di un quarto o tre quarti circa di  $2w$ , secondo quanto predetto dai modelli numerici. A partire da queste frequenze abbiamo costruito i grafici delle forme modali lungo le tre sezioni in analisi (Figura 48, Figura 49, Figura 50), e abbiamo potuto concludere che queste forme rispecchiano quanto predetto dai modelli numerici.

L'individuazione dei modi  $L_1$ ,  $L_2$  (quando possibile) e  $T_2$  ha permesso anche di calcolare i rapporti di frequenza  $T_1/L_1$  e  $L_2/L_1$ , con cui stimare la forma del bacino sedimentario.

Proseguendo l'analisi dei dati di campagna, abbiamo migrato le curve H/V dal dominio della frequenza a quello della profondità: in questo modo abbiamo potuto associare a ogni ampiezza di picco una scala cromatica, per migliorarne la visualizzazione. La migrazione delle curve H/V dalla frequenza alla profondità è stata possibile grazie all'analisi delle prove in array descritte nel capitolo 3.3, che hanno fornito i profili di  $V_s$  necessari per l'inversione.

Per ogni sezione di Figura 22 abbiamo evidenziato ancora una volta la coesistenza di risonanze 1D e 2D (Figura 60, Figura 67, Figura 74). Il verificarsi di questo fenomeno lungo tutte e tre le sezioni A, B e D suggerisce che limitarsi all'applicazione della sola

tecnica H/V 1D per l'interpretazione dei dati di micro-tremore sismico non può essere considerato un approccio valido per la determinazione del profilo dei riflettori sismici della Valtellina (come fatto da Bassi, 2011) (Figura 19, Figura 20): lo studio delle curve H/V deve essere necessariamente affiancato all'osservazione degli spettri delle singole componenti del moto.

Nel nostro caso, abbiamo osservato che le risonanze 1D dominano in corrispondenza dei bordi del bacino (dove sono prevalenti le onde di superficie), lungo cui è stato possibile tracciare un profilo parziale del *bedrock* seguendo le frequenze dei massimi delle curve H/V (Figura 60, Figura 67, Figura 74).

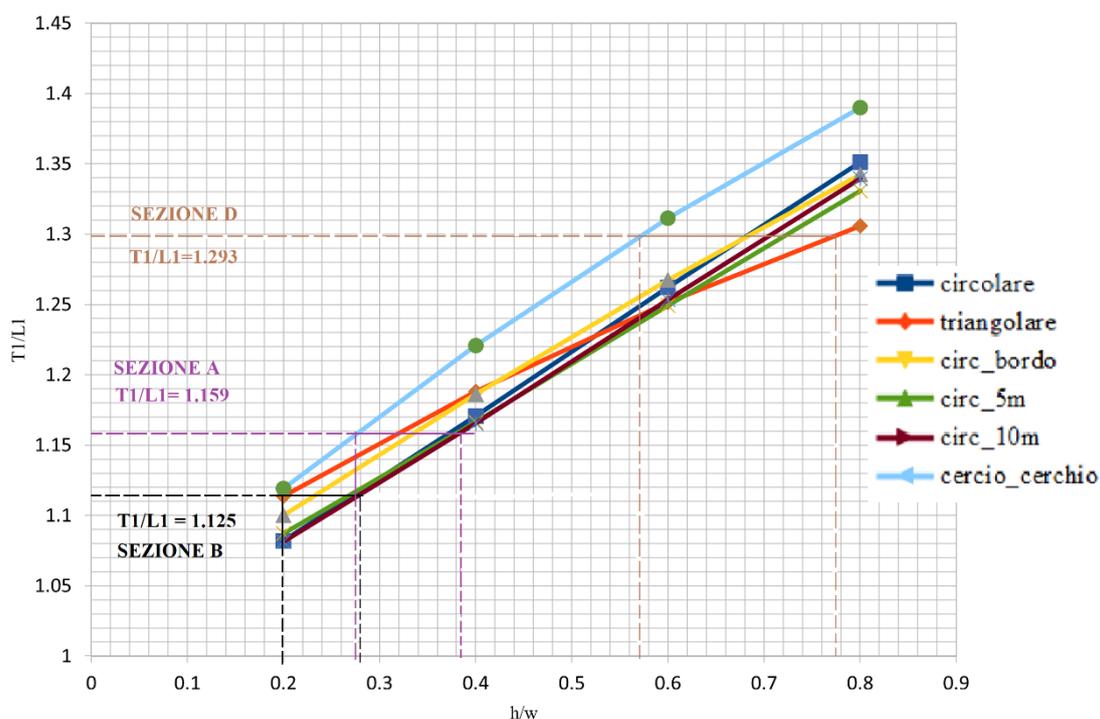
Al centro di ogni sezione, dove dominano le risonanze 2D, siamo ricorsi allo studio degli spettri delle singole componenti del moto: un nuovo *picking*, effettuato direttamente sull'applicativo, ha fornito i valori per le frequenze dei modi di vibrare riportati in Tabella 13.

Queste frequenze sono state utilizzate per il calcolo dei rapporti di rigidità e per la costruzione dei modelli  $T_1/L_1 - h/w$  e  $L_2/L_1 - h/w$  sperimentali (Figura 64, Figura 71, Figura 77). Inoltre, dal momento che era nota l'ampiezza della valle in corrispondenza delle tre sezioni lungo cui sono state effettuate le misure, abbiamo fornito anche una stima della profondità massima  $h_{max}$  dello strato sedimentario del bacino, per diversi possibili *aspect ratio*: questa stima è stata fornita per diverse forme simmetriche delle sezioni trasversali (Figura 65, Figura 72, Figura 79).

Abbiamo, infine, potuto confrontare i risultati ottenuti dall'analisi dei dati sperimentali con quanto previsto dai modelli numerici (Figura 16, Figura 17), per valutare quanto il caso asimmetrico si discosti da quello simmetrico (Figura 80).

**Tabella 13:** Tabella riassuntiva con i valori delle frequenze sperimentali dei modi di vibrare della Valtellina (ottenute dal *picking* su HeeVee) e loro rapporti. (Ogni valore è stato approssimato per eccesso alla terza cifra decimale).

	L <sub>1</sub> [Hz]	L <sub>2</sub> [Hz]	T <sub>1</sub> [Hz]	T <sub>1</sub> / L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub> / L <sub>1</sub>
<b>Sezione A</b>	0.350	x	0.406	1.159	x
<b>Sezione B</b>	0.400	x	0.450	1.125	x
<b>Sezione D</b>	0.410	0.520	0.530	1.293	1.268



**Figura 80:** Grafico dei rapporti di rigidezza in funzione dell'*aspect ratio* e della forma del bacino, per i modelli numerici analizzati (in Figura 12). Sono indicati i valori dei rapporti di rigidezza ottenuti dai dati sperimentali per le sezioni A, B e D della Valtellina, e gli intervalli dei possibili *aspect ratio* teorici corrispondenti, per le diverse forme geometriche simmetriche e asimmetriche.

Di seguito si riportano le tabelle con la valutazione della miglior stima del rapporto di aspetto dei casi asimmetrici sulla base della loro distanza dai modelli simmetrici, a partire

dal rapporto di aspetto per ciascuna sezione analizzata della Valtellina (Tabella 14, Tabella 15, Tabella 16).

Dall'osservazione di queste tabelle, possiamo concludere che la capacità dei modelli simmetrici di stimare l'*aspect ratio* di bacini sedimentari caratterizzati da sezioni trasversali asimmetriche cala sia al crescere del rapporto di rigidità delle due direzioni orizzontali, sia all'aumentare dell'asimmetria della valle.

In corrispondenza delle geometrie più asimmetriche (corrispondenti ai casi misti circolare + triangolare con taglio al bordo e circolare + circolare), si assiste ad una distanza percentuale tra i valori simmetrici e quelli asimmetrici compresa tra il 15% e il 20%, mentre per tutti gli altri casi si assiste ad una sottostima o ad una sovrastima dei rapporti di forma entro il 10%. In particolare, il caso misto circolare + circolare è quello che più si discosta dai modelli simmetrici e la sua distanza aumenta all'aumentare dei rapporti di rigidità.

**Tabella 14:** Valutazione della stima di  $h/w$  per i casi asimmetrici misti di Figura 12, a partire dal rapporto di rigidità sperimentale calcolato per la sezione A:  $T_1/L_1 = 1.159$ .

<b>Tipo di geometria asimmetrica</b>	<b>Modello di miglior stima</b>	<b>Tipologia di stima</b>	<b>Distanza % dal modello simmetrico</b>
Circolare + triangolare_10 m	circolare	sottostima	< 5%
Circolare + triangolare_5 m	circolare	sottostima	<5%
Circolare + triangolare_bordo	triangolare	sottostima	>5%
Circolare + circolare	triangolare	sovrastima	≈15%

**Tabella 15:** Valutazione della stima di  $h/w$  per i casi asimmetrici misti di Figura 12, a partire dal rapporto di rigidità sperimentale calcolato per la sezione B:  $T_1/L_1 = 1.125$ .

<b>Tipo di geometria asimmetrica</b>	<b>Modello di miglior stima</b>	<b>Tipologia di stima</b>	<b>Distanza % dal modello simmetrico</b>
Circolare + triangolare_10 m	circolare	accettabile	Non calcolabile
Circolare + triangolare_5 m	circolare	accettabile	Non calcolabile
Circolare + triangolare_bordo	triangolare	sottostima	≈ 15 %
Circolare + circolare	triangolare	accettabile	Non calcolabile

**Tabella 16:** Valutazione della stima di  $h/w$  per i casi asimmetrici misti di Figura 12, a partire dal rapporto di rigidità sperimentale calcolato per la sezione D:  $T_1/L_1 = 1.293$ .

<b>Tipo di geometria asimmetrica</b>	<b>Modello di miglior stima</b>	<b>Tipologia di stima</b>	<b>Distanza % dal modello simmetrico</b>
Circolare + triangolare_10 m	circolare	sottostima	< 5%
Circolare + triangolare_5 m	circolare	sottostima	>5%
Circolare + triangolare_bordo	circolare	accettabile	Non calcolabile
Circolare + circolare	circolare	sovrastima	≈20%

Sappiamo da Castellaro e Musinu (2022) che una buona valutazione dei rapporti di aspetto è fondamentale per poter ottenere anche una valida stima della profondità del riflettore.

Per ottenere dei risultati attendibili, tuttavia, non è sufficiente essere accurati solo nell'ultima fase dell'analisi dati, ma bisogna prestare attenzione durante tutto il procedimento sperimentale, a partire dalle modalità di acquisizione del micro-tremore sismico e per tutto il processo di elaborazione, secondo quanto mostrato nel corso di questo lavoro di tesi.



## Bibliografia

Aki, K., 1964: A note on the use of microseisms in determining the shallow structures of the earth's crust, *Geophysics*, **29**, 665–666

Aki, K. & P. G. Richards, Quantitative Seismology, 2a edizione, University Science Books, Sausalito CA, 2002.

Anderson, J.G., 2007. Physical Processes that control strong ground motion in *Treatise on Geophysics, Earthquake Seismology*, G. Schubert ed., Elsevier, Amsterdam.

Bard, P.-Y., 1999. Microtremor measurements: a tool for site effect estimation?, in *Proceeding of the Second International Symposium on the Effects of Surface Geology on Seismic Motion, Yokohama, Japan, 1-3 December 1998*, Balkema, Irikura, K. and Joint Working Group on the Effects of Surface Geology and Japanese National Working Group on the Effects of Surface Geology and Association for Earthquake Disaster Prevention, pp. 1251–1279.

Bard, P.Y., and M. Bouchon, 1985. The two-dimensional resonance of sediment-field valleys, *Bull. Seism. Soc. Am.*, **75**, 519-541.

Bassi, S., *Le conoidi e il fondovalle Valtellinese tra Castione e Ardenno* [tesi di laurea]. Milano: Università degli studi di Milano, 2011.

Biella, G., de Franco, R., Caielli, G., Vignola, P., Lozej, A., Bini, A., Guglielmin, M., Siletto, G.B., Cabonara, S. & Terenzoni, M., 2001. Ricostruzione dei depositi alluvionali della Valtellina (SO) da indagini simiche a riflessione. In: *20° Convegno Nazionale del GNGTS*, 6–8 Novembre 2001, pp. 74–75.

Bonnefoy-Claudet, S., Köhler, A., Cornou, C., Wathelet, M. & Bard, P.Y., 2008. Effects of love waves on microtremor H/V ratio. *Bull. seism. Soc. Am.*, **98**, 288–300.

Castaldini, D., Marchetti, M., Norini, G., Vandelli, V. & Zuluaga Vélez M. C., 2019. Geomorphology of the central Po Plain, Northern Italy, *Journal of Maps*, **15:2**, 780-787

Castellaro, S. & Mulargia, F., 2009b. VS30 estimates using constrained H/V measurements, *Bull. seism. Soc. Am.*, **99**, 761–773.

Castellaro, S. & Mulargia, F., 2010. How far from a building does the ground-motion free-field start? The cases of three famous towers and a modern building, *Bull. seism. Soc. Am.*, **100**, 2080–2094.

Castellaro, S., 2016. The complementarity of H/V and dispersion curves. *Geophysics*, **81**, T323–T338.

Castellaro, S. & Isani, S., 2019. Experimental modal analysis of bridges: how to employ few resources and get it right, *Fast Times*, **24**, 78–83.

Castellaro, S., & Musinu G., 2022. Resonance versus Shape of Sedimentary Basins, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **20**, 1–17, doi: 10.1785/0120210277

De Franco, R., Biella, G., Caielli, G., Berra, F., Gugliemin, M., Lozej, A., Piccin, A., and Sciunnach, D., 2009. Overview of high-resolution seismic prospecting in pre-Alpine and Alpine basins, *Quaternary Int.* **204**, 65–75.

Fa'ñ, D., Kind, F. & Giardini, D., 2001. A theoretical investigation of average H/V ratios, *Geophys. J. Int.*, **145**, 535–549.

Guo, Z., Aydin, A., Huang, Y., Xue, M., 2021. Polarization characteristics of Rayleigh waves to improve seismic site effects analysis by HVSR method. *Engineering Geology*, vol. **292**, 106274.

Gutenberg, B., 1931. Microseisms in North America, *Bull. seism. Soc. Am.*, **21**, 1–24.

Gutenberg, B., 1947. Microseisms and weather forecasting, *Meteorology*, **4**, 21–28.

- Gutenberg, B., 1958. Two types of microseisms, *J. geophys. Res.*, **63**, 595– 597.
- Haghshenas, E., Bard, P.Y. & Theodulidis, N., SESAMEWP04 Team, 2008. Empirical evaluation of microtremor H/V spectral ratio, *Bull. Earthq. Eng.*, **6**, 75–108.
- Kac M., 1966. Can One Hear the Shape of a Drum? *The American Mathematical Monthly*, **73(4)**, 1–23.
- Kanai K., 1957: The requisite conditions for predominant vibration of round. *Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo Univ.*, **31**, 457.
- Lattanzi G., Castellaro S., & Di Donato M., 2023. On the time-stability of resonance frequencies in deep basins, *Geophysical Journal International*, **234**, 1870–1884
- Moczo P., Labák P., Kristek J. & Hron F., 1996. Amplification and differential motion due to an antiplane 2D resonance in the sediment valleys embedded in a layer over the half-space, *Bull. seism. Soc. Am.*, **86(5)**, 1434–1446.
- Nakamura Y., 1989. A method for dynamic characteristics estimates of subsurface using microtremor on the ground surface, *Quart. Rep. Railway Tech. Res. Inst.*, **30**, 25–33.
- Nogoshi M., & Igarashi T., 1970. On the propagation characteristics of microtremors. *J. Seism. Soc. Japan*, **23**, 264-280.
- Pöyry, 2017. Deep seismic profile commissioned by the Autonomous Province of Bozen/Bolzano (in German). *Technical report*, **25** pp.
- SESAME Project, 2004. Guidelines for the implementation of the H/V spectral ratio technique on ambient vibrations: measurements, processing and interpretation. SESAME European Research Project WP12, deliverable no. D23.12.
- Sgattoni G. & Castellaro S., 2020. Detecting 1D and 2D ground resonances with a single-station approach, *569 Geophys. J. Int.* **223**, 471-487.

Mele M., Bini A., Bassi S., Giudici M., Monti M., & Azzola M., 2012. Single-Station Passive Seismic Stratigraphy for the characterization of subsurface structure of the Valtellina valley (central Alps, northern Italy), *Geophysical Research Abstracts* Vol. **14**, EGU2012-5704.

Rial, J. A., and H. Ling, (1992). Theoretical estimation of the Eigen frequencies of 2-dimensional resonant sedimentary basins: Numerical computations and analytical approximations to the elastic problem, *Bull. Seismol. Soc. Am.* **82**, 2350–2367.

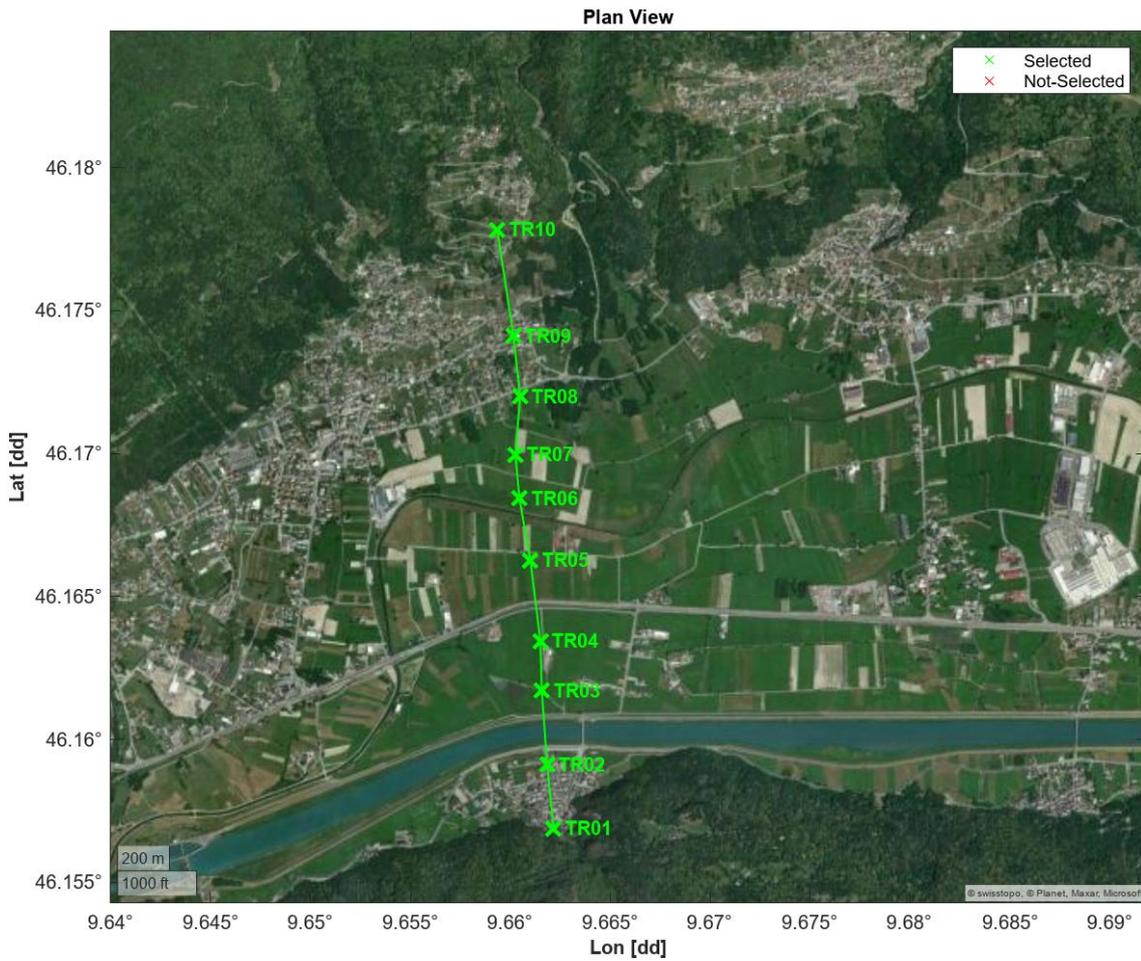
Zoeppritz, K., 1919. "VIIb. Über Reflexion und Durchgang seismischer Wellen durch Unstetigkeitsflächen." [VIIb. On reflection and transmission of seismic waves by surfaces of discontinuity], *Nachrichten von der Königlichen Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen, Mathematisch-physikalische Klasse*, 66–84

## Appendice

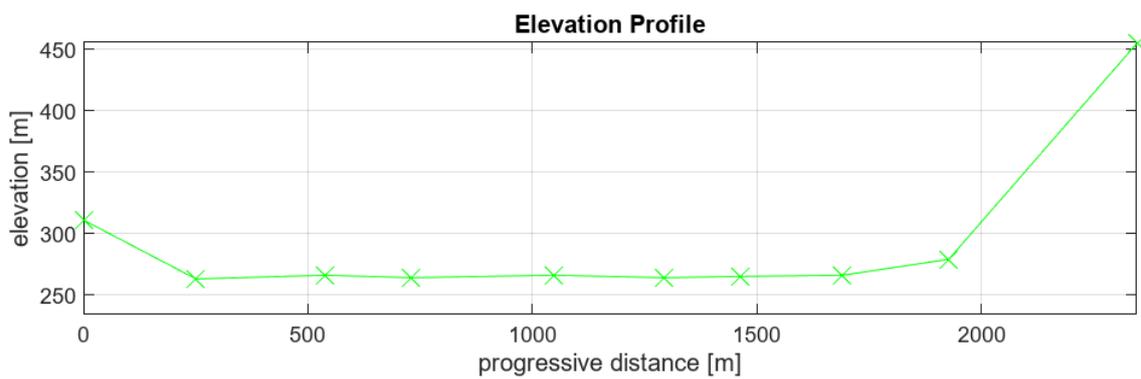
### SEZIONE A:

**Tabella 17:** Coordinate dei punti di misura per la sezioni A, acquisita in Valtellina nell'ottobre del 2021.

<b>ID</b>	<b>Longitudine [°]</b>	<b>Latitudine [°]</b>	<b>Elevazione [m]</b>
<b>A01</b>	9.6621679	46.1568852	311
<b>A02</b>	9.6618461	46.1591265	263
<b>A03</b>	9.6615754	46.1617151	266
<b>A04</b>	9.661506	46.163435	264
<b>A05</b>	9.6610062	46.1662654	266
<b>A06</b>	9.6604545	46.1684368	264
<b>A07</b>	9.6602558	46.1699647	265
<b>A08</b>	9.660495	46.171998	266
<b>A09</b>	9.66016	46.174115	279
<b>A10</b>	9.6593416	46.1778373	455



**Figura 81:** Mappa satellitare della sezione A (prodotta dal software HeeVee).

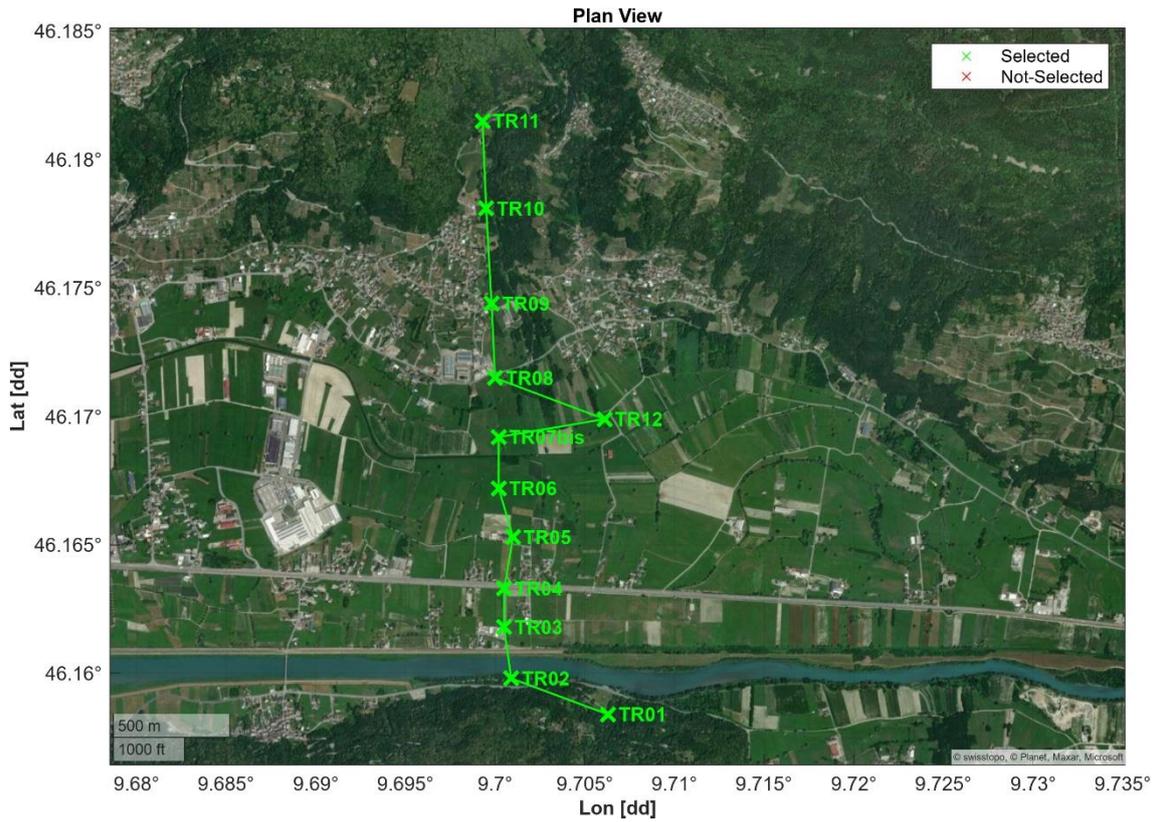


**Figura 82:** Profilo di elevazione (s.l.m.) delle misure acquisite lungo la sezione A.

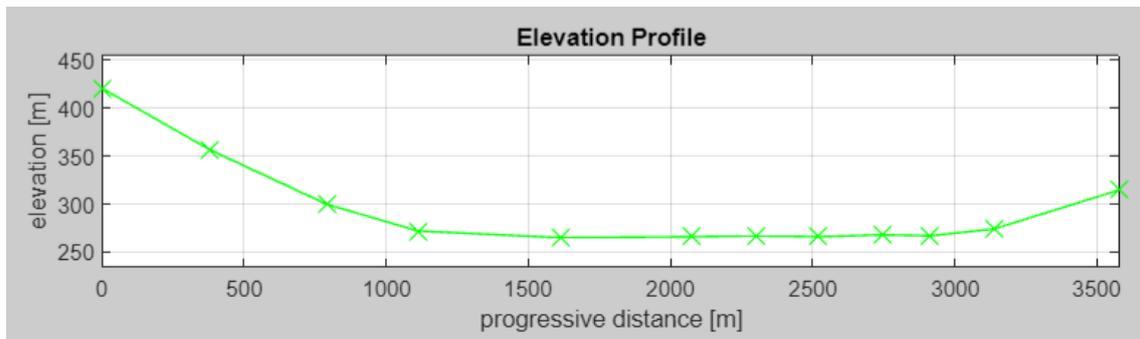
## SEZIONE B:

**Tabella 18:** Coordinate dei punti di misura per la sezioni B, acquisita in Valtellina nell'ottobre del 2021.

<b>ID</b>	<b>Longitudine [°]</b>	<b>Latitudine [°]</b>	<b>Elevazione [m]</b>
<b>B01</b>	9.706281	46.1584086	315
<b>B02</b>	9.7009019	46.1598057	274
<b>B03</b>	9.7005222	46.1618389	267
<b>B03bis</b>	9.7005676	46.16074	268
<b>B04</b>	9.7004543	46.1632555	268
<b>B05</b>	9.7009711	46.1653324	266
<b>B06</b>	9.700181	46.167205	267
<b>B07</b>	9.700229	46.1692064	266
<b>B08</b>	9.6999779	46.1714731	272
<b>B09</b>	9.6997504	46.1743851	300
<b>B10</b>	9.6995179	46.178082	357
<b>B11</b>	9.699306	46.181529	421
<b>B12</b>	9.7060842	46.1699439	265
<b>B13</b>	9.7139333	46.1717643	265



**Figura 83:** Mappa satellitare della sezione B (prodotta dal software HeeVee), ad esclusione della misura B13. Sono considerate le ribattute al posto delle misurazioni originarie, se migliori.

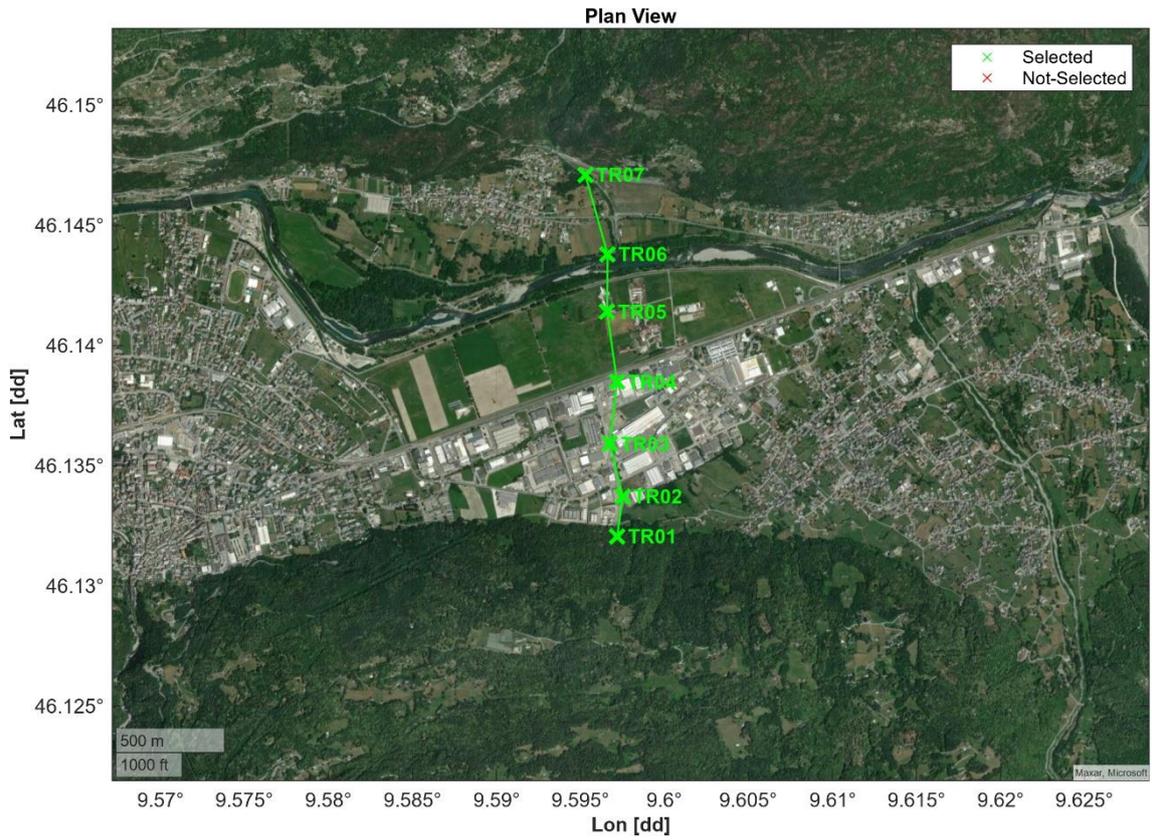


**Figura 84:** Profilo di elevazione (s.l.m.) delle misure acquisite lungo la sezione B.

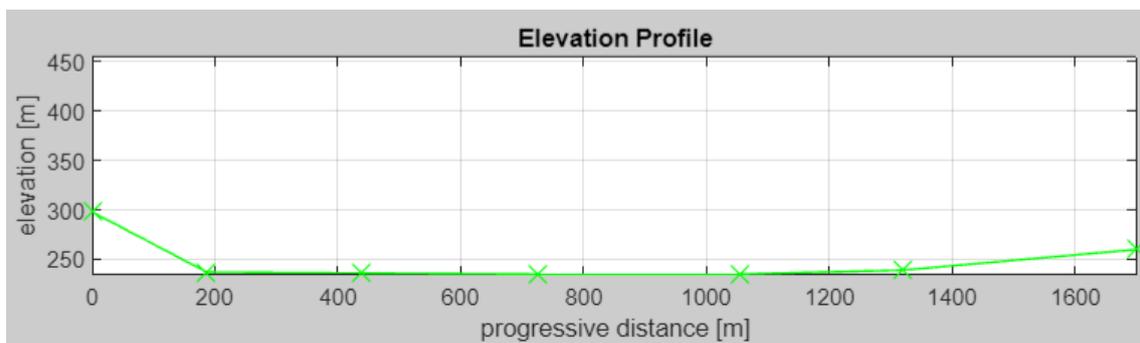
## SEZIONE D:

**Tabella 19:** Coordinate dei punti di misura per la sezioni D, acquisita in Valtellina nell'ottobre del 2021.

<b>ID</b>	<b>Longitudine [°]</b>	<b>Latitudine [°]</b>	<b>Elevazione [m]</b>
<b>D01</b>	9.597182	46.132057	298
<b>D02</b>	9.5975135	46.1337182	237
<b>D03</b>	9.5967516	46.1359103	236
<b>D03bis</b>	9.5965989	46.1356975	235
<b>D04</b>	9.5971749	46.1384872	235
<b>D04bis</b>	9.5968859	46.1383433	235
<b>D05</b>	9.5965839	46.1414063	235
<b>D06</b>	9.596613	46.143796	239
<b>D07</b>	9.5952883	46.147102	260



**Figura 85:** Mappa satellitare della sezione D (prodotta dal software HeeVee). Sono considerate le ribattute al posto delle misurazioni originarie, se migliori.



**Figura 86:** Profilo di elevazione (s.l.m.) delle misure acquisite lungo la sezione D (ad eccezione della misura B13).

## SEZIONE C:

Si riportano per completezza anche le coordinate della sezione C, sebbene non sia stata analizzata tramite i metodi descritti in questa tesi.

**Tabella 20:** Coordinate dei punti di misura per la sezioni C, acquisita in Valtellina nell'ottobre del 2021.

<b>ID</b>	<b>Longitudine [°]</b>	<b>Latitudine [°]</b>	<b>Elevazione [m]</b>
<b>C01</b>	9.6436391	46.1451859	327
<b>C02</b>	9.641068	46.145953	316
<b>C03</b>	9.6378478	46.1451578	323
<b>C03bis</b>	9.6382335	46.1463437	310
<b>C04</b>	9.6340746	46.1474999	291
<b>C05</b>	9.6317996	46.149141	273
<b>C06</b>	9.6281886	46.1483951	304

