



Regione Lombardia



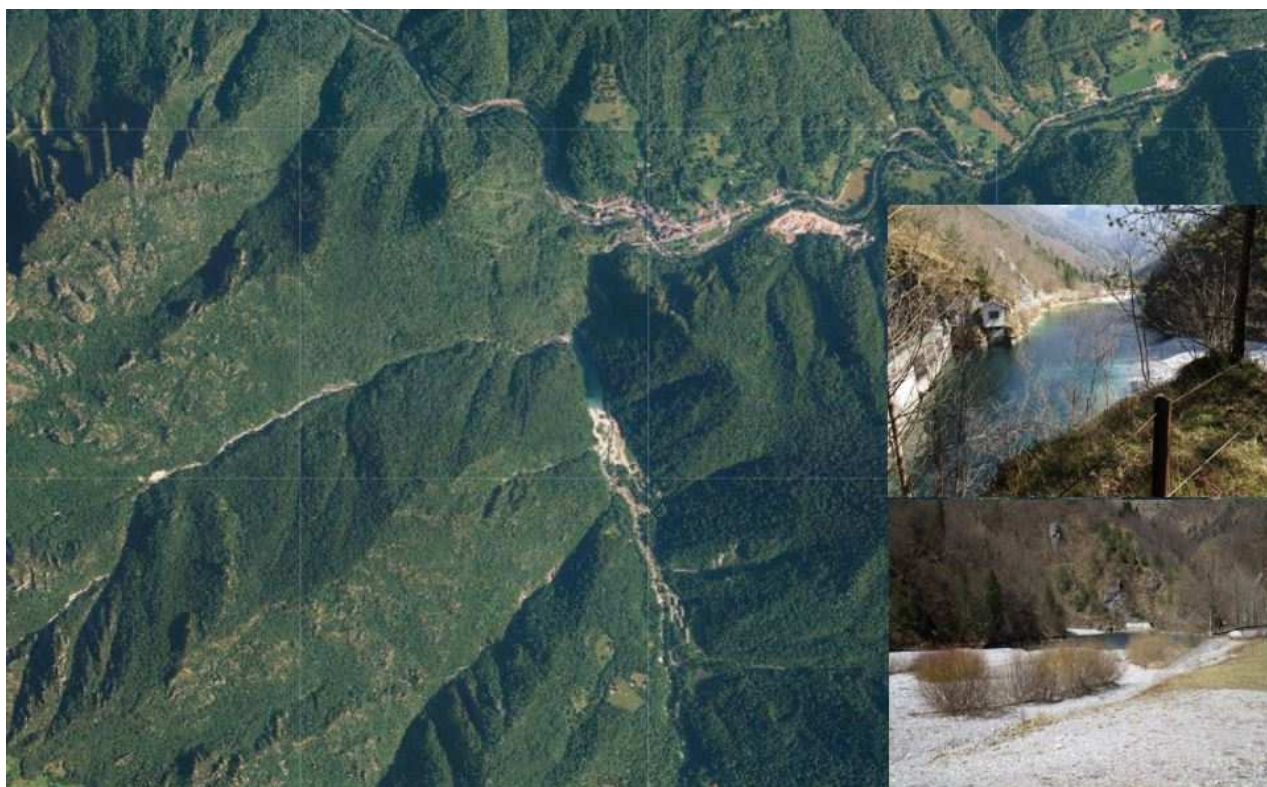
Provincia di Bergamo

COMUNE DI CASSIGLIO

Committente: "Italgen spa" – Via Kennedy, 1 – 24020 – Villa di Serio (BG)



IMPIANTO IDROELETTRICO DI OLMO AL BREMBO – DERIVAZIONE VAL STABINA



STUDIO GEOLOGICO DI SUPPORTO ALLA STESURA DEL PROGETTO DI GESTIONE DELL'INVASO DI CASSIGLIO (BG) AI SENSI DELLA D.G.R. X/5736 DEL 24 OTTOBRE 2016

Pisogne, maggio 2019



Dott. Geol. Fabio Fenaroli

Fabio Fenaroli

Prima stesura

versione: rev.00

Via Giuseppe Palini, 5
25055 Pisogne (BS)
cell. 328.059.00.24
geologo.fenaroli@gmail.com



GEOLOGO
FABIO
FENAROLI

INDICE

1. PREMESSA	4
2. FASE DI RACCOLTA DATI	7
2.1. Componente geologica, idrogeologica e sismica vigente del PGT del Comune di Cassiglio (BG)	7
2.2. Aree a rischio idrogeologico molto elevato derivanti dalla classificazione del PGRA per l'area in esame	12
2.3. Aspetti idrologici ed idraulici per l'area in esame.....	14
3. INQUADRAMENTO GENERALE DELLA ZONA DI INDAGINE	18
3.1. Localizzazione geografica	18
3.2. Inquadramento geologico e tettonico generale	18
3.3. Inquadramento geologico e stratigrafico di riferimento.....	21
3.4. Inquadramento climatico e aspetti pluviometrici dell'area in esame.....	22
4. RILEVAMENTO GEOLOGICO – STRUTTURALE E GEOMORFOLOGICO DI DETTAGLIO E ALTRE ATTIVITÀ DI TERRENO	24
4.1. Inquadramento generale	24
4.2. Analisi strutturale e geologica di versante	24
4.3. Analisi strutturale e geomorfologica di versante.....	26
4.4. Stima granulometrica del materiale in alveo.....	29
4.5. Stima del volume medio di materiale solido che si sedimenta in un anno nel serbatoio in esame.....	30
4.6. Metodologia di Gavrilovic – Zemljic	30
4.7. Applicazione del metodo di Gavrilovic – Zemljic al bacino in esame.....	33
4.8. Considerazioni sui risultati ottenuti	37
4.9. Valutazione delle modalità per il ripristino della capacità utile del serbatoio e interazione con la stabilità delle sponde.....	38
4.10. Caratteristiche geologiche – geomorfologiche del tratto significativo del corso d'acqua a valle dell'invaso ..	39
4.11. Valutazioni conclusive sui risultati ottenuti	39
5. CAMPAGNA DI INDAGINI GEOFISICHE: METODOLOGIE E RISULTATI	40
5.1. Indagini sismiche – cenni teorici	49
5.2. Sismica a rifrazione	49
5.3. Procedure di elaborazione e inversione tomografica del dato sismico.....	49
5.4. Classificazione sismica dei sottosuoli mediante metodologia MASW	45
5.5. Classificazione sismica dei sottosuoli mediante tecnica REMI.....	46
5.6. Strumentazione utilizzata	51
5.7. Acquisizione dati e modalità operative di campagna.....	51
5.8. Analisi ed elaborazione dei dati	52
5.9. Rappresentazione e interpretazione del dato sismico con metodologia tomografica	53

5.10	Rappresentazione e interpretazione dei dati sismici con metodologia MASW.....	53
5.11	Rappresentazione e interpretazione dei dati sismici con metodologia REMI.....	56
5.12	Valutazione della suscettibilità sismica dell'area in studio.....	61
6.	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE.....	66

TAVOLE CARTOGRAFICHE:

Tav. 01: Carta Geologica e strutturale (scala 1:5.000).

Tav. 02: Carta Geomorfologica e della dinamica geomorfologica (scala 1:5.000).

Tav. 03: Carta delle pendenze e dell'acclività di versante (scala 1:5.000).

Tav. 04: Carta dell'Uso del suolo e della copertura vegetazionale (scala 1:5.000).

ALLEGATI:

Allegato A: Schede di sezioni d'alveo rilevate.

Allegato B: Schede analisi geomeccanica affioramenti rocciosi.

Allegato C: Schede di valutazione speditiva della granulometria del materiale in alveo.

Allegato D: Report misure di rumore sismico ambientale con metodologia HVSR.

1. PREMESSA

Su incarico della Società "Italgen spa" con sede in via Kennedy, 1 a Villa di Serio (BG) è stato realizzato il presente studio geologico finalizzato ad investigare gli aspetti geologici / geomorfologici / idrogeologici dei bacini idrografici sviluppati a monte della diga di Cassiglio, nell'ottica di valutare la capacità di trasporto solido e di accumulo degli materiale detritico preso in carico lungo gli alvei dei bacini in esame e depositi nell'invaso di cassiglio e nelle aree in fregio a quest'ultimo; inoltre il presente studio ha curato anche un'approfondimento di natura geofisica finalizzata a valutare la profondità del substrato roccioso oltre che a fornire indicazioni sui reali spessori depositi sedimentari presenti all'invaso di Cassiglio nonché negli areali afferenti ad esso (Fig. 1).



Fig. 1: ubicazione area di indagine compresa nel territorio comunale di Cassiglio (estratto carte di base scala 1:25.000; SiTer@ della Provincia di Bergamo).

Tale studio risulta quindi da intendersi come studio di caratterizzazione geologica-geomorfologica ed idrogeologica finalizzato a supportare il Piano di Gestione dell'invaso e con riferimento a quanto indicato nella D.G.R. 24 Ottobre 2016 – n. X/5736 "Direttive tecniche per la predisposizione, l'approvazione e l'attuazione dei progetti di gestione degli invasi" e con particolare attenzione a quanto indicato al punto 2a "Caratteristiche geologiche e geomorfologiche, uso del suolo,

aree sottoposte a vincoli ambientali o idrogeologici” e punto 4 “Valutazione del volume medio di materiale solido che sedimenta in un anno nel serbatoio” del paragrafo 3.2.1 “Caratterizzazione di base” del capitolo 3.2 “Contenuti del progetto di gestione” delle “Direttive Tecniche per la predisposizione, l’approvazione e l’attuazione dei progetti di gestione degli invasi” approvate con la DGR sopracitata, in merito alla documentazione geologica e geomorfologica da produrre per gli scopi della presente qui di seguito si indicheranno le tipologie di attività effettuate e che saranno dettagliatamente illustrate nei successivi capitoli della presente relazione tecnica geologica.

Come si evince dalla figura 1 l’area d’indagine è chiusa verso valle dalla diga dell’invaso di Cassiglio e ricomprende verso monte i diversi sottobacini a questi afferenti fra i quali i più importanti sono il corso d’acqua della Valle dei Faggi, della Valle Cassiglio propriamente detta, oltre che della Valle Gazonera e della Valle Canale del Chignolo, entrambe rappresentanti rami secondari e affluenti della Valle di Cassiglio a monte dell’invaso. Nel dettaglio le indagini realizzate in tale contesto fanno riferimento alle seguenti tipologia di attività:

- a) **Consultazione delle diverse fonti di natura bibliografica disponibili per l’areale in esame** con particolare attenzione a quanto indicato nel foglio CARG Lecco (076) della Carta Geologica d’Italia (scala 1:50.000) e nelle relative note illustrative, nella Carta Geologica della Provincia di Bergamo a cura del Servizio Territorio della Provincia di Bergamo (scala 1:50.000) oltre che alle informazioni ed alla documentazione di natura geologica presente sui geoportali della Provincia di Bergamo e della Regione Lombardia sia per gli aspetti geologici della pianificazione territoriale a scala comunale (componente geologica, idrogeologica e sismica dei PGT) che sovracomunale (PTCP Provincia di Bergamo, PAI e PGRA).
- b) **Rilevamento geologico e geomorfologico** con restituzione cartografica alla scala 1:5.000 di rilievo geologico strutturale e geomorfologico con evidenziati i principali elementi di dinamica geomorfologica attivi e quiescenti presenti nell’area di indagine e di **rilevamento geomeccanico** (per gli affioramenti rocciosi ritenuti più significativi sono state compilate delle schede monografiche di affioramento per un numero totale di 8 schede) effettuate negli areali dei sottobacini sopracitati.
- c) **Valutazione della granulometria dei depositi presenti** lungo gli alvei dei sottobacini in esame e nelle aree di accumulo prospicienti l’invaso in esame sia dal lato della Valle di Cassiglio e dei suoi affluenti principali (Valle Gazonera e Valle Canale del Chignolo) sia dal lato della Valle dei Faggi. Tale valutazione ha consentito la stesura di 8 schede di analisi granulometrica punto di partenza per le valutazioni sulla tipologia di materiale movimentabile nei corsi d’acqua in esame e sulle volumetrie effettivamente movimentate e sedimentate nell’area di invaso.
- d) **Stima del volume medio di materiale solido sedimentatosi in un anno nell’invaso in esame e valutazione del volume totale di materiali accumulatisi nell’ottica delle attività di svaso per il ripristino delle condizioni ottimali di gestione dell’invaso stesso**
- e) **Campagna di indagini geofisiche mediante tecnica “Tomografia sismica a rifrazione (in onde P)” e mediante metodologia MASW / ReMi oltre che mediante acquisizioni di misure puntuali di rumore sismico ambientale di tipo HVSR** comprensiva di acquisizione dati, elaborazione, interpretazione e stesura dei report tecnici e da effettuarsi nei tratti ritenuti più significativi nell’area di fondovalle afferente all’invaso in esame.

Scopo principale della campagna di indagini geofisiche è quello di investigare il sottosuolo per una profondità di 20 - 30 onde per permettere di discretizzare la presenza delle diverse lenti di depositi quaternari presenti e di individuare la profondità del substrato roccioso e la tipologia dello stesso anche nell'ottica di fornire utili indicazioni per la quantificazione dei volumi di sedimento presenti ed in funzione di fornire indicazioni circa la stabilità dei versanti dell'invaso in esame in caso di suo svaso.

f) **Stesura della presente relazione geologica e tecnica finale, degli elaborati cartografici e degli Allegati tecnici di seguito elencati:**

- **Tav. 01:** Carta Geologica e strutturale (scala 1:5.000).
- **Tav. 02:** Carta Geomorfológica e della dinamica geomorfologica (scala 1:5.000).
- **Tav. 03:** Carta delle pendenze e dell'acclività di versante (scala 1:5.000).
- **Tav. 04:** Carta dell'Uso del suolo e della copertura vegetazionale (scala 1:5.000).
- **Allegato A:** Schede di sezioni d'alveo rilevate.
- **Allegato B:** Schede analisi geomeccanica affioramenti rocciosi.
- **Allegato C:** Schede di valutazione speditiva della granulometria del materiale in alveo.
- **Allegato D:** Report misure di rumore sismico ambientale con metodologia HVSR.

2. FASE DI RACCOLTA DATI

2.1. Componente geologica, idrogeologica e sismica vigente del Piano di Governo del Territorio del Comune di Cassiglio (BG).

L'area interessata dalla presente indagine rientra esclusivamente nell'ambito del territorio comunale di Cassiglio nell'ambito del quale risulta attualmente vigente la seguente documentazione di natura geologica e più precisamente:

- “Componente geologica ed ambientale per la pianificazione territoriale a livello comunale” dell'Ottobre 2000 a cura del dott. Geol. Marco Maggi (O.G.L. 826);
- “Adeguamento della componente geologica, idrogeologica e sismica del Piano di Governo del Territorio ai sensi della L.R. 11-03-2055 n. 12” del Febbraio 2013 a cura del dott. Geol. Alessandro Chiodelli (O.G.L. 1361AP – sezione A).

Dalla verifica della documentazione sopracitata e con particolare attenzione per gli aspetti che maggiormente impattano sulla tipologia di attività da effettuarsi per gli scopi della presente relazione si evince, per l'area afferente all'invaso di Cassiglio la seguente situazione:

- Nella Carta Geomorfologica (Tav. 2 “Carta Geomorfologica – scala 1:10.000) di cui si riporta uno stralcio in figura 2 sono riportate tutte le informazioni relative alle “Forme ed ai processi gravitativi” individuati nonché alle “Forme ed ai processi di origine glaciale”, “Forme e processi di tipo crionivale” e di origine antropica.
- Nella Carta Idrologica e Idrogeologica (Tav. 3 “Carta Idrologica e Idrogeologica – scala 1:10.000) di cui si riporta uno stralcio in figura 3 sono riportate tutte le informazioni relative ai “Corsi d'acqua a carattere permanente” nonché i “Corsi d'acqua a carattere stagionale” quali la Valle dei Faggi, Valle di Cassiglio e alta Valle di Chignolo oltre alla presenza di eventuali sorgenti captate dall'acquedotto e le indicazioni relative alla presenza di opere di regimazione lungo i corsi d'acqua dei bacini in esame.
- Nella Carta del dissesto con legenda uniformata PAI (Tav. 7 “Carta del dissesto con legenda uniformata PAI – scala 1:10.000 – aggiornamento 2013) di cui si riporta uno stralcio in figura 4 sono rappresentati tutti i dissesti derivanti dalle osservazioni di terreno e dagli strumenti di pianificazione sovraordinata con relativi aggiornamenti.
- Nella Carta dei Vincoli di natura geologica (Tav. 8a e 8b “Carta dei Vincoli di natura geologica – scala 1:5.000 – aggiornamento 2013) di cui si riporta uno stralcio in figura 5 sono rappresentati tutte le tipologia di vincolo di natura geologica presenti e riferibili ai vincoli di Polizia Idraulica, alla presenza delle aree di salvaguardia della captazioni ad uso idropotabilee dei vincoli derivanti dalla pianificazione di bacino (PAI).

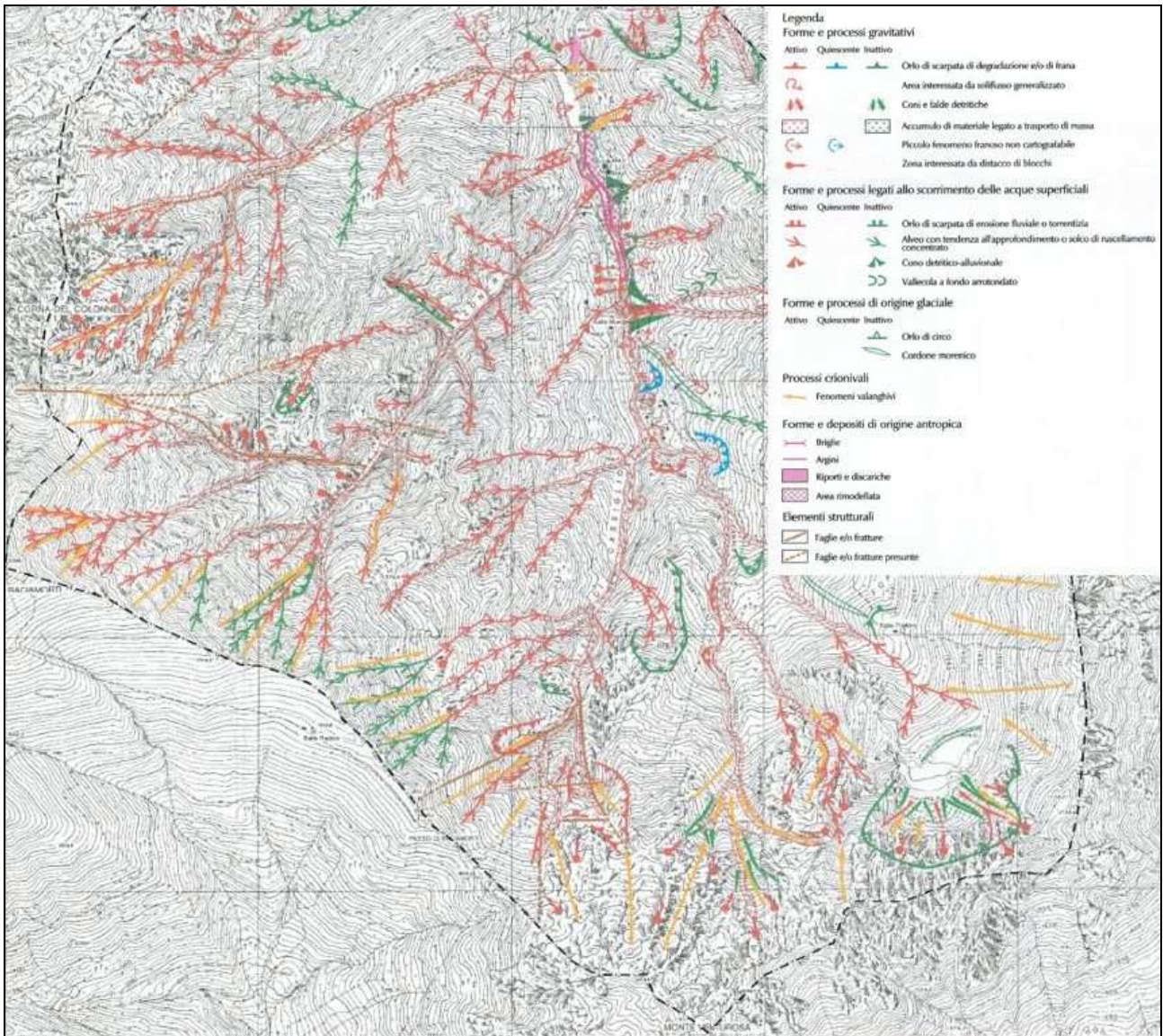


Fig. 2: stralcio della “Carta geomorfologica del PGT di Cassiglio” relativa alle aree dei bacini idrografici afferenti all’invaso di Cassiglio.

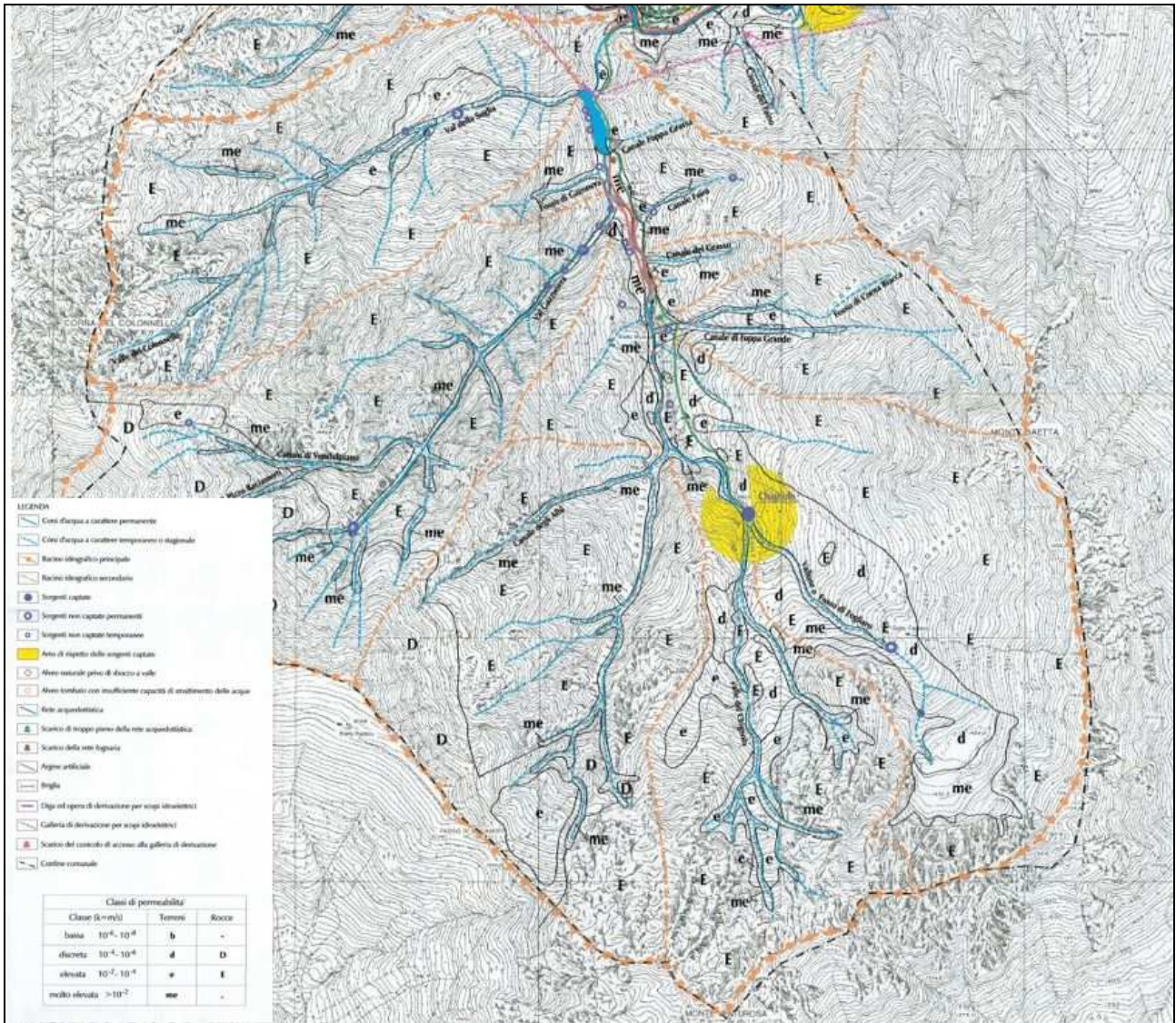


Fig. 3: stralcio della “Carta idrologica-idrogeologica del PGT di Cassiglio” relativa alle aree dei bacini idrografici afferenti all’invaso di Cassiglio.

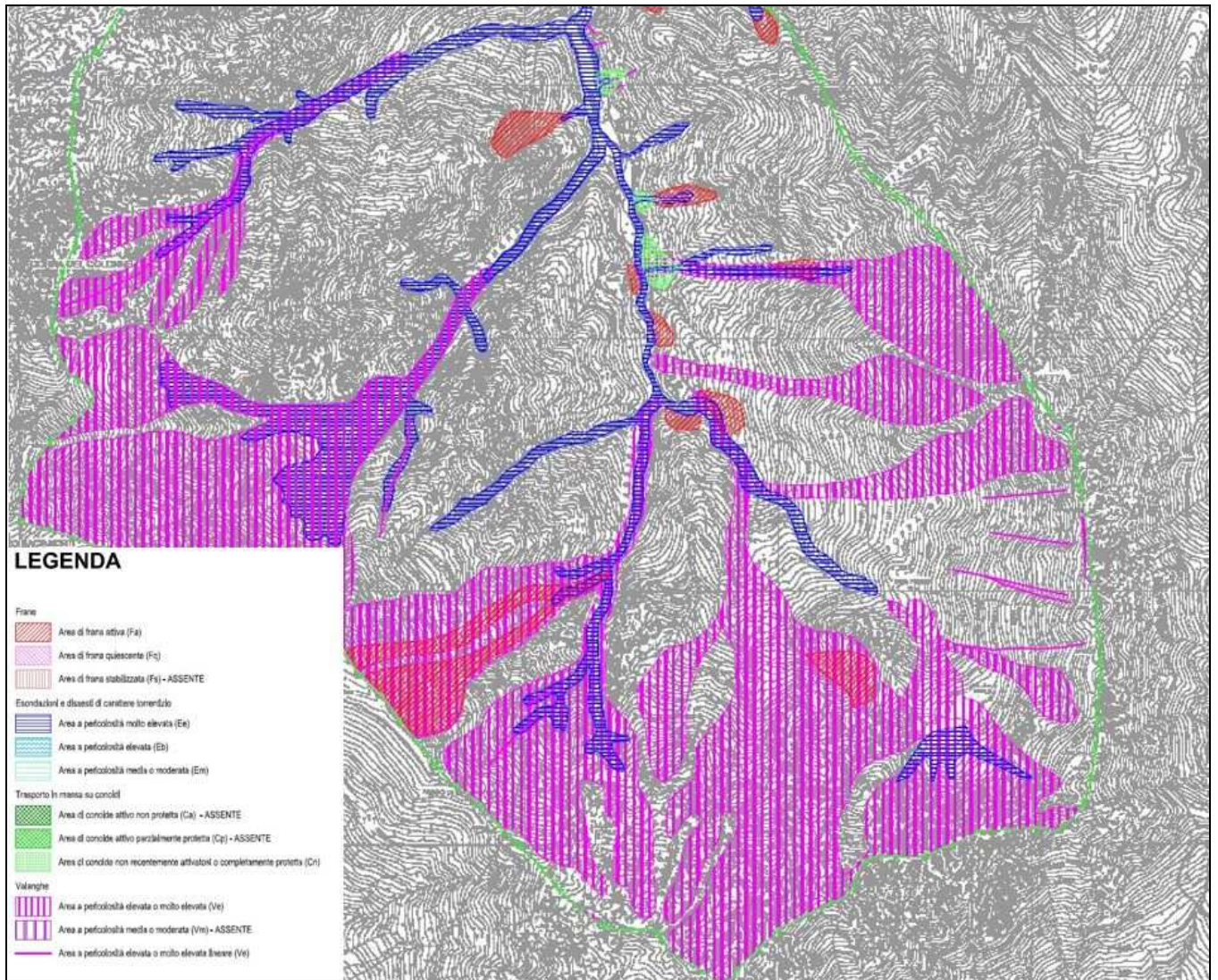


Fig. 4: stralcio della “Carta del dissesto con legenda uniformata PAI del PGT di Cassiglio” relativa alle aree dei bacini idrografici afferenti all’invaso di Cassiglio.

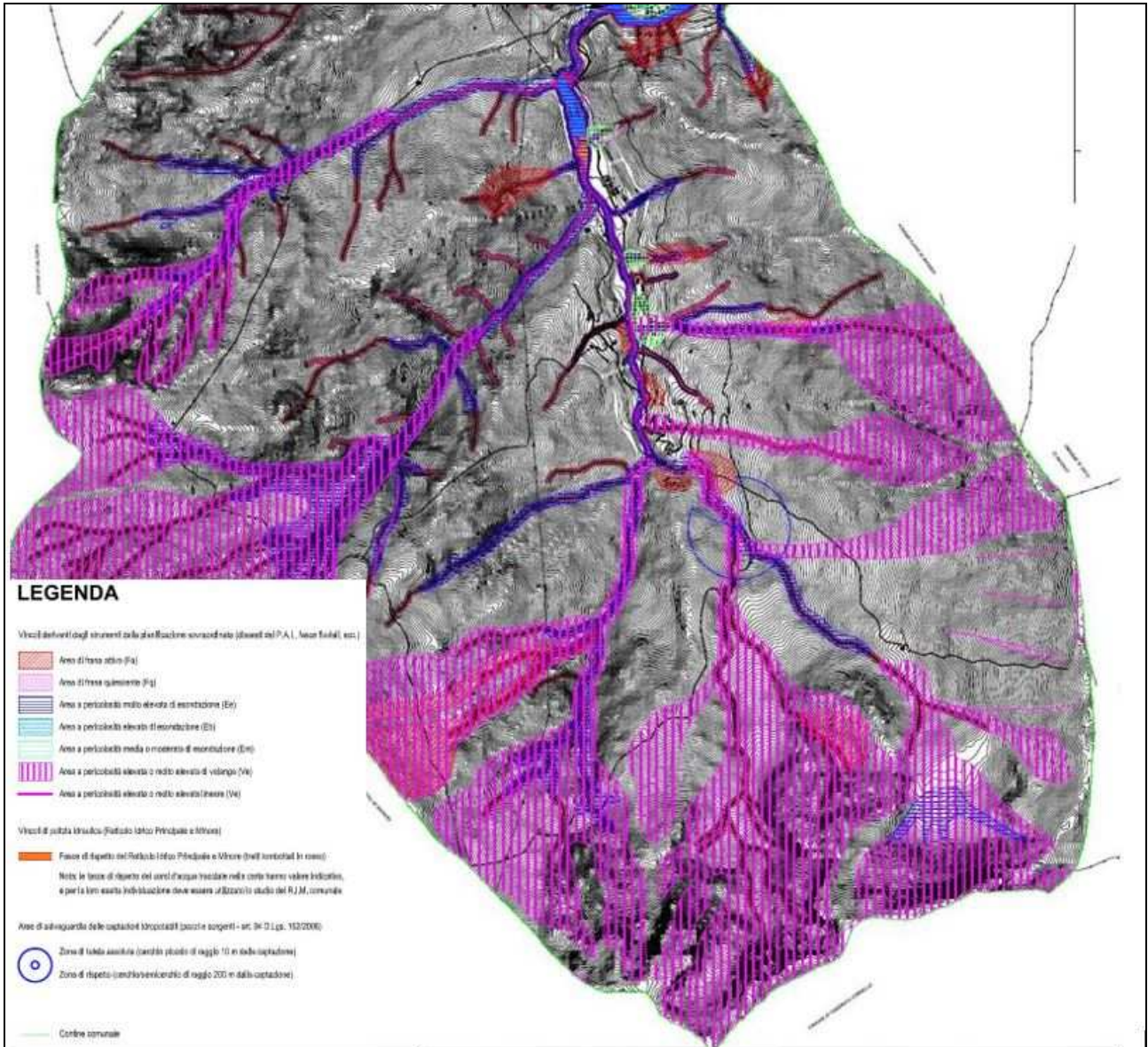


Fig. 5: stralcio della “Carta dei Vincoli geologici del PGT di Cassiglio” relativa alle aree dei bacini idrografici afferenti all’invaso di Cassiglio.

2.2. Aree a rischio idrogeologico molto elevato derivanti dalla classificazione del Piano di Gestione Rischio Alluvione nel bacino del Fiume Po (PGRA) per l'area in esame

A seguito della pubblicazione della D.G.R. X/6778 del 19 Giugno 2017 “ Disposizioni regionali concernenti l'attuazione del piano gestione dei rischi di alluvione (PGRA) nel settore urbanistico e di pianificazione dell'emergenza ai sensi dell'art. 58 delle norme di attuazione del piano stralcio per l'assetto idrogeologico (PAI) del bacino del fiume Po così come integrate dalla variante adottata in data 7 dicembre 2016 con deliberazione n. 5 del comitato istituzionale di bacino del fiume Po”, nell'ambito del territorio regionale è entrato in vigore il Piano di Gestione Rischio Alluvione (PGRA).

Quest'ultimo è stato predisposto dall'Autorità di Bacino del Fiume Po (Ora Distretto Idrografico) di comune accordo con le Regioni interessate, in attuazione del D. Lgs. 49/2010 di recepimento della Direttiva 2007/60/CE (nota come “Direttiva Alluvioni”) ed è stato adottato con deliberazione n. 4 del 17/12/2015, approvato con deliberazione n. 2 del 03/03/2016 e n. 5 del 07/12/2016 dal Comitato Istituzionale dell'Autorità di Bacino del fiume Po e successivamente con DPCM 27/10/2016 (pubblicato sulla Gazzetta Ufficiale n. 30 del 6 Febbraio 2017). Nel Piano vengono individuate le aree potenzialmente esposte a pericolosità per alluvioni e viene stimato il grado di rischio al quale sono esposti gli elementi che ricadono entro tali aree “alluvionabili”. Dalla consultazione della cartografia allegata al PGRA, l'area in esame è contraddistinta dalla presenza di criticità riferibili ad area di Pericolosità relative al Reticolo Secondario con individuazioni di diversi elementi antropici di rischio fra cui ovviamente anche la diga dell'invaso in questione (vedi Fig. 6 e 7).



Fig. 6: stralcio della mappa di pericolosità del PGRA relativa alle aree dei bacini idrografici afferenti all'invaso di Cassiglio.

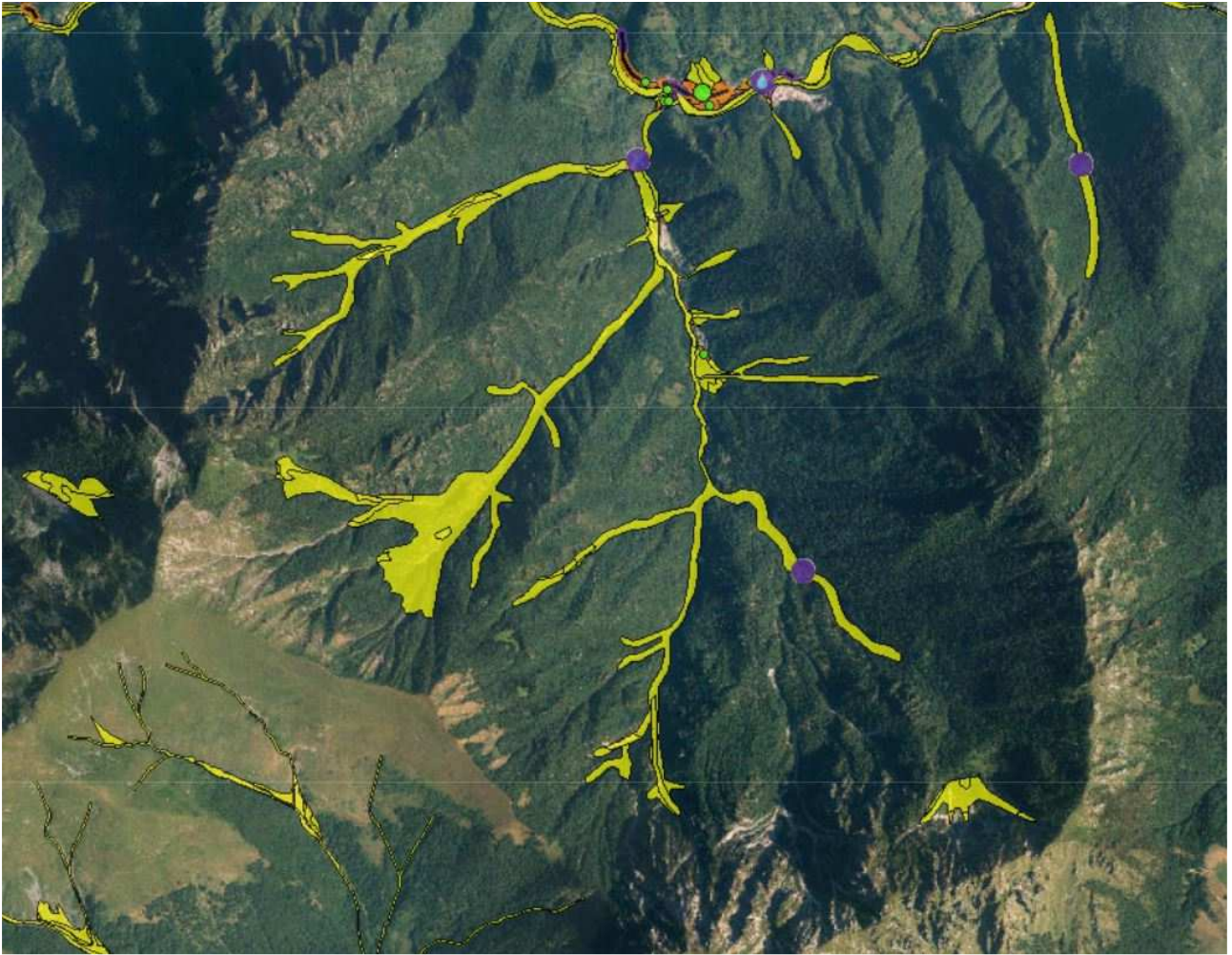


Fig. 7: stralcio della mappa del rischio del PGRA relativa alle aree dei bacini idrografici afferenti all'invaso di Cassiglio.

2.3. Aspetti idrologici ed idraulici per l'area in esame

Da informazioni di carattere bibliografico fornite dal Committente nel presente paragrafo si forniranno le informazioni relative agli aspetti idrologici ed idraulici per i bacini esaminati integrandoli con le informazioni riportate del database SIBCA di Regione Lombardia per quanto riguarda le informazioni riguardanti trasporto solido e potenzialità di fenomeni di trasporto in massa / debris flow.

2.3.1. Bacino Idrografico (da documentazione tecnica Committente)

Il torrente Cassiglio alla sezione dell'omonima diga, è alimentato da un bacino imbrifero di soli 11 Km² così delimitato:

- A Est da Pizzo Mezzodi (1713 m s.l.m.)
- A Sud da Monte Venturosa (1999 m s.l.m.), Passo Baciamenti (1603 m s.l.m.), Pizzo Baciamenti (1991 m s.l.m.)
- A Ovest da Corna del Colonnello (1739 m s.l.m.).

Le principali caratteristiche geografiche, morfologiche e idrologiche del suddetto bacino imbrifero sono le seguenti:

superficie (A)	11 Km ²
Perimetro del poligono di chiusura (P)	13 Km
Orientamento prevalente	SN
Altitudine massima (H _{max})	1999 m s.l.m.
Altitudine della sezione di chiusa	608 m s.l.m.
Lunghezza dell'asta principale (L _{max})	3,4 Km

All'invaso è allacciato anche il bacino imbrifero del torrente Stabina che alimenta l'invaso di Cassiglio. Il bacino imbrifero che alimenta la presa sullo Stabina ha un'estensione di 57 Km² ed è così delimitato:

- A Nord da Bocca di Trona, Lago Piazzotti (2213 m s.l.m.), Passo di Salmurano (2020 m s.l.m.);
- A Est da Monte Valletto (2370 m s.l.m.), Monte Avaro (2088 m s.l.m.), Pizzo di Cusio (1464 m s.l.m.);
- A Sud da Monte Aralalta (2003 m s.l.m.), Bocchetta di Regadur (1882 m s.l.m.), Monte Sodadura (2010 m s.l.m.), Cima di Piazza (2057 m s.l.m.);
- A Ovest da Zuccone dei Campelli (2158 m s.l.m.), Cima di Camisolo, Pizzo dei Tre Signori (2553 m s.l.m.).

Le principali caratteristiche geografiche, morfologiche e idrologiche del suddetto bacino imbrifero sono le seguenti:

superficie (A)	57 Km ²
Perimetro del poligono di chiusura (P)	34 Km
Orientamento prevalente	OE

Altitudine massima (H_{max})	2553 m s.l.m.
Altitudine della sezione di chiusa	630 m s.l.m.
Lunghezza dell'asta principale (L_{max})	6 Km

2.3.2. Portate disponibili e d'impianto (da documentazione tecnica Committente)

Per la valutazione del regime idrologico del corso d'acqua sono state analizzate le registrazioni orarie dei livelli d'acqua nel bacino a partire dal 2001. Conoscendo la quota e lo sviluppo dello sfioratore e l'altezza di sfioro, è stata calcolata la portata in ingresso, tenendo conto che il gruppo idroelettrico, in occasione di portate d'acqua eccedenti la massima dell'impianto, turbinò l'intera portata nominale (2,90 m³/s). Per semplice differenza si ha:

$$Q_{ingresso} = Q_{sfioro} + Q_{impianto}$$

La disponibilità in questo caso di misure dirette rappresenta un'informazione preziosa e comunque più attendibile di uno studio a carattere regionale, ovvero compiuto sulla base di dati riguardanti bacini limitrofi, anche in considerazione della scarsità di dati generalmente disponibili per le valutazioni in campo idrologico, le quali spesso vengono necessariamente condotte utilizzando informazioni indirette.

Altezza di sfioro sullo sfioratore a quota 626 m s.l.m. (cm)	Portata in ingresso (m ³ /s)
5	3,20
10	3,93
15	4,87
20	5,99
25	7,65
30	8,65
55	17,63
60 ¹	19,35
95 ²	35,78

Tabella 1 – Portate in ingresso nel bacino di Cassiglio ⁽¹⁾ Registrato il 13 aprile 2002 ⁽²⁾ Registrato il 5 maggio 2002.

Dalle registrazioni dei peli d'acqua risulta che presso la diga di Cassiglio si hanno sfiori dell'entità di circa 5 cm per 7 mesi all'anno per una durata di circa tre giorni.

2.3.3. SIBCA (Sistema Informativo Bacini e Corsi d'Acqua) – Regione Lombardia

In considerazione del fatto che il corso d'acqua del torrente della Valle di Cassiglio (Cassiglio e valle Gazonera) oltre che il torrente della Valle dei Faggi risultano inseriti nell'elenco dei corsi d'acqua di competenza regionale in quanto appartenente al Reticolo Idrico Principale di Regione Lombardia come indicato nella D.G.R. 7581/2017, qui di seguito si

riportano in forma tabellare le informazioni ed i dati relativi sia al corso d'acqua del torrente Valle di Cassiglio propriamente detto che al corso d'acqua relativo alla Valle dei Faggi (o Canale dei Faggi) così come riportate nel database SIBCA di Regione Lombardia.

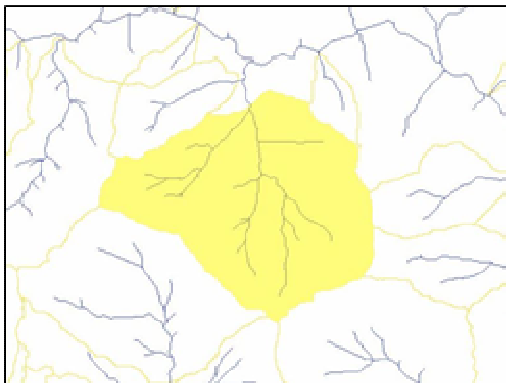
	Nome bacino	B125
	Codice CT10	31088
	Portata TR50 (m³/s)	34,80368
	Portata TR100 (m³/s)	37,99683
	Portata TR200 (m³/s)	Non riportata
	Portata Iskowski (m³/s)	36,57
	Magnitudo Bottino (m³)	39537,49158
	Magnitudo D'Agostino (m³)	42665,01854
	Magnitudo Ceriani (m³)	Non riportata
	Magnitudo Bianco (m³)	79685,38184
	Coefficiente deflusso	0,34694
	Indice franosità	1,25772
	Densità drenaggio (1/Km)	3,86286
	Lunghezza totale idrografia (Km)	35,5306
	Distanza max reticolo coprente (Km)	3,9954
	Area planimetrica (Km²)	9,198
	Area effettiva (Km²)	17,92678
	Rapporto aree	0,51308
	Indice Melton	0,4491
	Pendenza media bacino (m/m)	0,75985
Quota max bacino (m slm)	1997,2	
Quota minima (m slm)	635,15	
Quota media (m slm)	1258,38	

Fig. 8: individuazione sottobacino Valle di Cassiglio e dati morfologici e idraulici disponibili da database SIBCA Regione Lombardia.

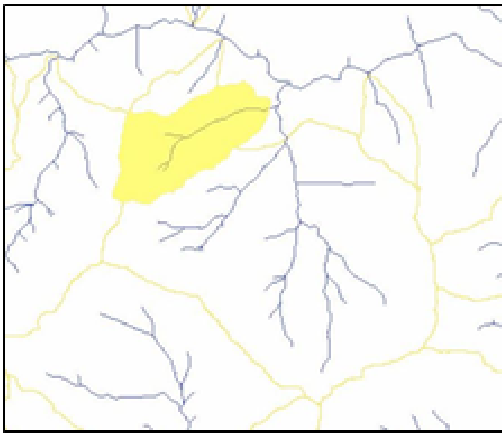
	Nome bacino	B126
	Codice CT10	30616
	Portata TR50 (m³/s)	11,49124
	Portata TR100 (m³/s)	12,56591
	Portata TR200 (m³/s)	Non riportata
	Portata Iskowski (m³/s)	8,26
	Magnitudo Bottino (m³)	24772,41617
	Magnitudo D'Agostino (m³)	14580,65888
	Magnitudo Ceriani (m³)	Non riportata
	Magnitudo Bianco (m³)	25552,42576
	Coefficiente deflusso	0,37147
	Indice franosità	1,10025
	Densità drenaggio (1/Km)	3,56541
	Lunghezza totale idrografia (Km)	6,1753
	Distanza max reticolo coprente (Km)	2,56228
	Area planimetrica (Km²)	1,732
	Area effettiva (Km²)	3,7394
	Rapporto aree	0,46317
	Indice Melton	0,86915
	Pendenza media bacino (m/m)	0,84878
Quota max bacino (m slm)	1773,67	
Quota minima (m slm)	629,82	
Quota media (m slm)	1132,45	

Fig. 9: individuazione sottobacino Valle Canale dei Faggi e dati morfologici e idraulici disponibili da database SIBCA Regione Lombardia.

3. INQUADRAMENTO GENERALE DELLA ZONA DI INDAGINE

3.1. Localizzazione geografica

L'area analizzata nel presente studio si sviluppa quasi esclusivamente nel territorio comunale di Cassiglio (BG) comune situato nella media Valtorta percorsa dal torrente Stabina e affluente di destra del Brembo di Mezzoldo in alta Val Brembana. Nello specifico del territorio in esame questo risulta afferente all'invaso di Cassiglio e delimitato nelle porzioni sommitali dai contrafforti rocciosi che dal Pizzo Baciarmorti (2009m slm nel Massiccio dell'Aralalta) ad Ovest passano verso Est per il Monte Venturoso (1999m slm) per Pizzo di Mezzodi (1713m slm) per chiudersi con la cima di Monte Saetta (1538m slm, Fig. 10).



Fig. 10: Individuazione area d'interesse.

3.2. Inquadramento geologico e tettonico generale

L'area oggetto dello studio si posiziona all'interno di un contesto geologico abbastanza complesso, originato da diversi fenomeni tettonico-deformativi che hanno contribuito alla formazione delle litologie presenti, come si evince dalla consultazione del foglio CARG 076 "Lecco". Da un punto di vista geologico il territorio in esame è interessato dalla presenza in affioramento dai litotipi afferenti alla formazione litostratigrafica della Dolomia Principale nell'ambito di una porzione dell'unità strutturale del "Parautoctono delle Prealpi Lombarde" (Fig. 11), la quale rappresenta un potente spaccato unitario di crosta superiore, che si estende dal Norico al Giurassico Inferiore, interessata da complesse deformazioni fragili, in parte assorbite dalla deformazione duttile-fragile della successione di ambiente bacinale, come si evince in zone al di fuori dell'area di indagine (es. Valle Imagna). Quest'unità strutturale risulta limitata a nord e separata

dall'unità strutturale dell'Anticlinale Orobica dalla presenza del lineamento tettonico della Faglia di Valtorta mentre lineamenti tettonici secondari la separano dalle diverse Unità strutturali presenti (Unità alloctone Anisico-Ladinico, Unità Anisico – Carniche di alloctonia incerta e Unità alloctone Noriche).

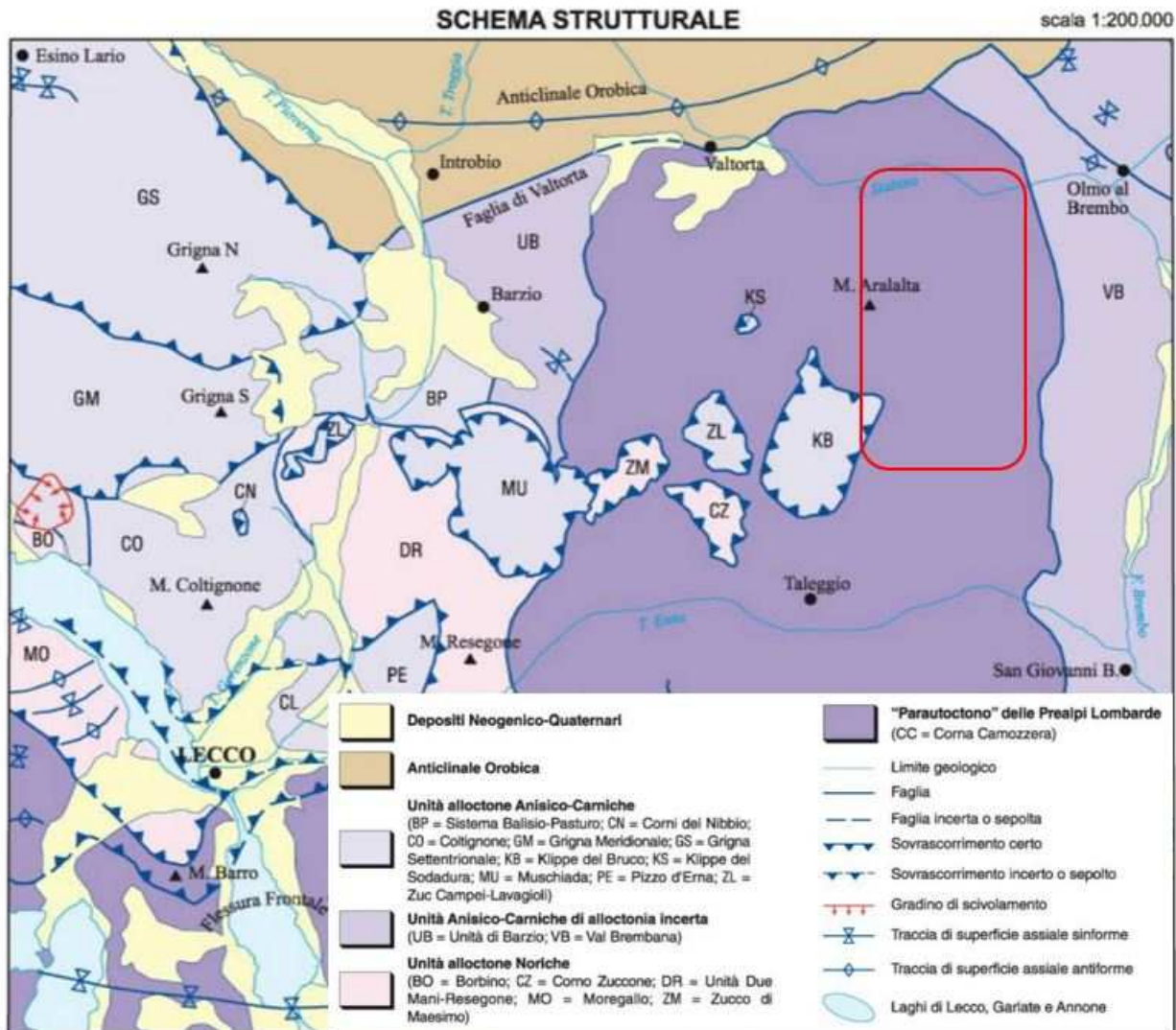


Fig. 11: schema di inquadramento tettonico e strutturale con ubicazione areale di indagine (da Foglio CARG 076 "Lecco").

Quest'area ricade interamente nel dominio strutturale delle Alpi Meridionali o Sudalpino e il suo assetto geologico è stato determinato dall'orogenesi alpina, ovvero dalla collisione dei margini della placca europea con quella africana (o Adria) dopo la chiusura dell'oceano Tetide che le separava, e dall'attività tettonica successiva che vede per l'areale in esame e l'applicazione del metodo delle sezioni bilanciate consente di stimare un raccorciamento complessivo in senso N-S, legato alla tettonica Alpina di accavallamento, nell'ordine degli 80Km. L'applicazione del metodo su una serie di transetti nell'ambito delle Alpi Meridionali consente di correlare temporalmente le maggiori fasi di deformazione e di datarle, in

senso relativo, rispetto all'intrusione del batolite dell'Adamello. Con questo procedimento indiretto è possibile stimare che, nell'area del Foglio CARG in esame, 24Km di raccorciamento crostale sono prodotti in tempi pre-Adamello ("fase Eoalpina" e "Mesoalpina") mentre i rimanenti 56Km sarebbero da ricondurre a una tettonica post-Adamello ("Fase neoalpina").

Per quanto attiene all'evoluzione paleogeografica del contesto in esame si inserisce nell'ambito di quella del settore centrale dell'area del Foglio CARG Lecco e che si estende grosso modo dall'allineamento "Prato S. Pietro – Introbio – **Valtorta – Averara**" sino all'allineamento "Civate-Galbate-Carenno" e che è contraddistinto da litotipi sedimentari di età mesozoica, tra i quali prevalgono le dolomie e i calcari del Triassico ed i calcari selciferi del Giurassico. L'evoluzione di questa parte della successione ha inizio nel Triassico medio (Anisico), quando una baia marina a sedimentazione carbonatica (Calcare di Angolo) riceveva ancora cospicui apporti terrigeni dal basamento metamorfico esposto a NO (Formazione di Bellano). Una successiva ingressione marina, nell'Anisico superiore, porta al progressivo esaurimento degli apporti terrigeni e all'impostarsi di una grande piattaforma carbonatica (calcare di Esino, Ladinico), disarticolata da solchi intrapiattaforma in cui si deponevano torbiditi calcaree (calcare di Perledo-Varenna), talora miste a detrito neovulcanico (Formazione di Buchenstein, Formazione di Wengen). Una superficie di emersione, localmente mineralizzata a piombo e zinco (Piani Resinelli), segna la sommità del Calcare di Esino e il passaggio al Carnico, caratterizzato dapprima da facies di piattaforma carbonatica poco profonda (Formazione di Breno, Calcare Metallifero Bergamasco) e poi dalla progradazione di un apparato deltizio-lagunare (arenaria di Val Sabbia, formazione di Gorno) legato all'impostarsi di un arco vulcanico a S. Il ritorno a condizioni di piattaforma, è testimoniato dalla complessa associazione litologica della Formazione di San Giovanni Bianco. Con il Norico torna ad affermarsi una grande piattaforma carbonatica (Dolomia Principale), il cui annegamento, con deposizione di sedimenti per lo più lutitici su fondali scarsamente ossigenati (**Gruppo dell'Aralalta**), è interpretato come un prodromo della futura apertura della Tetide Alpina. Una lenta tendenza regressiva segna tuttavia il progressivo ritorno a facies di piattaforma carbonatica poco profonda (Calcare di Zù, Formazione dell'Albenza già Dolomia a Conchodon, Norico sommitale – Hettangiano inferiore) e solo con il Calcare di Sedrina (Hettangiano) riprendono i segnali di quell'annegamento che diventerà definitivo a partire dal Sinemuriano, come testimonia la cospicua massa di calcari selciferi del Gruppo del Medolo.

Nel settore in esame le forti differenze reologiche che interessano i litotipi della successione triassica hanno avuto un ruolo chiave nella strutturazione della pila di sovrascorrimenti alpini, determinando nell'insieme una tettonica di tipo *thimskinned*. I piastroni carbonatici del Calcare di Esino e della Dolomia Principale hanno infatti accusato una deformazione interna, che si concentra sotto forma di faglie inverse (rampe) lungo i passaggi laterali di facies e i limiti piattaforma-bacino, mentre le formazioni evaporitiche (Carniola di Bovegno e Formazione di San Giovanni Bianco) e le argilliti norico-retiche hanno agito da lubrificanti tettonici, favorendo l'impostarsi di superfici di accavallamento piane (flats) nell'ambito di edifici a *thrust* limitati alla crosta superiore e con geometria d'insieme tipo *ramp-and-flat*.

3.3. Inquadramento geologico e stratigrafico di riferimento.

Per quanto riguarda il contesto geologico e stratigrafico di riferimento per l'area in esame, dalla documentazione relativa al Foglio CARG 076 "Lecco" nonché dalle informazioni desunte dal geoportale della Provincia di Bergamo e della Regione Lombardia si può asserire che nell'area in esame risulterebbero affiorare principalmente i litotipi riferibili al **Gruppo dell'Aralalta** (vedi figura 12) e più precisamente:

- **Dolomia Principale (DPR e DPR₅)**: Trattasi di Dolomicriti e doloareniti (DPR) da grigio-scure a biancastre, da microcristalline a saccaroidi. Strati spessi e sovente poco distinti, organizzati in ciclotemi. Frequenti livelli con laminazione stromatolitica, intercalazioni di livelli di breccie intraformazionali, i banchi doloarenitici sono frequentemente bioclastici. Locali biocostruzioni (Ostreidi, Serpulidi e microbialiti). Depositi di piana carbonatica peritidale con spessore tra 900 e 1500m. Il Membro inferiore (DPR₅) è caratterizzato da dolomicriti e subordinatamente doloareniti di colore da grigio scuro a nerastro, con laminiti algali a stratificazione sottile. A Cassiglio rare breccie intraformazionali e rarissimi straterelli arenacei (DPR₅). Norico inferiore – medio.
- **Dolomie Zonate (DZN e DZN_a)**: Trattasi di Doloruditi a clasti centimetrici e doloareniti laminate e gradate, da grigio-chiaro a nerastro o rosso cupo, in strati medi medi e spessi, fetidi, organizzati in sequenze torbiditiche distali (DZN). Ambiente subtidale entro bacino intrapiattaforma. Spessore 0 – 220m. Litofacies a breccie prevalenti (DZN₂): breccie dolomitiche da grigiastre a ocracee, megabreccie e doloareniti in corpi lenticolari massivi o in strati amalgamati, con olistoliti riccamente bioclastici. Spessori ridotti alla sommità della piattaforma carbonatica, spessori più consistenti e brusche variazioni laterali sui pendii antistanti al margine di piattaforma. Norico medio.
- **Calcarea di Zorzino (ZOR)**: Calcari micritici e calcareniti di colore scuro, ad abbondante sostanza organica, in lamine e strati sottili. Sequenze torbiditiche distali e intercalazioni di marne nere. Localmente abbondanti resti di vertebrati nella parte sommitale. Bacino confinato intrapiattaforma. Spessore 0 – 400m. Norico Medio.

Per quanto riguarda i depositi continentali neogenico – quaternari nelle aree di fondovalle pre-invaso di Cassiglio troviamo lenti di depositi alluvionali o fluvio-glaciali prevalentemente ghiaiosi alternati a depositi di debris flow mentre lungo i versanti o alle pendici degli stessi troviamo depositi di versante con accumuli di fenomeni franosi quasi esclusivamente riferibili all'**Unità Postglaciale del Sistema del Po (Depositi di origine glaciale, di versante, fluviale, lacustre di conoide, palustre e di torbiera, chimici e di ambiente misto – Pleistocene superiore – Olocene)**.

Da ultimo si segnala che la Valtorta di cui la Valle di Cassiglio rappresenta una laterale è una delle valli affluenti di destra del Fiume Brembo, presenta una direzione all'incirca E-W e risulta strutturalmente legata alla Faglia della Valtorta e alla monoclinale immergente a Sud della Dolomia Principale, a differenza delle altre valli la Valtorta è più stretta e presenta versanti ripidi e in gran parte regolari legati al fatto che i versanti sono costituiti da rocce molto più competenti come effettivamente si può evincere in Valle Cassiglio dopo le valli dei sottobacini presenti si sono impostate lungo le

principali fasce di debolezza di tipo duttile e fragile e le morfologie dirupate e pinnacolari sono particolarmente presenti nelle porzioni mediane e sommitali degli stessi sottobacini.

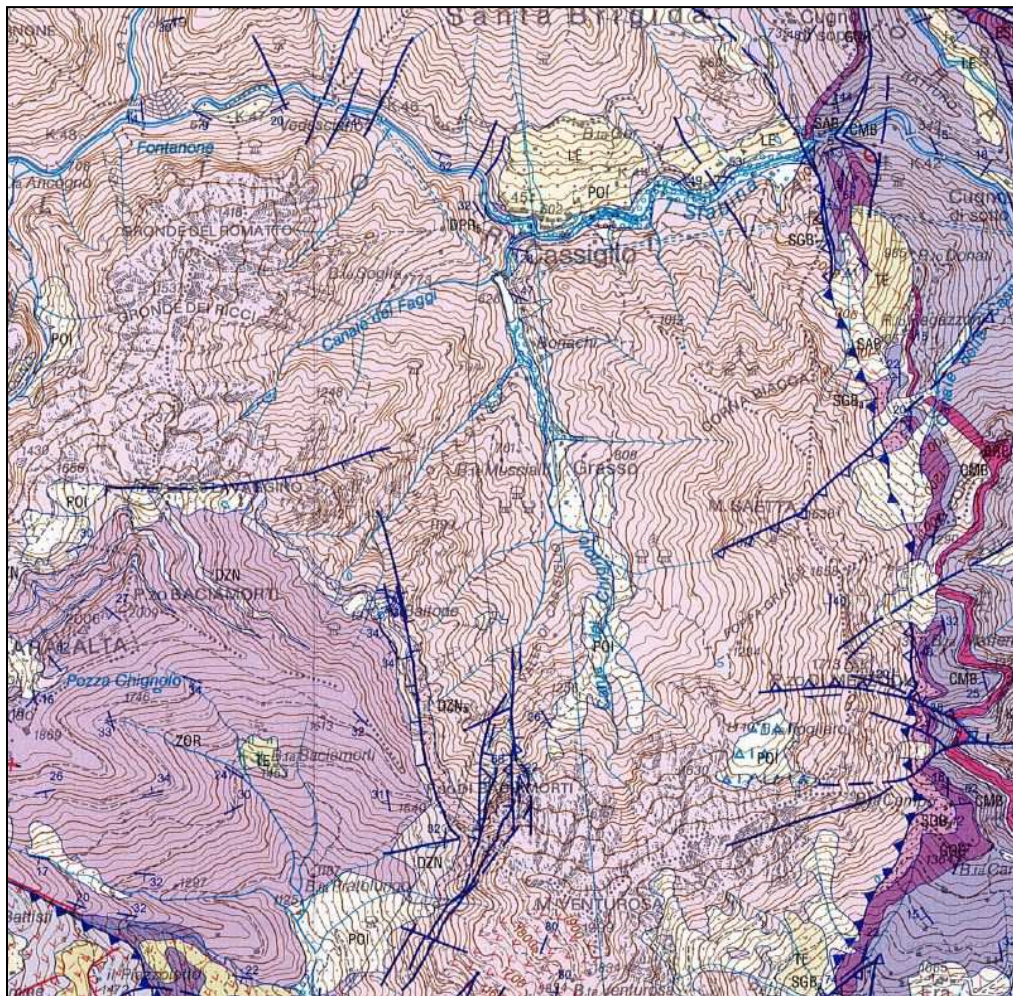


Fig. 12: stralcio carta geologica per l'area di indagine (da Foglio CARG 076 "Lecco").

3.4. Inquadramento climatico e aspetti pluviometrici dell'area in esame.

Per quanto riguarda gli aspetti climatologici si farà prevalentemente riferimento a quanto indicato per l'area di indagine nel volume "Atlante dei climi e microclimi della Lombardia" edito nel 2011 dal Centro Meteorologico Lombardo.

Il clima dell'area di nostro interesse risulta influenzato dalla presenza della barriera orobica, che raggiunge con tre cime i 3000 metri, e fa sì che le correnti settentrionali non apportino mai precipitazioni, e anche le invasioni di aria fredda da est non riescono a penetrare nelle zone più interne delle vallate principali relegando gli eventuali fenomeni alla fascia pedemontana e prealpina prospiciente la Pianura Padana. L'intero complesso orobico è invece sede della maggior concentrazione di inneschi temporaleschi di natura orografica: in qualunque regime di circolazione, se le condizioni termodinamiche sono favorevoli alla convezione, questa si innesca alla testa delle valli bergamasche, favorita dal

surriscaldamento dei versanti esposti al sole nonché dal fatto che si sommano i contributi delle brezze di valle provenienti da sud e da nord. L'area di maggior piovosità è quella più occidentale, comprendente l'alta Val Brembana e i massicci dell'Alben e dell'Arera, grazie all'orientamento delle valli e alla maggiore elevazione delle cime. Secondo quanto riportano gli studi della Comunità Montana della Val Brembana (www.vallebrembana.bg.it) "il rischio idraulico in valle è elevato anche se la presenza di numerosi bacini artificiali a monte permette una buona regimazione delle acque anche in caso di eventi estremi; numerosi inoltre sono stati gli interventi di messa in sicurezza dopo l'alluvione del 1987. Il dissesto è un fenomeno diffuso in tutta la valle; in particolare i principali squilibri sono costituiti da frane di crollo e fenomeni di conoide che interessano centri abitati e infrastrutture".

Secondo i dati forniti dall'Arpa sulle precipitazioni giornaliere (esprese in mm) nell'anno 2017 nella stazione pluviometrica di Piazza Brembana (Fig. 13) presa a riferimento e che risulta essere la più vicina all'area di nostro interesse, in media sono caduti circa 4.9 mm di pioggia al giorno. Come si può notare dal grafico che mostra le precipitazioni riguardanti l'intero anno 2017 i picchi di maggiore intensità di pioggia si hanno nel periodo autunnale e primaverile, tralasciando il picco di maggiore intensità considerato straordinario del 28/06/2017.

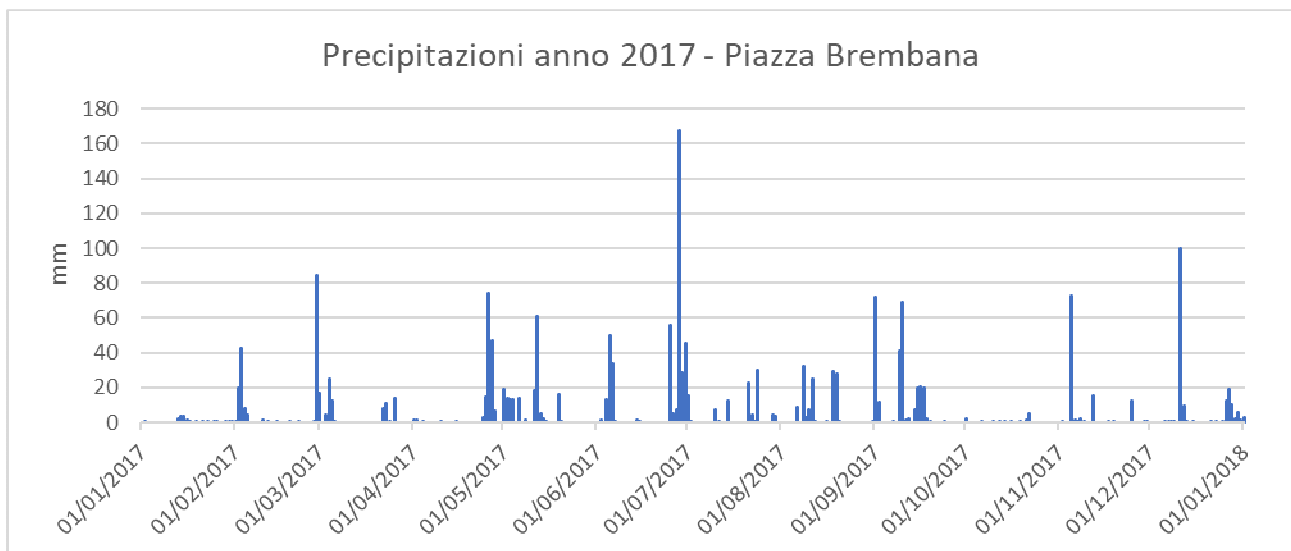


Fig. 13: Regime precipitazionale alla stazione pluviometrica di Piazza Brembana per l'anno 2017 (ARPA Lombardia).

4. RILEVAMENTO GEOLOGICO – STRUTTURALE E GEOMORFOLOGICO DI DETTAGLIO E ALTRE ATTIVITÀ DI TERRENO.

4.1. Inquadramento generale

Il contesto geologico strutturale dell'area di indagine vede la presenza quasi continuativa, in tutto l'areale investigato, di affioramenti rocciosi afferenti alla formazione litostratigrafica della "Dolomia Principale" che con continuità affiora uniformemente partendo dal fondovalle principale e lungo i pendii dei versanti orografici contigui con l'eccezione delle porzioni apicali sia della Valle dei Faggi, della Valle Gazonera e della Valle di Cassiglio, dove si rinvenivano litotipi afferenti alla formazione litostratigrafica delle Dolomie Zonate e del calcare di Zorzino mentre nella valle afferente al Canale del Chignolo si conferma la presenza di affioramenti rocciosi riferibili alla Dolomia Principale anche per le porzioni sommitali del sottobacino idrografico.

L'attività di rilevamento ha permesso la realizzazione delle seguenti carte geologiche di dettaglio e più precisamente:

- Tav. 01: Carta Geologica e strutturale (scala 1:5.000);
- Tav. 02: Carta Geomorfologica e della dinamica geomorfologica (scala 1:5.000);
- Schede di sezione d'alveo rilevate (Allegato A);
- Schede di analisi geomeccanica degli affioramenti rocciosi (Allegato B);
- Schede di valutazione speditiva della granulometria del materiale in alveo (Allegato C).

Tutte le informazioni derivanti dalle attività di rilevamento sul terreno e sintetizzate nelle tavole e negli allegati precedentemente elencati rappresenteranno il punto di partenza per l'applicazione del metodo di Gavrilovic – Zemljic mediante il quale si procederà con la determinazione della stima del volume medio di materiale solido che si sedimenta in un anno nel serbatoio in esame e con la valutazione del quantitativo totale di depositi presenti e da asportare per ripristinare la piena funzionalità del bacino idroelettrico in esame (vedi paragrafi 4.5 – 4.11).

4.2. Analisi strutturale e geologica di versante

Dalla disamina delle schede di affioramento si è potuto constatare come la fratturazione degli ammassi rocciosi sia sostanzialmente dominata dalla presenza di quattro superfici di discontinuità principali e non sempre contemporaneamente presenti: la superficie S0 coincide con la stratificazione, presenta immersioni prevalentemente distribuite fra il quadrante di NE ed il quadrante di SE e solo secondariamente presenta giaciture immergenti a NW e SW mentre le inclinazioni degli strati variano fra i 30 e gli 80 gradi; a seguire si ritrova la famiglia di fratture K1, la quale possiede immersioni prevalenti verso S e SE (variabile da 140 a 180 gradi nord) e presenta inclinazioni comprese in un range di variabilità fra i 50 e gli 80 gradi; la famiglia K2, la quale possiede immersioni prevalenti verso il quadrante di NE e secondariamente verso il quadrante di NW e presenta inclinazioni variabili fra i 40 e gli 80 gradi; segue la terza

famiglia di fratture K3, con immersioni prevalenti verso il quadrante a NW e inclinazioni maggiormente variabili rispetto alle prime famiglie e comprese fra 20 e 75 gradi (Fig. 14).

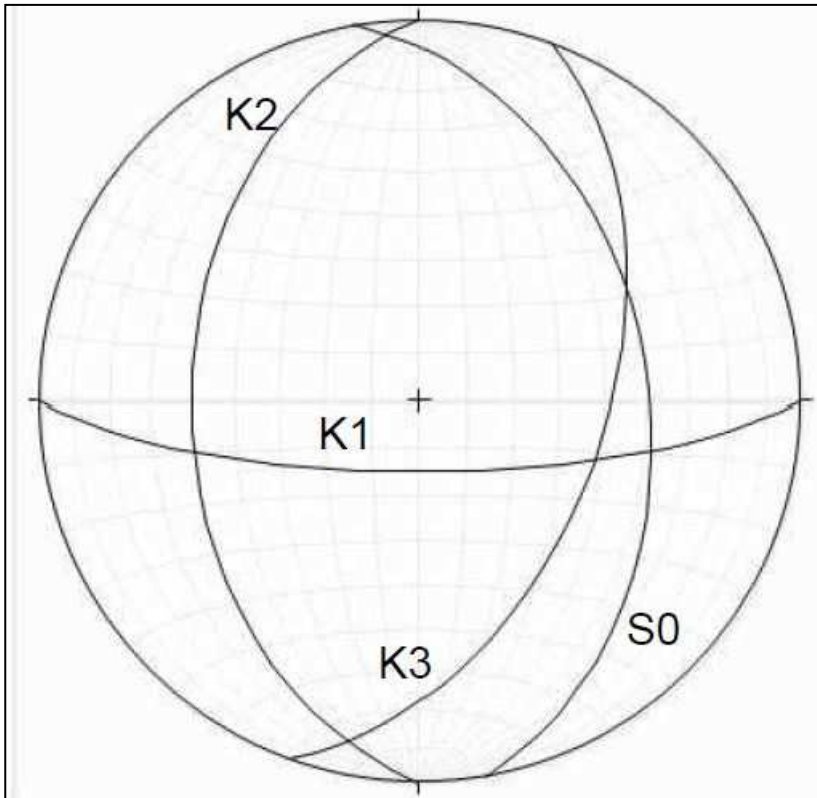


Fig. 14: esempio di proiezione stereografica esemplificativa dei principali set di fratture presenti.

Importante è sottolineare come il sistema di frattura K1, il quale risulta spesso con inclinazioni subverticali e immergenti generalmente verso nord, anche se locali curvature ne consentono l'immersione verso meridione, risulta essere probabilmente alla base della conformazione morfologica del versante, dominato da cambi di pendenza e ripide pareti rocciose.

In generale si ritiene come tale disposizione delle fratture nello spazio sia principalmente da imputare alla presenza di uno sforzo compressivo a carattere regionale, sub regionale generalmente impostato lungo una direzione SE-NW, il quale genera appunto fratture con medesima disposizione sia alla scala chilometrica, che decametrica e decimetrica.

Nel complesso l'analisi strutturale degli ammassi rocciosi ha permesso la verifica di 8 stazioni di rilevamento strutturale e geomeccanico distribuite in maniera uniforme nel range altimetrico di sviluppo dei bacini idrografici in esame come si evince anche dalle individuazioni dei siti come riportate in "Tav. 01: Carta geologica e strutturale (scala 1:5.000)" e come riportate prese singolarmente nell'"Allegato A: Schede di analisi geomeccanica degli affioramenti rocciosi".

L'analisi fotointerpretativa e le attività di rilevamento sul terreno hanno pertanto confermato lo stile deformativo prevalente dell'area in esame così come evidenziato anche dalle indicazioni di cui ai capitoli precedenti rilevando una netta preponderanza di deformazioni di natura fragile rispetto alle evidenze di deformazione duttile, la qual cosa tende a confermare la naturale competenza dei banchi e degli strati della Dolomia Principale, litotipo predominante dell'area in esame (vedi foto 2) in quanto solo nelle porzioni sommitali del bacino della valle di Cassiglio si sono rinvenuti

affioramenti di Dolomie Zonate come quello riportato in foto 1 e dettagliatamente descritto nella scheda di affioramento 8 dell'Allegato B.



Foto 1: affioramento di Dolomie Zonate rinvenuto lungo il sentiero CAI 101 per il Passo di Baciamorti e descritto dettagliatamente nella scheda affioramento 8.



Foto 2: affioramento di Dolomia Principale rilevato lungo il sentiero 101 per Passo Baciamorti a poca distanza dal contatto con le Dolomie Zonate (foto a sinistra e scheda affioramento 4) e affioramento di Dolomia Principale rilevato nei pressi della confluenza della valle dei Faggi nel bacino di Cassiglio (foto a destra e scheda affioramento 8).

4.3. Analisi strutturale e geomorfologica di versante

Anche dal punto di vista morfo-tettonico l'area in esame evidenzia come la presenza dei principali impluvi risulti in corrispondenza delle principali fasce di debolezza territoriali a loro volta responsabili dell'alternanza di situazioni ad elevata dinamica geomorfologica di versante. Dal punto di vista geomorfologico e del condizionamento morfo-strutturale

ad una porzione apicale e medio apicale con presenza di fenomeni erosivi e di trasporto solido in atto, come evidenziato nella successiva figura 15, si contrappone una porzione mediana dei bacini in esame dove questi fenomeni si concentrano prevalentemente lungo le sponde e gli alvei degli impluvi presenti (figura 16 e 17) in quanto le aree di versante e di displuvio risultano quasi completamente ammantate da copertura regolitica e vegetazionale sporadicamente interessata da fenomeni di dilavamento, soli creep e solchi di ruscellamento che possono portare a fenomeni franosi veri e propri (figura 9 a sinistra).



Fig. 15: situazioni nella porzione apicale e mediana della parte alta del bacino della valle di Cassiglio con evidenze di fenomeni erosivi in atto (a sinistra) e fenomeni di trasporto in massa (a destra).



Fig. 16: situazioni nella porzione apicale e mediana della parte alta del bacino della valle di Cassiglio con evidenze di fenomeni erosivi in atto (a sinistra) e fenomeni di trasporto in massa (a destra).



Fig. 17: Evidenze di fenomeni franosi e di erosione diffusa presenti nelle porzioni mediana (foto a sinistra) del versante orografico destro della Valle di Cassiglio (di fronte a località Muscialli) e poco a monte del ponte pedonale presente sul fondovalle in esame (foto a destra).

Da ultimo le porzioni di fondovalle risultano caratterizzate dall'abbondante presenza dei depositi detritici e trasportati dai corsi d'acqua come ben evidenziato nella sottostante figura 18 e nelle schede granulometriche riportate nell'"Allegato C: Schede di valutazione speditiva della granulometria in alveo".



Fig. 18: Nella foto riportate si evidenzia la situazione degli accumuli di depositi presenti al bacino di Cassiglio e alimentati dalla valle di Cassiglio (foto a sinistra) e dalla Valle dei Faggi (foto a destra).

Nel complesso dei versanti esaminati la situazione rilevata, per gli aspetti di dinamica geomorfologica, è ben rappresentata nella "Tav.02: Carta Geomorfologica e della dinamica geomorfologica (scala 1:5.000)" ove sia a livello di

attività di versante che di dinamica dei corsi d'acqua si è proceduto con l'individuazione delle aree maggiormente soggette a fenomeni franosi, erosione superficiale, attività erosiva e di trasporto in alveo, tutti elementi che saranno discretizzati nei prossimi paragrafi mediante l'applicazione del metodo Gavrilovic – Zemljic per la valutazione dei quantitativi annui dei materiali depositatesi e accumulatisi all'invaso in esame.

4.4. Stima granulometrica del materiale in alveo

Per fornire ulteriori elementi di valutazione circa il quantitativo e la tipologia di depositi presenti nell'ambito delle attività di rilevamento sul terreno e nelle situazioni ritenute maggiormente significative per inquadrare la "dinamica bacinale", è stata effettuata una valutazione della stima granulometrica del materiale in alveo, in quanto indicatrice della capacità di trasporto solido dei corsi d'acqua in esame e della capacità di accumulo del materiale nell'alveo prossimale all'invaso di Cassiglio.

L'effettuazione della stima in un alveo come quelli dei torrenti in esame risulta però difficile con i metodi tradizionali di vagliatura, per la presenza di frammenti litoidi di dimensioni assai rilevanti, che richiederebbero vagli dal calibro inconsueto e renderebbero estremamente complesso ed oneroso il prelievo. Per ovviare a tali difficoltà si è ricorso all'applicazione delle due seguenti tecniche:

- Stima a vista, consistente in una valutazione speditiva, ottenuta combinando il giudizio visivo espresso indipendentemente dai partecipanti al rilevamento sul terreno, delle percentuali associabili alle seguenti 6 diverse classi:
 - ✓ Sabbia $d < 2\text{mm}$
 - ✓ Ghiaia fine $2 < d < 20\text{mm}$
 - ✓ Ghiaia $20 < d < 60\text{mm}$
 - ✓ Ciottoli $60 < d < 200\text{mm}$
 - ✓ Blocchi $200 < d < 600\text{mm}$
 - ✓ Massi $d > 600\text{mm}$
- Metodo "fotografico", basato sull'effettuazione e sull'interpretazione di riprese fotografiche dei depositi di materiale in alveo per le diverse stazioni di valutazione granulometrica (vedi Allegato C) e loro successiva valutazione con una stima più dettagliata delle frazioni granulometriche presenti.

Va subito chiarito che entrambe le tecniche forniscono informazioni con una buona approssimazione nella stima delle frazioni più grossolane, ma non consentono di caratterizzare dettagliatamente il materiale più fine ($d < 1-2\text{mm}$); per tale motivo a volte si provvede ad integrarle con l'esecuzione di tradizionali vagliature di laboratorio, limitate alla frazione più fine dei campioni studiati. Nel caso in esame e per gli scopi della presente non si è proceduto a tale integrazione, in considerazione del fatto che il ruolo della frazione fine è sicuramente marginale e che uno studio approfondito di tale

frazione avrebbe quindi avuto un significato puramente accademico. Si può comunque affermare che i risultati ottenuti con le tecniche applicate sono senz'altro compatibili con le finalità dello studio in esame.

Per quanto riguarda la valutazione della posizione della stazione granulometrica, si è tenuto conto dei seguenti aspetti:

- Presenza di alveo il più possibile “naturale” in cui le opere di regimazione idraulica (che tendono ad alterare la morfologia fluviale soprattutto per quanto riguarda i fenomeni di deposizione o erosione lungo l'alveo e le sponde) fossero limitate;
- Presenza di materiale in alveo potenzialmente mobilizzabile in concomitanza di fenomeni di piena. In questo caso si è cercato, al momento della ripresa fotografica, di prendere in considerazione sia la frazione più grossolana che quella più fine che spesso tende ad essere mascherata dal fenomeno del corazzamento o “armoring”.

Sulla parte delle considerazioni sopraesposte le valutazioni granulometriche sono state realizzate in 8 stazioni di misure sia nei pressi dell'invaso sia lungo le aste torrentizie principali che secondarie così come ubicato nella “Tav. 02” nonché nelle “Schede di valutazione speditiva della granulometria del materiale in alveo” riportate in Allegato C.

4.5. Stima del volume medio di materiale solido che si sedimenta in un anno nel serbatoio in esame

La stima del volume medio di materiale solido che si sedimenta in un anno nel serbatoio della diga di Cassiglio è stata condotta tramite l'applicazione del metodo di Gavrilovic – Zemljic; si tratta di una metodologia empirica che permette di valutare sia il volume di materiale che, per l'azione dei processi erosivi, si produce annualmente nell'ambito di un bacino idrografico, sia la quantità di materiale che raggiunge la sezione di chiusura del bacino stesso. Al netto della rideposizione interna.

Il metodo è basato su una relazione di calcolo nella quale vengono considerati parametri meteorologici (temperatura, precipitazioni), morfometrici (area e perimetro del bacino, acclività, quota media, lunghezza dei corsi d'acqua), geologico-geomorfologici (litologia affiorante, presenza di dissesti) e vegetazionali (tipo di uso del suolo).

Il metodo fu proposto inizialmente da Gavrilovic S. nel 1959 (Metodo dell'erosione potenziale) e continuamente aggiornato nei bacini sperimentali dell'ex-Jugoslavia meridionale fino alla fine degli anni 60; successivamente Zemljic (1965-71) riprese e modificò il metodo affinché si adattasse a bacini montuosi della Slovenia in quanto la formulazione originale portava ad una sovrastima del volume prodotto all'interno del bacino e anche del volume che raggiunge la sezione di chiusura.

4.6. Metodologia di Gavrilovic – Zemljic

Nel seguito vengono illustrati i passaggi dell'applicazione del metodo di Gavrilovic modificato da Zemljic, utilizzato nell'ambito del presente lavoro.

La valutazione quantitativa dell'erosione deriva dall'applicazione delle seguenti relazioni:

$$W = T h \pi F Z^{3/2} \quad e \quad G = W R$$

Dove:

W = quantità annuale media di materiale prodotto per erosione nel bacino (m^3 / anno),

G = quantità annuale media di materiale che raggiunge la sezione di chiusura (m^3 / anno).

Nelle formule precedenti entrano in gioco i seguenti parametri:

T = coefficiente di temperatura;

h = precipitazione media annua;

F = superficie del bacino (Km^2);

Z = coefficiente di erosione relativa che si ricava dalla relazione $Z = X Y (\Phi + I^{1/2})$, dove

- ✓ X = fattore di protezione del suolo ad opera della vegetazione
- ✓ Y = fattore di erodibilità del suolo funzione della litologia
- ✓ Φ = fattore che esprime il grado di erosione e dissesto in atto nel bacino
- ✓ I = fattore che esprime la pendenza media del bacino

R = fattore di riduzione che tiene conto della rideposizione interna $R = (O D)^{1/2} (L + Li) / F (L+10)$, dove

- ✓ O = perimetro del bacino (Km)
- ✓ D = quota media del bacino (Km)
- ✓ L = lunghezza del corso d'acqua (Km)
- ✓ Li = lunghezza delle aste laterali (Km)

Infine per individuare l'intensità media dell'erosione all'interno del bacino, si calcola la profondità annuale di erosione E che individua lo spessore medio di materiale per unità di superficie che "abbandona" il bacino nel corso di un anno:

$$E = G / 1000 F \text{ (mm/a)}$$

Determinazione dei parametri di calcolo

Oltre ai parametri morfometrici precedentemente elencati (F , O , D , L , Li), per l'applicazione del metodo devono essere determinati anche i restanti parametri (T , h , X , Y , Φ , I); la metodologia per la loro quantificazione viene espressa nel seguito:

- Il coefficiente T viene determinato tramite la relazione $T = (0,1t + 0,1)^{1/2}$ dove t è la temperatura media annua nel bacino espressa in gradi centigradi;
- Il coefficiente h coincide con la precipitazione media annua per il bacino considerato espressa in mm/ora.
- Il coefficiente di protezione del suolo X viene definito sulla base di una carta vegetazionale e di uso del suolo. La determinazione di X avviene attribuendo valori compresi fra 0,05 e 1 alle diverse utilizzazioni del suolo, come indicato nella sottostante tabella; il coefficiente generale del bacino è dato dal calcolo della media pesata rispetto

alle aree delle classi (sommatoria dei coefficienti moltiplicati per le rispettive aree divisa per la superficie totale del bacino).

Fattore di protezione del suolo X	
Classi d'uso del suolo	coefficiente
Foresta mista, boscaglia fitta, foresta aperta con sottobosco, centri abitati	0,05 – 0,2
Foresta resinosa con sottobosco scarso, rimboschimento, boscaglia aperta	0,2 – 0,4
Foresta e boscaglia degradati, prati e pascoli stabili	0,4 – 0,6
Coltivi e prati degradanti	0,6 – 0,8
Superfici senza copertura vegetale	0,8 – 1,0

Nel caso in cui la legenda utilizzata per la carta dell'uso del suolo comprenda solo le voci indicate nella tabella, l'attribuzione dei coefficienti sarà immediata; nel caso in cui si ritenga più opportuno operare con legende diverse, l'attribuzione dei coefficienti numerici richiederà interpretazioni e valutazioni sul grado di protezione del suolo offerto dalle varie situazioni effettivamente presenti sul territorio in esame.

- Il coefficiente di erodibilità del suolo Y si determina sulla base di una carta litologica. La determinazione di Y avviene attribuendo valori compresi tra 0,2 e 2 alle aree che presentano le medesime caratteristiche di erodibilità, come indicato nella sottostante tabella; il coefficiente generale del bacino è dato dal calcolo della media pesata rispetto alle aree delle classi.

Fattore di erodibilità del suolo Y	
Classi litologiche di erodibilità	coefficiente
Rocce dure resistenti all'erosione	0,2 – 0,6
Rocce medio-resistenti all'erosione	0,6 – 1,0
Rocce friabili, stabilizzate (scisti, argille compatte, frane, ecc)	1,0 – 1,3
Depositi, morene, argille ed altre rocce poco resistenti all'erosione	1,3 – 1,8
Depositi fini e terre non resistenti all'erosione	1,8 – 2,0

Anche in questo caso è possibile operare con legende diverse, in particolare la suddivisione di classi, oltre che della litologia, dovrebbe tener conto anche di tutti gli altri fattori che determinano il grado di propensione all'erosione delle rocce e dei terreni (caratteristiche strutturali, grado di alterazione e fratturazione, ecc.).

- Il coefficiente di pendenza del suolo I si determina sulla base delle classi di pendenza presenti nel bacino. La determinazione di I avviene attribuendo valori compresi tra 0,05 e 2 alle diverse classi di pendenza, come indicato nella sottostante tabella; il coefficiente generale del bacino è dato dal calcolo della media pesata rispetto alle aree delle classi.

Fattore di pendenza del suolo I	
Classi di pendenza	coefficiente
Da 0% a 10%	0,05
Da 10% a 20%	0,15
Da 20% a 40%	0,30
Da 40% a 60%	0,50
Da 60% a 80%	0,70
Maggiore dell'80%	2,00

In alcuni casi è possibile semplificare la tabella precedente utilizzando un minor numero di classi e coefficienti numerici opportunamente corretti.

- Il coefficiente di degradazione del suolo Φ si determina sulla base di una carta della dinamica geomorfologica e di una carta dei dissesti in atto relativa al bacino in esame. Il valore del coefficiente di degradazione (compreso fra 0,1 e 1) viene ricavato in riferimento alla tabella sottostante nella quale si tiene conto sia della percentuale di superficie del bacino interessata dai dissesti che del tipo di dissesto prevalente.

Fattore di degradazione Φ	
Tipo e intensità del dissesto	coefficiente
Erosione scarsa	0,1 – 0,2
Erosione in falde sul 20% - 50% del bacino	0,3 – 0,5
Erosione in falde, frane, depositi di crollo	0,6 – 0,7
50% - 80% del bacino eroso per franamenti e sfogliettamento	0,8 – 0,9
Bacino interamente eroso per franamenti e sfogliettamento	0,9 – 1,0

Anche in questo caso è possibile operare con legende diverse, in particolare la suddivisione in classi, oltre che della litologia, dovrebbe tener conto anche di tutti gli altri fattori che determinano il grado di propensione all'erosione delle rocce e dei terreni (caratteristiche strutturali, grado di alterazione e fratturazione, ecc.).

4.7. Applicazione del metodo di Gavrilovic – Zemljic al bacino in esame

Il metodo di Gavrilovic – Zemljic è stato applicato al bacino in esame, per la stima del volume di materiale solido che si produce annualmente nell'ambito dello stesso per fenomeni di erosione, e per la stima del volume di materiale solido che raggiunge la sezione di chiusura (coincidente con l'invaso), al netto della rideposizione interna. Nel seguito, oltre ai risultati ottenuti, vengono esposte le metodologie utilizzate per la determinazione dei parametri d'ingresso.

I parametri morfometrici, ottenuti mediante elaborazione delle informazioni a Carta Tecnica Regionale alla scala 1:10.000 (sezioni C4a1 – C4a2 – C4b2), così come disponibile da Geoportale regionale oltre che dall'elaborazione del Modello digitale del terreno e del Reticolo Idrografico Regionale Unificato sono esposti nella tabella seguente:

parametri morfometrici			
Parametro	simbolo	unità	valore
Area totale del bacino	F	Km ²	11,1745
Perimetro totale del bacino	O	Km	13,74
Lunghezza del corso d'acqua principale	L	Km	3,76
Lunghezza totale dei tributari	Li	Km	24,48
Quota media del bacino	D	Km	1,224
Area dell'invaso	-	Km ²	0,013
Fattore di riduzione	R	-	0,753

L'area totale e il perimetro sono stati misurati considerando il bacino imbrifero con chiusura allo sbarramento dell'invaso; come corso d'acqua principale è stato considerato il ramo che, a partire dall'invaso, percorre il fondovalle principale e, successivamente, la Valle di Cassiglio risalendo in direzione del Passo di Baciarmorti. La lunghezza dei tributari è stata calcolata considerando tutti i tributari diretti del corso d'acqua principale e non e che presentano un certo grado di attività in termini di erosione e trasporto di sedimenti.

I parametri meteorologici (esposti nella tabella sottostante) sono stati determinati sulla base dei dati esistenti sul sito www.arpalombardia.it/siti/arpalombardia/meteo/richiesta-dati-misurati e si riferiscono a quelli dell'anno 2017 (dal 1 gennaio 2017 al 1 gennaio 2018) registrati alla stazione ARPA di 2Piazza Brembana – vivaio". Con i dati ottenuti è stata calcolata la precipitazione media annua (mm/h) e il coefficiente di temperatura.

Parametri meteorologici			
Parametro	simbolo	unità	valore
Precipitazione media annua	H	mm/h	1713
Coefficiente di temperatura	T	-	1,09

Il coefficiente di potenziale del suolo X è stato definito sulla base della carta vegetazionale e di uso del suolo elaborata all'interno del presente studio (*"Tav.04: Carta dell'Uso del suolo e della copertura vegetazionale (scala 1:5.000)"*). In riferimento alla tabella generale del metodo Gavrilovic – Zemljic precedentemente esposta, sono stati definiti i coefficienti da attribuire alle diverse classi individuate. Nella tabella che segue vengono esposti i dati utilizzati e il valore del coefficiente X ottenuto dalla media pesata rispetto alle aree delle classi:

fattore di protezione del suolo X		
Classi di uso del suolo	Area (Km ²)	coefficiente
Tessuto urbanizzato rado e nucleiforme	0,04	0,05
Tessuto residenziale sparso	0,003	0,05
Cantieri	0,007	0,1
Prati permanenti in assenza di specie arboree ed arbustive	0,05	0,7
Prati permanenti con presenza di specie arboree ed arbustive	0,03	0,6
Boschi di latifoglie a densità media-alta governati a ceduo	9,34	0,2
Boschi di latifoglie a densità bassa governati a ceduo	0,08	0,3
Praterie naturali d'alta quota con assenza di specie arboree ed arbustive	0,44	0,4
Praterie naturali d'alta quota con presenza di specie arboree ed arbustive	0,05	0,5
Cespuglieti	0,55	0,5
Cespuglieti con presenza significativa di specie arboree ed arbustive	0,10	0,6
Cespuglieti in aree agricole abbandonate	0,07	0,5
Spiagge, dune, alvei ghiaiosi	0,05	0,8
Accumuli detritici e affioramenti litoidi privi di vegetazione	0,18	0,8
Vegetazione rada	0,20	0,5
TOT (F – Area invaso)	11,1615	X med = 0,251

Il coefficiente di erodibilità del suolo Y è stato definito sulla base della “Tav. 01: Carta geologica – strutturale (scala 1:5.000)” e delle indicazioni derivanti dai precedenti paragrafi 4.2 e 4.3. In riferimento alla tabella generale del metodo di Gavrolovic – Zemljic precedentemente esposta, i coefficienti da attribuire alle diverse classi individuate sono stati definiti in base alla propensione all'erosione, dipendente a sua volta dalle caratteristiche generali delle rocce (vedi anche Allegato B “Schede di analisi geomeccanica degli affioramenti rocciosi” e Allegato C “Schede di valutazione stime granulometriche materiale in alveo”) e dei depositi superficiali: litologia, granulometria, grado di fratturazione, cementazione, alterazione, ecc. Nella tabella che segue vengono esposti i dati utilizzati ed il valore del coefficiente Y ottenuto dalla media pesata rispetto alle aree delle classi:

fattore di erodibilità del suolo Y		
Classi litologiche di erodibilità	Area (Km ²)	coefficiente
Sintema del Po (Depositi quaternari e unità post-glaciale)	0,79	1,4
Calcere di Zorzino	1,00	0,8
Dolomie Zonate (litofacies a breccie prevalenti)	0,25	0,9
Dolomie Zonate	0,30	0,8
Dolomia Principale	8,83	0,6
TOT (F – area invaso)	11,1615	Y _{med} = 0,687

Il coefficiente di pendenza del suolo I è stato definito sulla base della *“Tav. 03: Carta delle pendenze e dell’acclività di versante (scala 1:5.000)”* e delle indicazioni morfometriche generali dei bacini in esame e descritte nel presente lavoro. Le classi di pendenza e i relativi coefficienti sono stati definiti utilizzando la tabella del metodo Gavrilovic – Zemljic precedentemente esposta. Nella tabella che segue vengono esposti i dati utilizzati e il valore del coefficiente I ottenuto dalla media pesata rispetto alle aree delle classi:

fattore di pendenza del suolo I		
Classi di pendenza	Area (Km ²)	coefficiente
Da 0% a 10%	0,07	0,05
Da 10% a 20%	0,09	0,15
Da 20% a 40%	0,65	0,3
Da 40% a 60%	2,10	0,5
Da 60% a 80%	3,39	0,7
Maggiore dell’80%	4,88	2,0
TOT (F – area invaso)	11,1615	I _{med} =1,2

Il coefficiente di degradazione del suolo Φ è stato definito sulla base dell’analisi della dinamica geomorfologica e dello stato dei dissesti in atto (vedi *“Tav. 02: Carta Geomorfologica e della dinamica geomorfologica – scala 1:5.000”* e paragrafi precedenti del presente capitolo) nell’ambito del bacino in esame; In riferimento alla tabella generale del metodo Gavrilovic – Zemljic precedentemente esposta, si ritiene che il bacino in esame abbia caratteristiche riconducibili alla categoria definita “erosione in falde sul 20% - 50% del bacino” (coefficiente compreso fra 0,3 e 0,5); il valore di Φ attribuito al bacino è esposto nella tabella seguente:

fattore di degradazione del suolo Φ	
Classe di degradazione	coefficiente

“erosione in falde sul 20%-50% del bacino”	$\Phi = 0,4$
--	--------------

I dati di ingresso per l'applicazione del metodo precedentemente esposti, sono stati inseriti nelle formule per il calcolo delle volumetrie di materiale prodotte nel bacino per erosione. I risultati ottenuti sono esposti nella seguente tabella:

risultati finali			
Parametro	simbolo	unità	valore
Coefficiente di erosione relativa	Z	-	0,258
Volume annuale medio prodotto nel bacino per erosione	W	m ³ /anno	8589,96
Volume annuale medio che raggiunge la sezione di chiusura	G	m³/anno	6468,24
Erosione specifica	E	mm/anno	0,579

4.8. Considerazioni sui risultati ottenuti

Secondo i risultati ottenuti, la stima del volume medio di materiale solido che si sedimenta in un anno nel serbatoio in esame è pari a circa **6468,24m³**. In base alle risultanze delle attività di rilevamento geologico – geomorfologico precedentemente esposte, il volume di materiale solido sedimentatosi all'interno dell'invaso è attualmente pari a circa **30.000m³**. Alla luce dei risultati precedentemente esposti sulla stima del volume medio di materiale solido che si sedimenta in un anno nel serbatoio, il volume di materiale attualmente presente nell'invaso corrisponderebbe quindi a circa 5,0 anni di sedimentazione. In realtà l'invaso è in funzione di un numero molto maggiore di anni e quindi la valutazione del volume medio di materiale solido che si sedimenta in un anno esposta nei precedenti paragrafi appare sovrastimata; a questo proposito si possono fare le seguenti considerazioni:

- Il metodo utilizzato può in effetti portare ad una sovrastima dei volumi sia per quanto riguarda la stima del volume prodotto per erosione all'interno del bacino, sia soprattutto, per quanto riguarda la valutazione della quota parte di questo volume che raggiunge il serbatoio; è possibile che il metodo utilizzato sottostimi la sedimentazione del materiale eroso prima che questo raggiunga l'invaso.
- Parte del materiale sedimentatosi all'interno dell'invaso nel corso degli anni non è più attualmente presente in quanto potrebbe aver abbandonato il serbatoio in seguito alle periodiche aperture degli scarichi di fondo.
- Come riportato nella sezione “analisi dell'impianto” sono state svolte nel recente passato delle operazioni di rimozione del materiale accumulatosi; la prima negli anni 1988 e 1989 (a seguito della piena del 18 luglio 1987) con rimozione di circa 5000m³ presso la valle Foglia e la seconda nel marzo del 1995 con rimozione di circa 6000m³ dall'invaso di Cassiglio e di altri 5000m³ dalla Valle Foglia.

- Il materiale solido che viene prodotto e trasportato all'interno del bacino raggiunge il settore di fondovalle (zona compresa fra la quota di 750m circa e l'invaso) dove tende a sedimentarsi per la brusca diminuzione della pendenza; la tendenza alla sedimentazione viene accentuata dalla presenza della diga dell'invaso in esame, che comporta uno sbarramento all'evacuazione del materiale solido verso valle. Questa situazione ha portato al riempimento del fondovalle e di parte dell'invaso, con la deposizione di un prisma continuo di depositi. Alla luce di queste indicazioni il volume stimato con l'analisi morfologica del bacino (6468,24m³) va quindi interpretato come volume di materiale che si erode annualmente nell'ambito del bacino idrografico sotteso dalla diga e che può essere potenzialmente conferito nell'invaso, conferimento che risulta comunque condizionato dalla variabilità delle portate ordinarie dei corsi d'acqua, dalla capacità di trasporto e di deposito degli stessi. Ovviamente nella valutazione del volume di materiale attualmente presente nell'invaso non si è tenuto conto dei depositi posti immediatamente a monte dell'invaso stesso; una stima approssimativa del volume complessivo effettivamente presente sul fondovalle del Cassiglio (basata su confronti fra profili topografici prima e dopo la realizzazione della diga) porta a valori di almeno 50 – 60.000m³ tenendo conto della sola valle principale e trascurando i conoidi laterali. La determinazione del volume di materiale che annualmente raggiunge il solo serbatoio è invece molto più problematica (impossibile da ottenere con il metodo utilizzato) in quanto il regime di sedimentazione a monte dell'alveo è stato completamente alterato dalla presenza dello sbarramento e dell'invaso stesso.

4.9. Valutazione delle modalità per il ripristino della capacità utile del serbatoio e interazione con la stabilità delle sponde

L'apertura degli scarichi di fondo non è assolutamente sufficiente a garantire l'asportazione del materiale grossolano presente nel bacino e nel tratto immediatamente a monte; questo va quindi effettuato svasando meccanicamente. Per il materiale fine presente nel resto del bacino è possibile lo svasso da effettuare con apertura degli scarichi di fondo in occasione dei periodi di piena, preferibilmente nella fase montante della piena, affinché il materiale che potrebbe sedimentare a valle venga dilavato dal picco di piena.

Dal punto di vista geologico non si individuano particolari controindicazioni connesse con le eventuali operazioni di svasso; dal punto di vista tecnico, si segnala la presenza di una derivazione idroelettrica lungo il fiume Brembo, immediatamente a valle della confluenza del torrente Stabina, sulla quale potrebbe avere una certa influenza la presenza temporanea di un maggiore quantitativo di materiale in sospensione.

Dal punto di vista idrobiologico e paesaggistico, il tratto del torrente Stabina a valle della confluenza della Valle di Cassiglio è già attualmente interessato da periodici intorbidimenti delle acque per cause antropiche (lavaggio inerti).

La situazione litologica delle sponde dell'invaso è caratterizzata da zone di imposta e fianchi in roccia e da depositi alluvionali lungo il lato di monte. Gli ammassi rocciosi sono nel complesso relativamente consistenti e poco fratturati (vedi "Allegato B: Schede geomeccaniche"), sebbene carsificati, ed i depositi sono caratterizzati da una granulometria mediamente grossolana (vedi "Allegato C: Schede granulometriche"). In prima approssimazione la situazione litologica, unitamente alla situazione morfologica e di dinamica geomorfologica riscontrata, caratterizzata dalla mancanza di

evidenze di particolari fenomeni di degradazione alla base delle sponde, porta quindi ad escludere l'insorgere di problemi di stabilità delle sponde nelle condizioni di rapido svasso e deflusso conseguenti ad un'evacuazione del materiale sedimentato all'interno del bacino condotta mediante l'apertura degli scarichi di fondo. Questa considerazione dovrà comunque essere approfondita sulla base di un esame di dettaglio della situazione litologia, morfologica e idrogeologica delle sponde e per alcune valutazioni in merito si rimanda alle risultanze delle indagini geofisiche effettuate in sito e di cui si relazionerà nel successivo capitolo 5 e nell'allegato D "Misure HVSR".

4.10. Caratteristiche geologiche – geomorfologiche del tratto significativo del corso d'acqua a valle dell'invaso

Le caratteristiche geologiche-geomorfologiche del corso d'acqua a valle dell'invaso in esame (Valle di Cassiglio), sono state analizzate lungo il tratto compreso fra lo sbarramento e la confluenza con il torrente Stabina. Lungo questo tratto (di circa 350m) la pendenza della curva di fondo è mediamente da bassa a molto bassa, in diminuzione dallo sbarramento verso la confluenza; le sezioni di deflusso sono sempre ampie e sul fondo affiora il substrato roccioso sul quale sono appoggiati blocchi e depositi alluvionali. La portata liquida è molto limitata perché corrisponde sostanzialmente a quella che filtra al di sotto o lateralmente allo sbarramento (deflusso minimo vitale). Lungo tutto il tratto le acque sono melmose e maleodoranti. A partire dal ponte che attraversa l'alveo 100m circa a monte della confluenza (indicazione Ostello di Cassiglio) sono presenti muri di sponda in destra (fino a 30-40m dalla confluenza) e in sinistra idrografica (fino alla confluenza).

4.11. Valutazioni conclusive sui risultati ottenuti

L'esame degli aspetti geologici relativi alla zona di invaso e del bacino idrografico sotteso naturalmente, corrispondente ai bacini del torrente Cassiglio e della valle dei Faggi, ha messo in evidenza una situazione caratterizzata da un trasporto solido elevato e contraddistinto da una forte frazione grossolana che tende a sedimentarsi al limite della zona di invaso. La sedimentazione di materiale grossolano è responsabile di una riduzione della capacità di invaso iniziale, dell'ordine di un terzo, che può essere rimessa solo con interventi di escavazione. Per il resto dell'invaso è presente al fondo del materiale più fine la cui rimozione potrebbe avvenire, almeno in parte, con la sola apertura degli scarichi.

Alle caratteristiche geologiche del bacino del torrente Stabina, le cui acque sono in parte convogliate artificialmente nell'invaso di Cassiglio, ed in particolare all'esistenza di un substrato roccioso di mineralizzazioni a solfuri, è invece legato il contenuto relativamente alto in elementi metallici riscontrato nel sedimento fine presente al fondo dell'invaso.

Dal punto di vista strettamente morfologico ed idrogeologico, in riferimento anche alle condizioni di stabilità, non si rilevano particolari controindicazioni connesse con le eventuali operazioni di svasso.

5. CAMPAGNA DI INDAGINI GEOFISICHE: METODOLOGIE E RISULTATI

Come già indicato nella premesse della presente relazione per completare e supportare il quadro conoscitivo dell'area in esame in funzione di una maggior esattezza nella valutazione dei depositi presenti nel fondovalle in esame in funzione di una corretta definizione dei loro spessori e dell'individuazione del substrato roccioso si è dato seguito nell'ambito degli approfondimenti sito specifici ad una campagna di indagini geofisiche, finalizzate a fornire utili indicazioni sia sulla caratterizzazione geologica dei terreni e dei litotipi presente sia per la valutazione della sismostratigrafia e delle relative proprietà geofisiche nell'ottica della verifica delle velocità di V_{S30} - V_{Seq} finalizzate alla determinazione dell'azione sismica e della relativa categoria di sottosuolo ai sensi delle NTC18.

Pertanto lungo l'area di fondovalle a monte dell'invaso di Cassiglio (vedi figura 19) si è quindi proceduto all'esecuzione di:

- **n. 1 indagine geofisica del tipo tomografia sismica 2D** finalizzata ad una prima ricostruzione sismostratigrafica per una profondità di circa 25m da piano campagna lungo lo stendimento sismico L1 di lunghezza 115m.
- **n. 1 indagine geofisica mediante tecnica MASW - ReMi** al fine di definire la velocità delle V_{Seq} e la relativa categoria di sottosuolo ai sensi delle NTC18 e del fattore di amplificazione sitospecifico secondo quanto indicato nell'Allegato 5 della D.G.R. IX/2616/2011.
- **n. 4 acquisizioni di rumore sismico ambientale (metodo HVSR)** finalizzate all'individuazione della frequenza fondamentale dei terreni presenti nell'area di indagine nonché all'individuazione della profondità del "bedrock sismico" così da fornire utili elementi conoscitivi per la valutazione dell'azione sismica locale (vedi Allegato D).

Qui di seguito si darà conto delle metodologie sismiche applicate illustrando nel dettaglio sia le tecniche metodologiche utilizzate sia i risultati raggiunti mediante l'applicazione delle stesse.



Fig. 19: ubicazione indagini geofisiche effettuate sul fondovalle della Valle di Cassiglio e retrostanti al bacino in esame.

La prospezione sismica si occupa dell'esplorazione del sottosuolo attraverso metodi di studio di tipo indiretto, dove per metodi di tipo indiretto si intendono quelle metodologie di studio in grado di definire la presenza e la tipologia di una determinata anomalia nel sottosuolo, identificandone indirettamente le caratteristiche salienti, analizzando i parametri fisico meccanici dedotti dal metodo di prospezione utilizzato.

I metodi sismici, in generale, permettono di effettuare un'analisi dettagliata di differenti tipologie di materiale, sfruttando le proprietà di questi ultimi quando sono attraversati da un'onda di tipo sismico (Fig. 20). Le varie metodologie di indagine si basano sulla propagazione delle onde sismiche da una sorgente di energia artificiale a una serie di ricevitori (geofoni). Il passaggio delle onde attraverso il mezzo indagato e le variazioni che esse ne subiscono permettono di ricostruire le caratteristiche meccaniche e geometriche del sottosuolo.

Le onde di tipo sismico possono essere in generale classificate come:

- onde di volume
 - ✓ P: onde primarie o di compressione
 - ✓ S: onde secondarie o di taglio
- onde di superficie
 - ✓ L: onde di Love (caratterizzate da un movimento longitudinale e trasversale)
 - ✓ R: onde di Rayleigh (caratterizzate da un movimento ellittico retrogrado)

Quando un'onda sismica che si propaga nel sottosuolo incontra un limite tra materiali con differenti proprietà fisico meccaniche, subisce delle modificazioni salienti sia nel suo percorso, sia nelle intrinseche caratteristiche energetiche. Le caratteristiche del mezzo e l'angolo di incidenza dei raggi sismici determineranno la traiettoria dell'onda sismica. Quando un'onda longitudinale piana incontra una superficie di separazione tra due mezzi isotropi con caratteristiche elastiche differenti, una parte dell'energia si riflette nello stesso mezzo in cui l'onda incidente si propaga, mentre una parte si rifrange nell'altro.

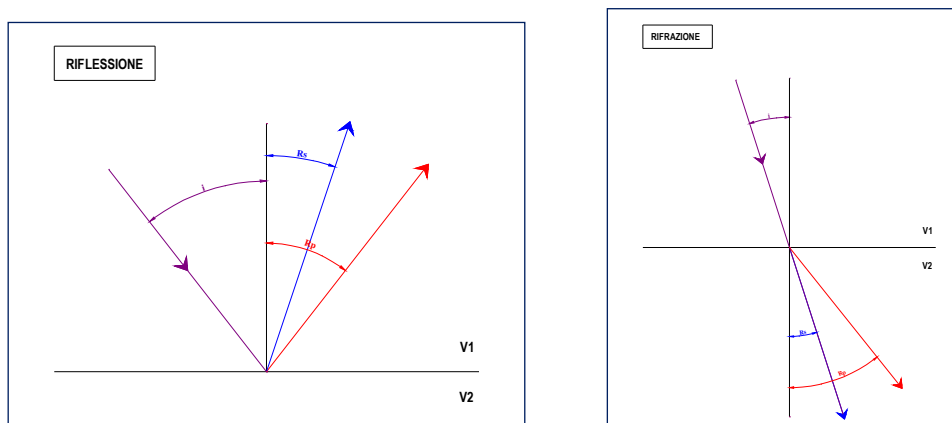


Fig. 20: Schematizzazione grafica dei principi di riflessione e rifrazione di un'onda.

Riflessione: l'angolo di incidenza (i) è uguale all'angolo di riflessione dell'onda compressionale P (R_p), mentre l'angolo di riflessione dell'onda di taglio S (R_s) è legato all'angolo di incidenza dall'equazione:

$$\sin(R_s) = \frac{V_s}{V_p} \cdot \sin(i)$$

Rifrazione: l'angolo di riflessione dell'onda compressionale P (R_p) è legato all'angolo di incidenza dall'equazione:

$$\frac{\sin(i)}{\sin(R_p)} = \frac{V_{p1}}{V_{p2}}$$

L'angolo di riflessione dell'onda di taglio S (R_s) è legato all'angolo di incidenza dall'equazione:

$$\frac{\sin(i)}{\sin(R_s)} = \frac{V_{p1}}{V_{s2}}$$

Quando $\sin(i) = \frac{V_{p1}}{V_{p2}}$ il valore di $\sin(R_p)$ risulta pari a 1 e l'angolo pari a 90° ; pertanto le onde compressionali rifratte

non attraversano il mezzo ma si propagano lungo l'interfaccia. In questo caso si parla di angolo critico e di riflessione totale.

La presenza di discontinuità o anisotropie nel mezzo modifica ampiezza e periodo delle onde sismiche. La velocità delle onde dipende dalle caratteristiche meccaniche del materiale attraversato, in particolare da: densità (γ), coefficiente di Poisson (ρ), modulo di Young (E) e modulo di taglio (G).

$$\rho = \frac{V_p^2 - 2 \cdot V_s^2}{2 \cdot (V_p^2 - V_s^2)}$$

$$E = V_p^2 \cdot \gamma \cdot \frac{(1 + \rho) \cdot (1 - 2\rho)}{1 - \rho}$$

$$G = \frac{\gamma \cdot V_s^2}{g}$$

V_p = velocità delle onde P

V_s = velocità delle onde S

g = accelerazione di gravità

Litotipi		Velocità onde P V_p (m/s)		Velocità onde S V_s (m/s)	
		Valore minimo	Valore massimo	Valore minimo	Valore massimo
Rocce ignee	Andesite	6100	6400	3300	3500
	Basalto	6500	7200	1600	3500
	Basalto fratturato*	950	1350	480	700
	Diorite	5800	6600	–	–
	Dunite	6700	7100	3800	4100
	Gabbro	6200	7200	3300	3900
	Granito	5500	6100	900	3300
	Granito fratturato*	1000	1750	500	900
	Latite	5400	5750	3100	3250
Rocce metamorfiche	Riolite	5000	5500	2800	3200
	Anfibolite	5800	7100	3400	4000
	Argilloscisto	3500	5400	–	–
	Gneiss	3500	7000	2700	3500
	Marmo	3700	6900	2500	390
	Quarzite	5100	6000	3500	4000
	Scisto	3500	5700	–	–
Rocce sedimentarie	Serpentinite	5500	6500	2200	3000
	Anidrite	4500	6500	–	–
	Argillite	2100	4400	550	2100
	Calcare	2000	7000	1000	3300
	Calcare fratturato*	750	1500	330	650
	Calcarenite	1400	4400	800	2500
	Arenaria	2000	6000	900	3100
	Arenaria fratturata*	800	2100	360	950
	Dolomia	2500	6500	1200	3800
	Duomo salino	4500	5000	–	–
Terreni	Gesso	2000	3500	–	–
	Marna	1500	2000	300	500
	Alluvioni	300	600	–	–
	Argilla	1000	2500	300	600
	Argilla sabbiosa	600	2600	200	450
	Ghiaia	750	1000	200	500
	Limo	650	1250	240	480
	Permafrost	3500	4000	–	–
	Sabbia asciutta	200	1000	–	–
	Sabbia satura	600	2300	250	450
Sabbia siltosa	600	1900	200	600	
Sabbia e ghiaia	300	1800	300	600	
Tillite	1500	2500	–	–	

Nella tabella 1 qui a fianco riportata vengono indicati valori di riferimento della velocità P per varie tipologie di materiali, depositi e rocce:

Tabella 1: Valori di riferimento delle velocità P per le varie tipologie di materiali.

5.2. Sismica a rifrazione

Il metodo sismico a rifrazione utilizza le onde sismiche che vengono rifratte dalle discontinuità presenti nel sottosuolo come ad esempio l'interfaccia tra due mezzi a differente velocità. La condizione indispensabile perché la tecnica sia utilizzata con profitto e le risposte siano corrette e interpretabili, è che, in un ipotetico sottosuolo dominato dalla presenza di più strati, la velocità dell'onda sismica nello strato superiore sia sempre minore della velocità dell'onda sismica nello strato inferiore ($V_1 < V_2$).

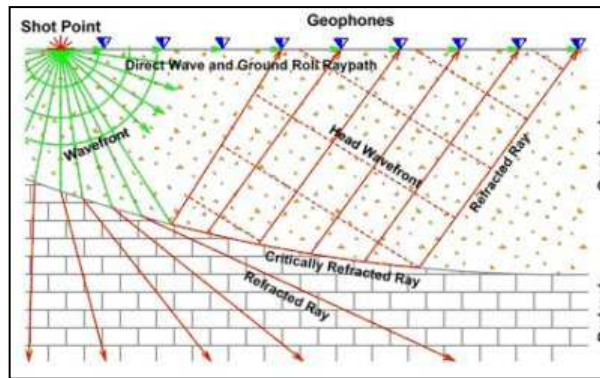


Fig. 21: Schema tipico di un'indagine sismica a rifrazione.

Misurando i tempi di primo arrivo (FBP First Break Point) degli impulsi ai geofoni e le distanze tra gli stessi viene costruito un diagramma (dromocrona) nel quale in ascisse vengono rappresentate le distanze e in ordinate i tempi.

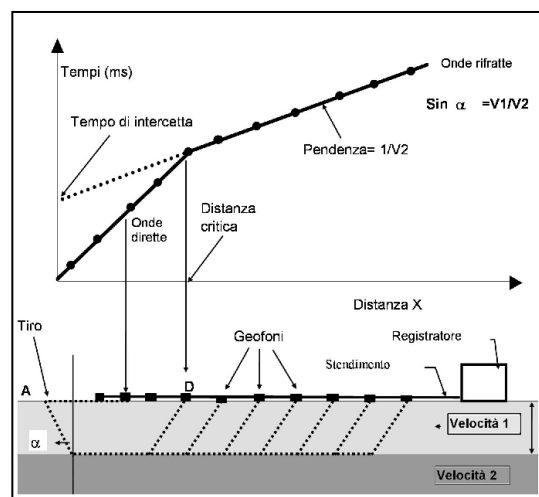


Fig. 22: Sismica a rifrazione: dromocrona su diagramma tempo/distanza.

Le onde dirette viaggiano dalla sorgente al ricevitore con velocità V_1 (nella dromocrona sono rappresentate dalla linea che dall'origine ha una pendenza pari a $1/V_1$) e raggiungono i ricevitori in un tempo:

$$t = \frac{x}{V_1}$$

Le onde rifratte viaggiano lungo l'interfaccia a una profondità z (nella dromocrona sono rappresentate dalla linea retta con pendenza $1/V_2$ che intercetta l'asse dei tempi a $x=0$) e raggiungono i ricevitori in un tempo (tempo di intercetta):

$$T_i = \frac{x}{V_2} + \frac{2z\sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_2 * V_1}$$

Il punto di intersezione tra le due rette, definito come punto di ginocchio, permette di calcolare la profondità del rifratore.

5.3. Procedure di elaborazione e inversione tomografica del dato sismico

La tomografia è una tecnica basata sull'individuazione delle anomalie nelle velocità di propagazione delle onde sismiche, la quale consente di ottenere una risoluzione nettamente maggiore rispetto ad altri metodi, permettendo quindi di ricostruire la presenza nel sottosuolo di anomalie anche particolarmente complesse. Nel dettaglio, è possibile ricostruire la distribuzione geometrica degli elementi che costituiscono un'ipotetica sezione di sottosuolo partendo dall'analisi del comportamento delle onde che lo attraversano. Agendo infatti sull'analisi delle onde sismiche che attraversano il sottosuolo, analizzando i tempi di arrivo delle onde rifratte, e tenendo in considerazione anche i profili e le geometrie di acquisizione, è possibile ricostruire un modello di velocità che può essere migliorato attraverso successive iterazioni fino al raggiungimento di una sovrapposizione ottimale tra i tempi di arrivo misurati e quelli calcolati. L'utilizzo di questa tecnica richiede un maggior numero di sorgenti di scoppio e di punti di ricezione delle onde sismiche in modo tale da ottenere una distribuzione dei raggi sismici abbastanza omogenea e con una densità che viene predefinita in funzione del "target" da raggiungere.

I metodi di inversione tomografica applicati a metodologie di prospezione sismica attiva trovano numerose applicazioni per indagini di tipo geotecnico:

- ricostruzione sismo-stratigrafica;
- definizione dei parametri meccanici dei sismostrati indagati;
- individuazione di faglie e fratture;
- localizzazione di oggetti sepolti, massi erratici;
- definizione delle geometrie e dell'andamento del bedrock.

Gli obiettivi elencati possono essere raggiunti poiché la velocità sismica è un parametro che dipende dalle caratteristiche meccaniche del materiale quali: porosità, resistenza al taglio, compressibilità, quantità di fratture, saturazione e contenuto di argilla.

Misurando i tempi di arrivo o le ampiezze delle onde sismiche è possibile ottenere la distribuzione nel mezzo indagato di velocità sismica (modello di velocità) o attenuazione (modello cinematico); parametri che permettono di definire le caratteristiche meccaniche del sottosuolo.

L'efficacia del metodo dipende:

- dalla capacità di penetrazione delle onde in funzione delle caratteristiche litologiche;
- dalla sua definizione, ossia da quanto il suo percorso nel mezzo sia assimilabile a un raggio (rettilineo o curvilineo) inteso come distanza più breve tra il punto sorgente e l'orizzonte fisico.

La tecnica tomografica si basa sulla ripetizione, lungo la traccia dello stendimento sismico, di punti di energizzazione in modo da poter ottenere una sequenza di tracce sismiche progressive.

Pertanto in campagna tutto ciò si ottiene lasciando fissi i geofoni lungo lo stendimento e realizzando vari punti di energizzazione mediante mazza battente, cannoncino o altra forma di energizzazione. Operativamente si procede con

la stessa a terra dei geofoni, quindi si prosegue energizzando a intervalli regolari consecutivi, in modo da aumentare il potere di risoluzione e una ottimale copertura dei raggi sismici.

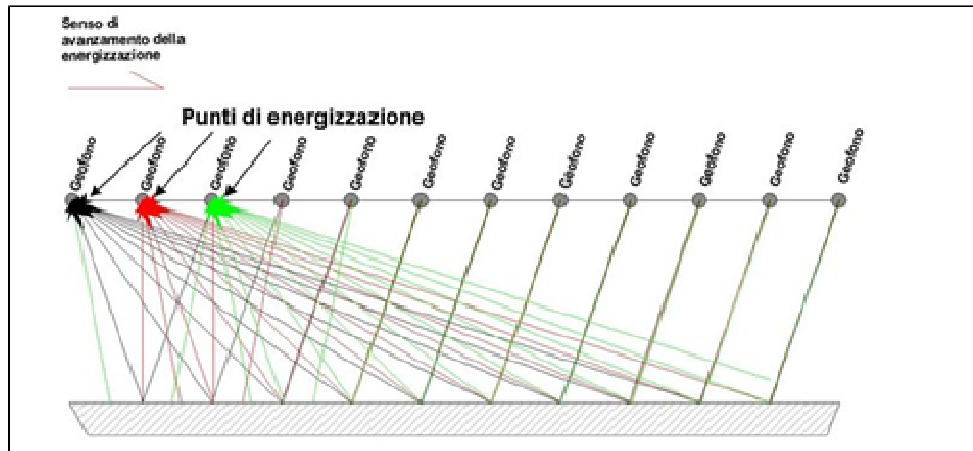


Fig. 23: Schema di esecuzione di un'indagine sismica a rifrazione.

Ogni raggio sismico che attraversa un ipotetico oggetto o struttura presente tra il punto di energizzazione e quello di ricezione, viene modificato in maniera univoca dalle caratteristiche del mezzo attraversato (memoria della radiazione); le informazioni che derivano dall'interpretazione di tali modifiche, poiché sono distribuite lungo tutto il percorso, se considerate da sole, fornirebbero notizie parziali delle proprietà dell'oggetto lungo quel percorso.

L'opportuna combinazione simultanea di tutte le memorie di radiazione consente di incrementare il database di informazioni ottenute, consentendo di definire con precisione forme geometriche e attribuirle a strutture sepolte. Per il trattamento dei dati e per la ricostruzione tomografica dell'immagine si utilizza una suddivisione dell'area di studio in celle elementari, calcolando per ciascuna di queste un valore di velocità congruente con il tempo di tragitto medio rilevato dai percorsi dei raggi sismici che lo attraversano. La presentazione delle elaborazioni eseguite dà come risultato una mappa della distribuzione delle onde sismiche in una sezione piana contenente sorgenti e geofoni. La fase di elaborazione consiste in una inversione che può partire dalla specificazione di un iniziale modello di velocità, risolvendo il problema sia in maniera diretta, che inversa, e individuando la distribuzione dei valori di velocità che minimizza la somma dei quadrati degli scarti tra i tempi misurati e i tempi calcolati per tutte le perturbazioni sismiche prodotte.

Tra le tecniche di inversione si ricorda la metodologia WET (Wavepath Eikonal Travelttime), la quale consente di ottenere sezioni di maggiore dettaglio del sottosuolo indagato.

5.4. Classificazione sismica dei sottosuoli mediante metodologia MASW

Il metodo MASW (Multichannel Analysis of Surface Waves) è una tecnica di indagine non invasiva che individua il profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s , basandosi sulla misura delle onde superficiali fatta in corrispondenza di diversi sensori (accelerometri o geofoni) posti sulla superficie del suolo.

Il contributo predominante alle onde superficiali è dato dalle onde di Rayleigh, che viaggiano con una velocità correlata alla rigidità della porzione di terreno interessata dalla propagazione delle onde. In un mezzo stratificato le onde di Rayleigh sono dispersive, cioè onde con diverse lunghezze d'onda si propagano con diverse velocità di fase e velocità di gruppo (Achenbach, J.D., 1999, Aki, K. and Richards, P.G., 1980) o detto in maniera equivalente la velocità di fase (o di gruppo) apparente delle onde di Rayleigh dipende dalla frequenza di propagazione.

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

Il metodo di indagine MASW si distingue in metodo attivo e metodo passivo (Zywicki, D.J. 1999) o in una combinazione di entrambi.

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

Nel seguito faremo riferimento al metodo MASW attivo che consente la classificazione sismica dei suoli, perché fornisce il profilo di velocità entro i primi 30m di profondità.

Il metodo MASW consiste in tre fasi (Roma, 2002): (1) la prima fase prevede il calcolo della velocità di fase (o curva di dispersione) apparente sperimentale, (2) la seconda fase consiste nel calcolare la velocità di fase apparente numerica, (3) la terza ed ultima fase consiste nell'individuazione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s , modificando opportunamente lo spessore h e le velocità delle onde di taglio, fino a raggiungere una sovrapposizione ottimale tra la velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale e la velocità di fase (o curva di dispersione) numerica corrispondente al modello di suolo assegnato.

5.5. Classificazione sismica dei sottosuoli mediante metodologia REMI

L'analisi ReMi rientra nei metodi di sismica passiva che consistono nel registrare microtremori, cioè rumori ambientali dovuti a sorgenti naturali "lontane" (vento, mare, attività antropica), auspicabilmente contenenti frequenze più basse rispetto quelle generate da acquisizioni in sismica attiva. Non si conosce né l'ubicazione né il momento in cui si verificherà l'evento di interesse e per questo è necessario che la registrazione sia lunga almeno qualche minuto al fine di riuscire a captare un segnale utile. L'acquisizione prevede disposizioni multi-geofoniche come per la sismica a rifrazione e per il metodo MASW. Durante l'analisi vengono determinati gli spettri di velocità per varie finestre temporali della registrazione effettuata di cui se ne sceglie il più chiaro per l'individuazione della curva di dispersione da invertire in modo simile all'analisi MASW.

Il metodo REMI in genere consente di tracciare una velocità di fase apparente sperimentale analizzando anche frequenze dell'ordine di 2 Hz e 10Hz, quindi restituendo informazioni sugli strati più profondi del suolo, generalmente al di sotto dei 50m e fino a circa 100m di profondità in funzione della rigidità del suolo.

Le fasi di elaborazione del dato acquisito sono simili a quelle del metodo MASW, essendo infatti divise in tre fasi principali : (1) la prima fase prevede il calcolo della velocità di fase (o curva di dispersione) apparente sperimentale, (2) la seconda fase consiste nel calcolare la velocità di fase apparente numerica, (3) la terza ed ultima fase consiste nell'individuazione del profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s , modificando opportunamente lo spessore h e le velocità delle onde di taglio, fino a raggiungere una sovrapposizione ottimale tra la velocità di fase (o curva di dispersione) sperimentale e la velocità di fase (o curva di dispersione) numerica corrispondente al modello di suolo assegnato.

5.6. Strumentazione utilizzata

Le prove sono state effettuate con la strumentazione di seguito riportata.

5.6.1 Acquisizione dei dati

I dati sono stati acquisiti con sismografo PASI Gea24 dotato di 24 canali a 24 bit, possibilità di stacking, filtri analogici e digitali. Di seguito si riportano le caratteristiche tecniche del sismografo.

SPECIFICHE TECNICHE GEA 24	
Numero di canali	24 can.+trigger (can. AUX) - 2 unità serializzabili per un tot. di 48 can.
Conversione Dati	Convertitore Analogico/Digitale Sigma-Delta 24 bit reali (compatibile con geofoni analogici a qualsiasi frequenza di risonanza)
Intervallo Campionamento	Acquisizioni "a pacchetto": - fino a 125 microsec (8000sps) con 24 can. - fino a 31,25 microsec (32000sps) con 6 can. Acquisizione continua: - fino a 4000 microsec (250sps) con 24 can. - fino a 500 microsec (2000sps) con 3 can.
Lunghezza Acquisizione	27500 campioni @ 24 can. (+aux) 174500 campioni @ 3 can. (+aux) Numero di campioni illimitato per acquisizioni continue.
Guadagno Preamp.	0/52 dB, selezionabile via software
Stacking	Numero di stacking illimitato
Impedenza di ingresso	2M Ω // 22nF
Rapporto S/N	117db @ 1ksps
Distorsione	0.007% @ 16kHz
Largh.Banda -3dB	6.8kHz@32ksps - 0.21 kHz@1ksps
Largh.Banda +/- 0.1dB	3.5 kHz@32ksps - 0.11 kHz@1ksps
Filtri	Passa Basso: 125-200-500-1000Hz Passa Alto: 10-20-30-40-50-70-100-150-200-300-400Hz
Filtri "Notch"	50-60Hz + armoniche
Trigger	Contatto normalmente chiuso, normalmente aperto (es. per uso con esplosivo), segnale analogico (geofono starter, starter piezoelettrico), trigger TTL. Sensibilità del trigger regolabile via software
Visualizzazione Tracce	Wiggle-trace (formato oscilloscopio) / area variabile
Noise-monitor	Tutti i canali + trigger
Canale AUX (ausiliario)	1x (per il trigger o qualsiasi altro segnale in ingresso)
Interfaccia comunicazione	1x USB 2.0 per PC esterno (di fornitura Cliente)
Formato Dati	SEG2, SAF (altri formati su richiesta)
Alimentazione	5VDC da USB, 0.25A
Temp.operativa/stoccaggio	-30°C to +80°C
Umidità	80% umidità relativa, non condensante
Dimensioni	24cm x19.5cm x11cm
Peso	2 Kg

5.6.2 Sorgenti di energizzazione

In fase d'acquisizione è stata utilizzata come sorgente di energia la massa battente; essa è costituita da un martello avente massa da 10 kg utilizzato da un operatore: l'impulso viene generato attraverso il colpo del martello su una piastra in alluminio appoggiata al terreno. Tale sorgente energizzante, leggera e facilmente manovrabile, consente la ripetizione delle energizzazioni per un singolo punto, permettendo di adottare tecniche di stacking e migliorando il rapporto tra segnale e rumore: a tal fine, per ogni punto di energizzazione, sono state eseguite in sommatoria dalle 2 alle 10 energizzazioni. L'istante di trigger è fornito da un collegamento elettrico in chiusura all'istante dell'energizzazione.

5.6.3 Ricevitori

Per le indagini sismiche eseguite, sono stati utilizzati geofoni verticali monocomponente del tipo elettromagnetico a bobina mobile a massa sospesa, con frequenza propria 4.5 Hz (geofoni utilizzati per l'indagine MASW e ReMi) e 14Hz (geofoni utilizzati per la tomografia sismica). I trasduttori di velocità sono in grado di tradurre in segnale elettrico la

velocità con cui il suolo si sposta al passaggio delle onde sismiche longitudinali e trasversali prodotte da una specifica sorgente.

5.7. Acquisizione dati e modalità operative di campagna

5.7.1 Indagine di tomografia sismica a rifrazione

L'indagine ha previsto l'esecuzione di 1 profilo realizzato con tecnica di tomografia sismica a rifrazione basata sulla velocità di propagazione delle onde di compressione (onde P). Il profilo, denominati L1 tomo 2D è stato realizzato cercando di ottimizzare il risultato in funzione dell'intervento da realizzare. Lunghezza e posizionamento sono stati quindi studiati in maniera tale da ottenere un ottimo dettaglio del segnale in corrispondenza dell'area di maggiore interesse. Nella tabella si riporta l'area di lavoro, la codifica della linea, la lunghezza della sezione di rilievo, l'interdistanza geofonica:

Stendimento	Lunghezza stendimento(m)	Interdistanza geofonica (m)	Numero energizzazioni	Passo energizzazione(m)	Profondità raggiunta (m)
L1tomo2D	115	5	10	15	Ca. 25

Ogni energizzazione è stata ripetuta dalle 2 alle 10 volte per migliorare mediante operazioni di stacking (somma di più impulsi sismici generati nella medesima posizione) la qualità del segnale acquisito (aumento del rapporto segnale/disturbo).

L'indagine è stata eseguita infiggendo a terra i geofoni e collegandoli alla strumentazione di acquisizione; in seguito si è provveduto a energizzare mediante mazza battente in corrispondenza di un dato geofono e registrando gli arrivi delle onde di compressione a seguito di ogni energizzazione; sono stati eseguiti diversi "tiri" in sequenza progressiva lungo lo stendimento sismico, per un totale di 10 energizzazioni a linea.

Successivamente, utilizzando il rilievo topografico a disposizione ed effettuando misurazioni in sito è stato ricostruito il profilo topografico dello stendimento sismico.

4.7.2 Indagine sismica tipo MASW

L'indagine ha previsto l'esecuzione di 1 profilo realizzato con tecnica sismica a rifrazione metodologia MASW. Il profilo, denominato L1 MASW è stato eseguito nella stessa posizione dello stendimento L1 tomo2D e nella tabella si riportano l'area di lavoro, la codifica della linea, la lunghezza della sezione di rilievo, l'interdistanza geofonica:

Stendimento	Lunghezza stendimento(m)	Interdistanza geofonica	Numero energizzazioni	Passo energizzazione(m)	Profondità raggiunta(m)
L1 masw	115	5	8 (a 5m e 10m di distanza dal geofono 1 e 24)	5-10	Ca.30

L'indagine è stata eseguita infiggendo a terra i geofoni e collegandoli alla strumentazione di acquisizione: in seguito si è provveduto a energizzare mediante mazza battente.

5.7.3 Indagine sismica tipo ReMi

L'indagine ha previsto l'esecuzione di 1 profilo realizzato con tecnica sismica a rifrazione metodologia ReMi. Il profilo, denominato L1 ReMi, è stato eseguito nella stessa posizione dello stendimento L1 tomo2D e nella tabella seguente si riportano l'area di lavoro, la codifica della linea, la lunghezza di ciascuna sezione di rilievo, l'interdistanza geofonica:

Stendimento	Lunghezza stendimento(m)	Interdistanza geofonica	Numero energizzazioni	Passo energizzazione(m)	Profondità raggiunta(m)
L1 ReMi	115	5	//	//	Ca.60

L'indagine è stata eseguita infiggendo a terra i geofoni e collegandoli alla strumentazione di acquisizione ed in seguito si è provveduto ad effettuare la registrazione in modalità passiva della strumentazione.

5.8. Analisi ed elaborazione dei dati

5.8.1 Indagine tomografia sismica a rifrazione

Le linee di sismica a rifrazione sono state analizzate tramite elaborazione tomografica con metodologia WET.

L'elaborazione in tomografia sismica ha previsto i seguenti step:

1. Definizione dei tempi di arrivo

I dati acquisiti sono stati filtrati utilizzando il software Rayfract, quindi dopo aver impostato le geometrie di acquisizione, è stato effettuato il picking dei primi arrivi per ogni traccia geofonica.

2. Elaborazione tomografica

L'elaborazione tomografica è stata effettuata con il software Rayfract che utilizza il metodo di inversione WET (Wavepath Eikonal Travelttime).

L'algoritmo di inversione utilizza l'approccio basato sulle zone di Fresnel che costituisce un'alternativa ai metodi di inversione basati sul ray tracing.

Gli assunti di base di tale modellizzazione sono:

- i raggi sismici sono considerati come fronti d'onda sferici;
- il range di frequenza dell'impulso sismico è considerato finito (condizione rappresentativa della realtà);
- la perturbazione sismica indotta si propaga in uno spazio finito 3D (zona di Fresnel) attorno al raggio sismico.

L'analisi dei tempi di primo arrivo permette di definire il modello iniziale di velocità (gradiente), attraverso il quale calcolare i tempi di arrivo teorici delle onde sismiche. Calcolando i tempi residui (T_r), ossia la differenza tra tempo osservato e tempo calcolato, viene definita l'approssimazione del modello teorico al modello sperimentale.

Lo step successivo è dato dalla costruzione di un sistema di equazioni lineari che stabilisce la relazione tra i residui (T_r) e la variazione che deve essere apportata al modello iniziale di velocità per ottenere un modello quanto più possibile attendibile. L'iterazione del calcolo prosegue fino a quando la differenza tra tempi calcolati e tempi osservati risulta accettabile.

I risultati dell'inversione tomografica sono:

- matrice V_p ;
- dromocrone calcolate;
- valori di RMS dei tempi residui;
- matrice di copertura (coverage): copertura dei raggi sismici nello spazio indagato;
- matrice di risoluzione: scostamento del modello finale dal modello iniziale (variazione apportata dal processo tomografico al modello iniziale).

3. Restituzione e interpretazione e delle sezioni sismiche

I dati delle matrici V_p sono rappresentati in contouring 2D (con opportuna scala colore) mediante il software Surfer utilizzando un algoritmo di Kriging.

5.8.2 Indagine sismica tipo MASW

Il modello di suolo e quindi il profilo di velocità delle onde di taglio verticali possono essere individuati con procedura manuale o con procedura automatica o con una combinazione delle due. Generalmente si assegnano il numero di strati del modello p e si variano lo spessore h e la velocità V_s degli strati.

Nella procedura manuale l'utente assegna per tentativi diversi valori delle velocità V_s e degli spessori h , cercando di avvicinare la curva di dispersione numerica alla curva di dispersione sperimentale. Nella procedura automatica (Roma, 2002, Roma, 2001, Joh, 1998) la ricerca del profilo di velocità ottimale è affidata ad un algoritmo di ricerca globale o locale che cerca di minimizzare l'errore tra la curva sperimentale e la curva numerica. In genere quando l'errore relativo tra curva sperimentale e curva numerica è compresa tra il 5% e il 10% si ha un soddisfacente accordo tra le due curve e il profilo di velocità delle onde di taglio V_s e quindi il tipo di suolo sismico conseguente rappresenta una soluzione valida da un punto di vista ingegneristico. Dopo aver determinato il profilo di velocità delle onde di taglio verticali V_s è possibile procedere al calcolo della velocità equivalente nei primi 30m di profondità V_{s30} e quindi individuare la categoria sismica del suolo.

L'elaborazione dei dati sismici con metodo MASW è stata effettuata per mezzo del software SWAN che, mediante la trasformata di Fourier, è in grado di fornire indicazioni sulla suddivisione delle unità litologiche del sottosuolo mediante l'individuazione delle onde Vs.

5.8.3 Indagine sismica tipo ReMi

L'elaborazione dei dati sismici con metodo REMI è stata effettuata per mezzo del software SWAN che, mediante la trasformata di Fourier, è in grado di fornire indicazioni sulla suddivisione delle unità litologiche del sottosuolo mediante l'individuazione delle onde Vs.

Il processo di inversione del dato sismico risulta essere simile a quello utilizzato per l'elaborazione con metodo MASW, con la differenza che, utilizzando frequenza più basse, risultano indagabili strati più profondi, a scapito però di una minore precisione nella definizione delle Vs per gli strati superficiali.

5.9. Rappresentazione e interpretazione dei dati sismici con metodologia tomografica

L'elaborazione dei dati di campagna ha consentito la redazione di una sezione tomografica sismica (vedi Fig. 24 - 25). L'esame delle curve di isovelocità delle onde P ha permesso di evidenziare come sostanzialmente nella zona di indagine si riscontri la presenza di depositi di materiale caratterizzato da medio basse velocità sismiche (400 - 1000m/s), i quali lasciano spazio in profondità a materiali via via sismicamente più veloci.

L'interpretazione dei dati di velocità Vp ha permesso di definire la presenza nel sottosuolo dell'area di indagine di almeno cinque orizzonti sismostratigrafici sovrapposti; di seguito si fornisce una breve descrizione degli orizzonti individuati, dal più superficiale al più profondo. Inoltre va sottolineato che per fornire maggiore attendibilità all'interpretazione fornita, la definizione dei sismostrati è stata effettuata tenuto conto anche dei valori di velocità Vs derivanti dalla indagine MASW e ReMi effettuate lungo il medesimo stendimento L1.

5.9.1 Linea Sismica L1

Depositi superficiali ghiaioso sabbiosi poco addensati

Il deposito superficiale in questione, presenta degli spessori di circa 2,5m dal P.C. e risulta essere relativamente continuo sull'area di indagine; i valori di velocità Vp risultano essere compresi tra 400m/s e 1000m/s, mentre i valori di Vs derivati da indagine MASW risultano essere di 520m/s risultando quindi compatibile con la presenza di depositi superficiali a carattere ghiaioso e ghiaioso sabbiosi debolmente costipati.

Depositi superficiali sabbioso-ghiaiosi poco addensati - saturi

Il deposito superficiale in questione, risulta rinvenibile al di sotto del precedente sismostrato fino ad una profondità di circa -5m dal P.C. e risulta essere relativamente continuo sull'area di indagine; i valori di velocità Vp risultano essere compresi tra 1000m/s e 1500m/s, mentre i valori di Vs derivati da indagine MASW risultano essere compresi tra 522m/s

e 350m/s risultando quindi compatibile con la presenza di depositi caratterizzati da alternanze di materiale a carattere sabbioso-ghiaioso debolmente costipati: tali depositi sono da intendersi saturi.

Depositi superficiali ghiaioso costipati – saturi / substrato litoide alterato

Il deposito superficiale in questione, risulta rinvenibile al di sotto del precedente sismostrato fino ad una profondità di circa -8m dal P.C. e risulta essere relativamente continuo sull'area di indagine; i valori di velocità V_p risultano essere maggiori di 1500m/s e fino a 2000m/s, mentre i valori di V_s derivati da indagine MASW risultano essere di 1009m/s risultando quindi compatibile con la presenza di depositi a granulometria piuttosto grossolana, ghiaioso-sabbiosi costipati e saturi, o con la presenza di un substrato litoide piuttosto alterato e fratturato.

Substrato litoide fratturato

Il sismostrato in questione, risulta rinvenibile al di sotto del precedente sismostrato fino ad una profondità di 12m nelle zone laterali dello stendimento e di 17m circa nella porzione mediana; i valori di velocità V_p risultano essere compresi tra 2500m/s e 3000m/s, mentre i valori di V_s derivati da indagine MASW risultano essere compresi tra 1363m/s e 1496m/s risultando quindi compatibile con la presenza di un substrato litoide a carattere carbonatico localmente fratturato.

Substrato litoide compatto

Il sismostrato in questione, risulta rinvenibile al di sotto del precedente fino alla profondità massima di indagine di circa 25m da P.C.; i valori di velocità V_p risultano essere superiori a 3500m/s, mentre i valori di V_s derivati da indagine MASW risultano essere compresi tra 1500m/s e 1600m/s risultando quindi compatibile con la presenza di un substrato litoide a carattere carbonatico molto compatto.

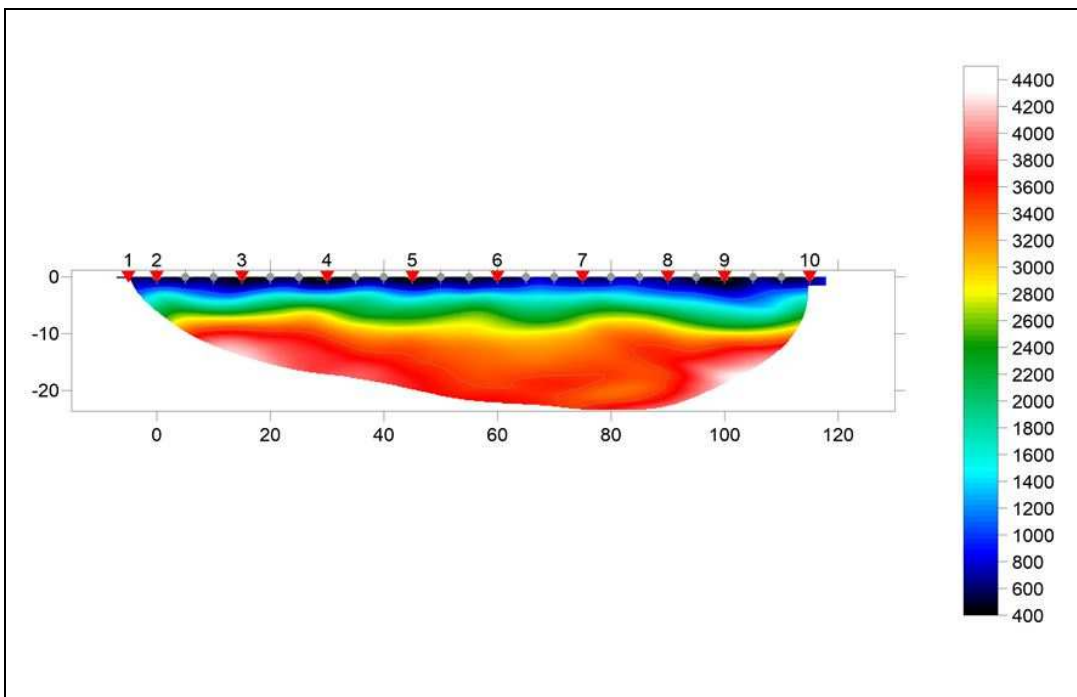


Fig. 24: Sezione tomografica sismica relativa allo stendimento L1 (valori di velocità V_p espressi in m/s).

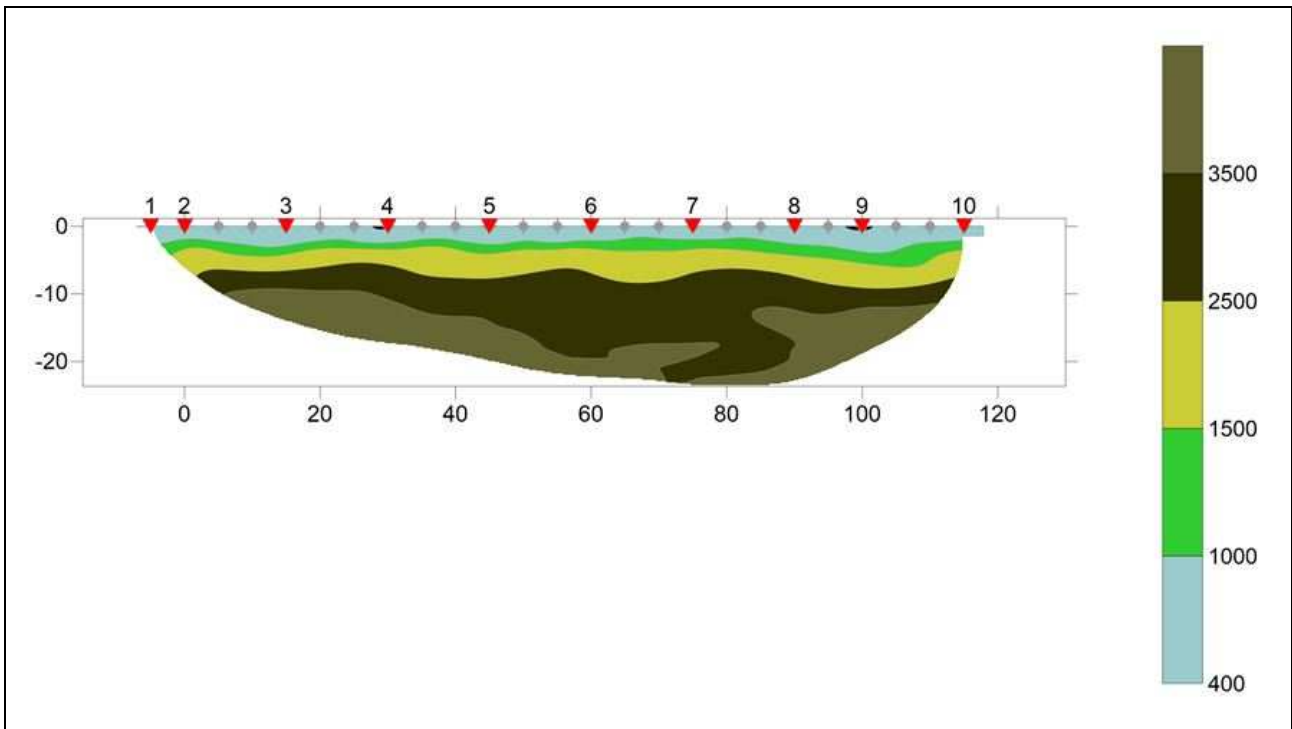


Fig. 25: Interpretazione sismostratigrafica dello stendimento di tomografia sismica L1 (valori di velocità V_p espressi in m/s).

5.10. Rappresentazione e interpretazione dei dati sismici con metodologia MASW

Linea sismica L1 - MASW

Di seguito si riporta il sismogramma rappresentativo della propagazione delle onde sismiche nel suolo per la sezione indagata:

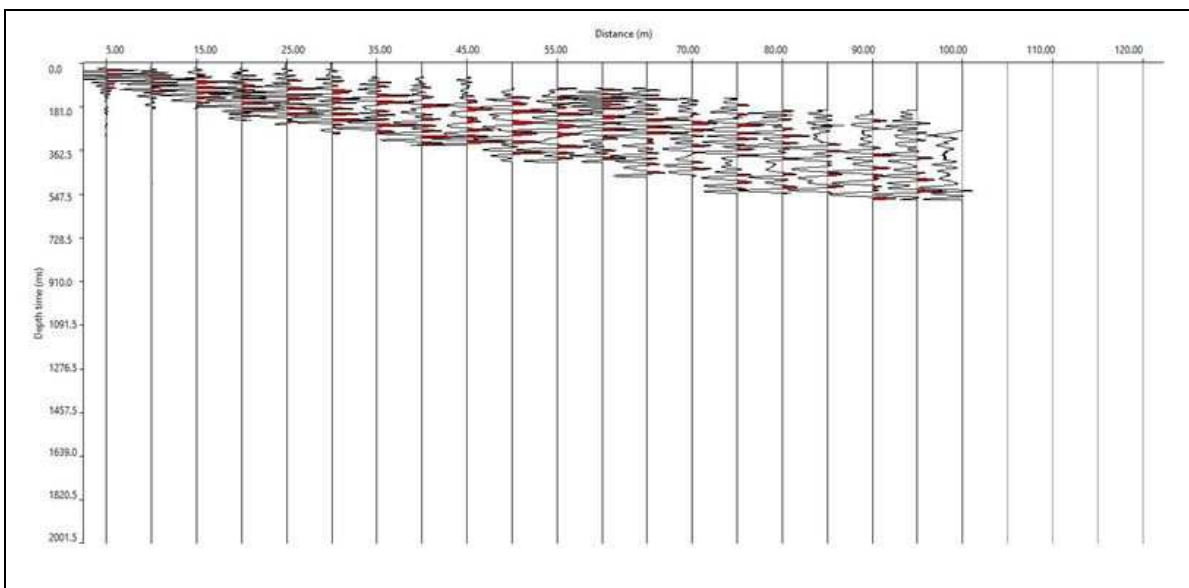


Fig. 26: Sismogramma della base sismica L1- MASW.

5.10.1 Interpretazione dei dati

L'elaborazione dei sismogrammi ha consentito di estrapolare la trasformata di Fourier e da questa si risale alla curva di dispersione (Fig. 27) che, confrontata, mediante sovrapposizione, con quella teorica consente di ottenere sia gli spessori dei vari strati che le rispettive velocità.

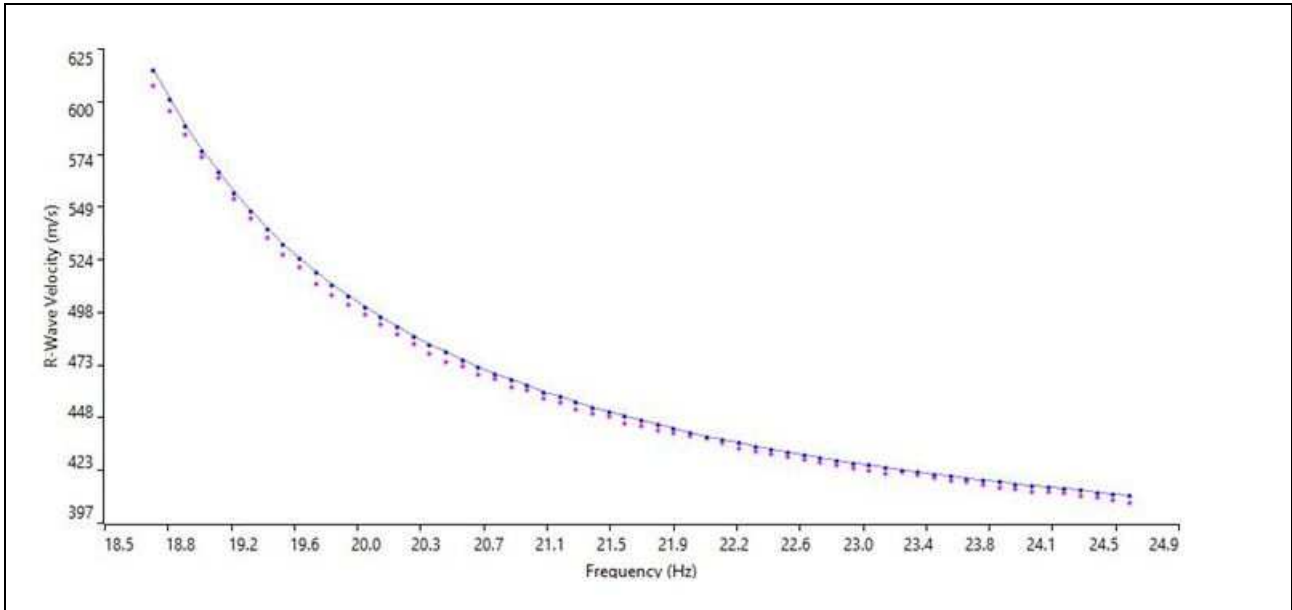


Fig. 27: Curva di dispersione combinata della base sismica L1- MASW.

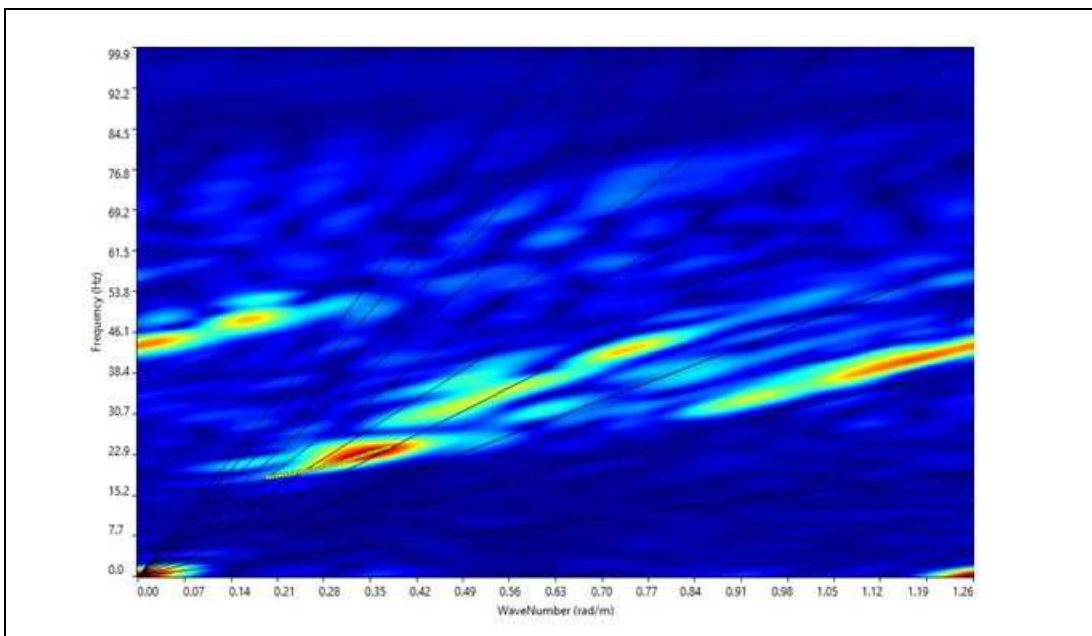


Fig. 28: Spettro FK della base sismica L1- MASW.

5.10.2 Ricostruzione del sottosuolo mediante le onde S

Dalla sovrapposizione delle curve di dispersione, attraverso algoritmi iterativi che modificano sia lo spessore che la velocità sismica dei sismostrati, si è ottenuta la ricostruzione del sottosuolo in orizzonti aventi differenti spessori e valori di velocità come di seguito indicato e graficamente riportati nel diagramma (alla base le velocità Vs30 e Vseq stimate):

	Thickness	Depth	Vs
Layer 1	2.71	0.00	522
Layer 2	4.97	2.71	350
Layer 3	0.80	7.68	393
Layer 4	1.23	8.48	1009
Layer 5	4.05	9.70	1363
Layer 6	9.43	13.75	1496
Layer 7	INF	23.19	1668

Vs 30 = 833m/s e Vs_{eq} = 396m/s

Tabella 2: Valori delle Vs in relazione alla profondità.

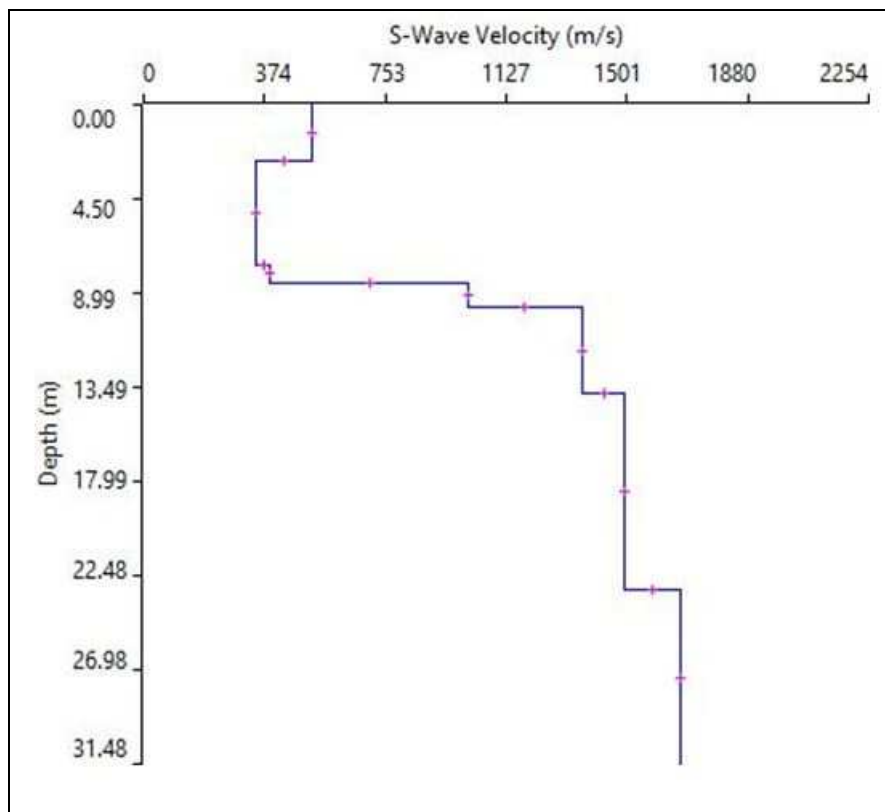


Fig. 29: Diagramma delle velocità Vs riferite ai vari strati intercettati nella base sismica L1-MASW.

Da quanto precedentemente riscontrato emerge che il terreno indagato, con la metodologia MASW, presenta per la linea eseguita un valore delle V_{seq} pari a **396m/s**, con riferimento all'attuale piano campagna e pertanto riferibile, in base alla classificazione attualmente vigente delle Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. LL.PP. 17 Gennaio 2018) ad una **categoria di sottosuolo B**, che qualora confermata a seguito della valutazione della suscettività sismica di cui al successivo paragrafo 4.12 rappresenterà il punto di partenza per la successiva classificazione sismica sitospecifica.

5.11. Rappresentazione e interpretazione dei dati sismici con metodologia REMI

Linea sismica L1 - REMI

Di seguito si riporta il sismogramma rappresentativo della propagazione delle onde sismiche nel suolo per la sezione indagata:

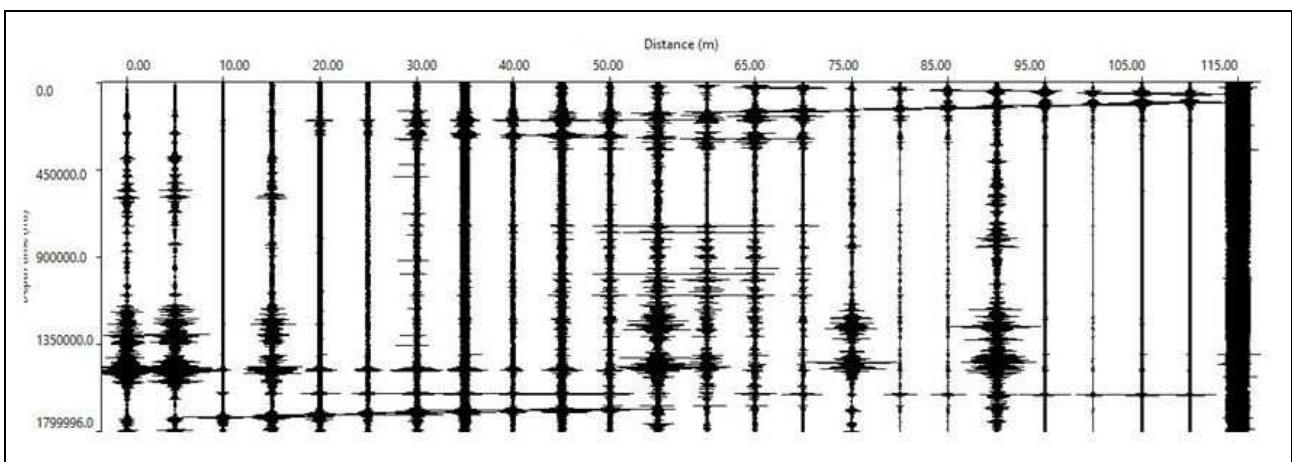


Fig. 30: Sismogramma della base sismica L1 - ReMi.

5.11.1 Interpretazione dei dati

L'elaborazione dei sismogrammi ha consentito di estrapolare la trasformata di Fourier e da questa si risale alla curva di dispersione (Fig. 31) che, confrontata, mediante sovrapposizione, con quella teorica consente di ottenere sia gli spessori dei vari strati che le rispettive velocità.

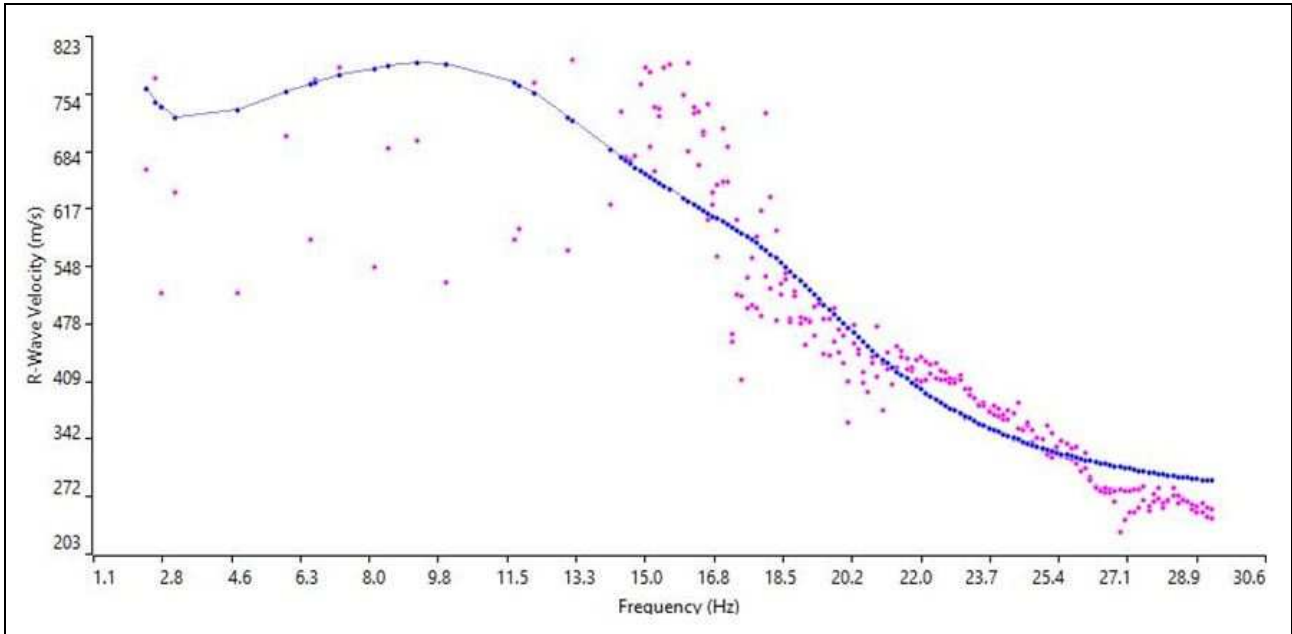


Fig. 31: Curva di dispersione combinata della base sismica L1 - ReMi.

4.11.2 Ricostruzione del sottosuolo mediante le onde S

Dalla sovrapposizione delle curve di dispersione, attraverso algoritmi iterativi che modificano sia lo spessore che la velocità sismica dei sismostrati, si è ottenuta la ricostruzione del sottosuolo in orizzonti aventi differenti spessori e valori di velocità come di seguito indicato e graficamente riportati nel diagramma (alla base le velocità V_{s30} e V_{seq} stimate):

	Thickness	Depth	V_s
Layer 1	5.44	0.00	284
Layer 2	2.94	5.44	660
Layer 3	1.91	8.38	696
Layer 4	3.38	10.29	626
Layer 5	10.47	13.67	1037
Layer 6	32.93	24.15	1189
Layer 7	3.65	57.08	421
Layer 8	6.57	60.73	592
Layer 9	15.31	67.29	416
Layer 10	INF	82.61	980

$V_s 30 = 641\text{m/s}$ e $V_{seq} = 390\text{m/s}$

Tabella 3: Valori delle V_s in relazione alla profondità.

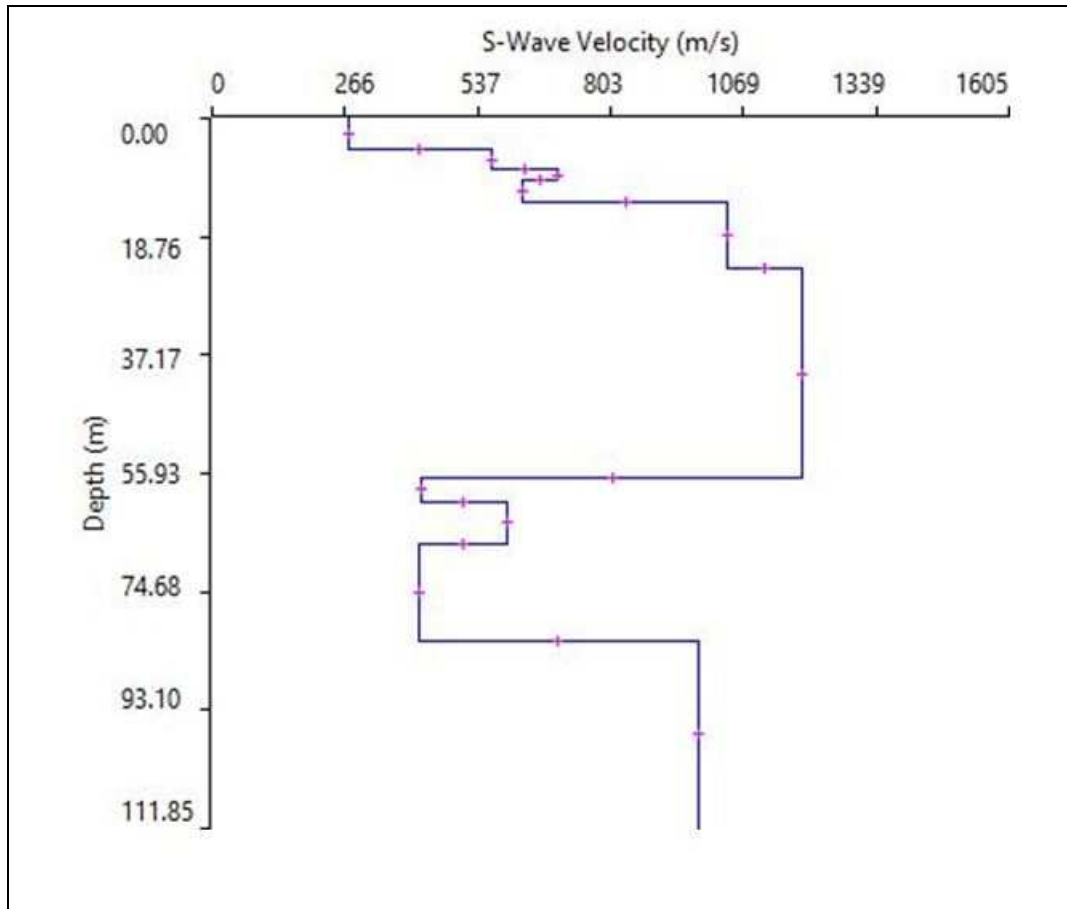


Fig. 32: Diagramma delle velocità Vs riferite ai vari strati intercettati nella base sismica L1-ReMi.

Da quanto precedentemente riscontrato emerge che il terreno indagato, con la metodologia REMI, presenta per la linea eseguita un valore delle V_{sew} pari a **390m/s**, con riferimento all'attuale piano campagna e pertanto riferibile, in base alla classificazione attualmente vigente delle Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. LL.PP. 17 Gennaio 2018) ad una **categoria di sottosuolo B**, che qualora confermata a seguito della valutazione della suscettività sismica di cui al paragrafo successivo rappresenterà il punto di partenza della classificazione sismica sitospecifica di cui si relazionerà nel prossimo capitolo.

Si può quindi affermare come l'indagine effettuata confermi sostanzialmente i dati ottenuto mediante l'indagine MASW eseguita: ai fini della valutazione della suscettibilità sismica dell'area saranno quindi tenuti in considerazione i valori ricavati dall'indagine sismica MASW 1, estendendoli in profondità mediante le risultanze dell'indagine ReMi.

L'indagine remi ha inoltre messo in luce la presenza di un cambio di velocità a profondità comprese tra 56 e 67 m dal piano campagna, fattore da ricondurre probabilmente a un cambio litologico importante nel substrato litoide presente, oppure alla presenza di uno stato di fratturazione maggiormente pervasivo nello stesso, fattore per cui le velocità sismiche Vs appaiono diminuire.

5.12. Valutazione della suscettibilità sismica dell'area in studio

5.12.1 Effetti litologici

Al fine di determinare i valori di F_a dal punto di vista degli effetti litologici, sono stati utilizzati i risultati emersi dall'esecuzione dello stendimento di tipo geofisico con metodo MASW il quale ha permesso la compilazione di apposite schede messe a disposizione dalla Regione Lombardia. Con tale indagine si è calcolato il valore di F_a (fattore di amplificazione) da confrontare con i limiti di riferimento indicati dalla Regione Lombardia.

Per ottenere il suddetto F_a è necessario ricavare il valore di V_{S30} (onde sismiche di taglio o trasversali) utilizzando le velocità V_s degli strati intercettati mediante la formula precedentemente riportata. In questo modo si risale al tipo di sottosuolo, che come precedentemente indicato si tratta di **tipo B**.

Sulla base di parametri geotecnici e litologici, si individua la litologia prevalente del sito e da questo dato si sceglie la relativa scheda di riferimento riportata nell'Allegato 5 della D.G.R. IX/2616 del 30 novembre 2011. Nello specifico la normativa regionale riporta 6 tipi di schede litologiche:

- scheda per le litologie prevalentemente ghiaiose;
- scheda per le litologie prevalentemente limoso-argillose (tipo 1 e tipo 2)
- scheda per le litologie prevalentemente limoso-sabbiose (tipo 1 e tipo 2)
- scheda per le litologie sabbiose (da utilizzarsi in zone di pianura)

Si riportano, in un apposito diagramma all'interno di queste schede, i valori delle V_s relative ad ogni strato. Tale confronto permette di verificare se si rientra o meno nel campo di validità della scheda di riferimento. I dati ottenuti in campagna e riportati in Tabella 2 vengono inseriti all'interno della scheda relativa al grafico per "litologia ghiaiosa".

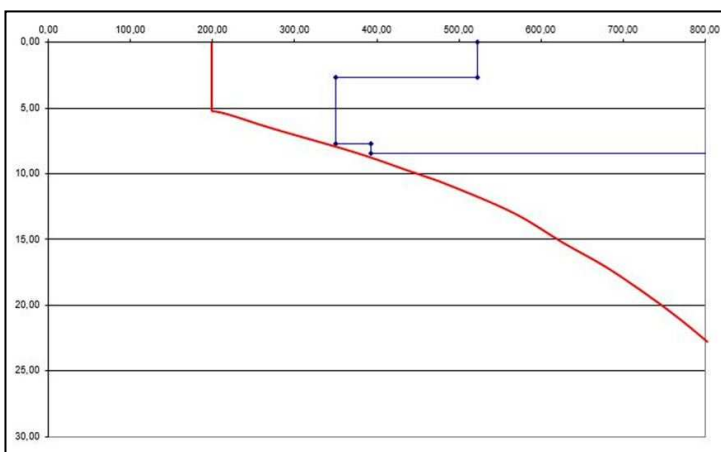


Fig. 33: Grafico relativo alla scheda "litologia ghiaiosa" a cui sono stati sovrapposti i valori parziali di ogni intervallo di terreno in base alle v_s ricavate dalla L1 masw.

Come è possibile osservare l'andamento delle V_s è posizionato, salvo locali inversioni di velocità localizzate, ampiamente al di "sopra" della linea rossa che divide il campo di validità dal campo di non validità. Il fatto che questa scheda litologica soddisfi questo primo "vincolo", comporta che i valori delle V_s ricavati, siano correlabili con la relativa scheda di riferimento per "litologia ghiaiosa". Ottenuti la velocità del primo strato ed il relativo spessore si riportano questi valori all'interno dell'abaco (Fig. 34) al fine di ricavare il colore della curva da utilizzare (Fig. 35) per ottenere il valore di F_a . Tale parametro (F_a) verrà confrontato con quello riportato in bibliografia in funzione della struttura da realizzare:

intervallo 0,1-0,5 s - riferito a strutture relativamente basse, regolari e piuttosto rigide e intervallo 0,5-1,5 s - riferito a strutture più alte e flessibili. Per utilizzare correttamente l'abaco di figura 34, come vincolo viene posto che il primo strato abbia almeno 4 m di spessore. Se tale condizione non fosse soddisfatta è necessario calcolare la media pesata almeno dei primi 4 metri di terreno tenendo in dovuta considerazione gli spessori parziali con le rispettive velocità delle onde di taglio.

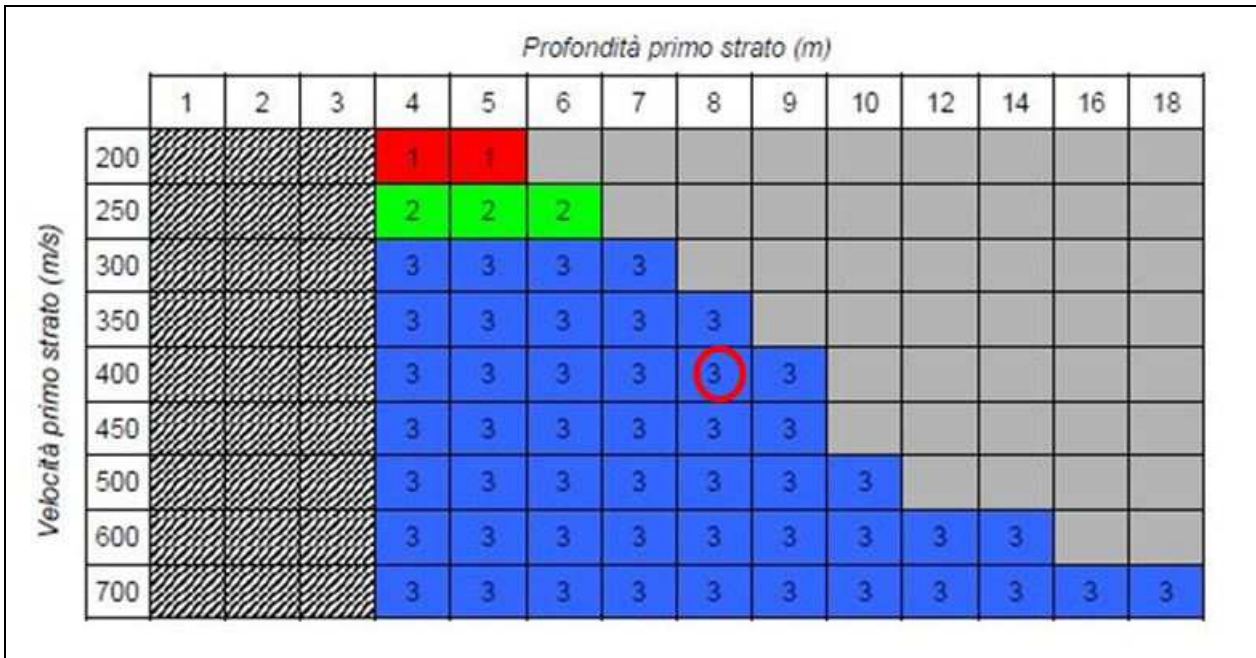


Fig. 34: Abaco che permette di individuare, in base al colore, la curva di riferimento per l'individuazione di F_a , grazie all'intersezione della profondità raggiunta dal primo strato e la sua velocità.

Nel nostro caso il primo strato risulta essere rispettivamente di 1.13m di spessore e pertanto è stata effettuata la media pesata relativa ai primi 5.04m ca. Si è così ottenuta una velocità del "primo strato" (considerando la profondità fino a 5.04m ca) di 445m/s. Ciò ha portato, per approssimazione, ad associare ai primi 5m la velocità minima dell'abaco di 450 m/s. Intersecando il valore di velocità riscontrata con la profondità sopra indicata, si ricade nel campo 3, che corrisponde alla curva 3blu rossa di figura 28.

Con i valori sopra ottenuti si calcola il periodo "T" relativo al sito. Nel caso la velocità verificata dall'indagine non raggiungesse gli 800 m/s occorre incrementare, come è stato fatto, la velocità e la profondità delle onde, utilizzando un passo adeguato, o una taratura da indagini ulteriori, fino all'intercettazione degli 800 m/s. Per la determinazione del periodo si utilizza la seguente equazione, facendo riferimento nel nostro caso all'acquisizione della linea L1 – MASW:

$$T = \frac{4 \times \sum_{i=1}^n h_i}{\left(\frac{\sum_{i=1}^n V_{s_i} \times h_i}{\sum_{i=1}^n h_i} \right)}$$

h_i = Spessore in metri dello strato i-esimo
 V_{s_i} = Velocità dell'onda di taglio i-esima

Stendimento sismico	Valore del periodo T calcolato
L1 Masw	0,083 s

Tabella 5: indicazione del valore del periodo T calcolato.

Conoscendo la velocità del primo strato, la curva di riferimento ed il valore del periodo T calcolato, si può risalire al valore di Fa utilizzando gli abachi di riferimento di fig. 35 e fig. 36 per la litologia "ghiaiosa" e riferiti rispettivamente ad edifici bassi ed ad edifici alti.

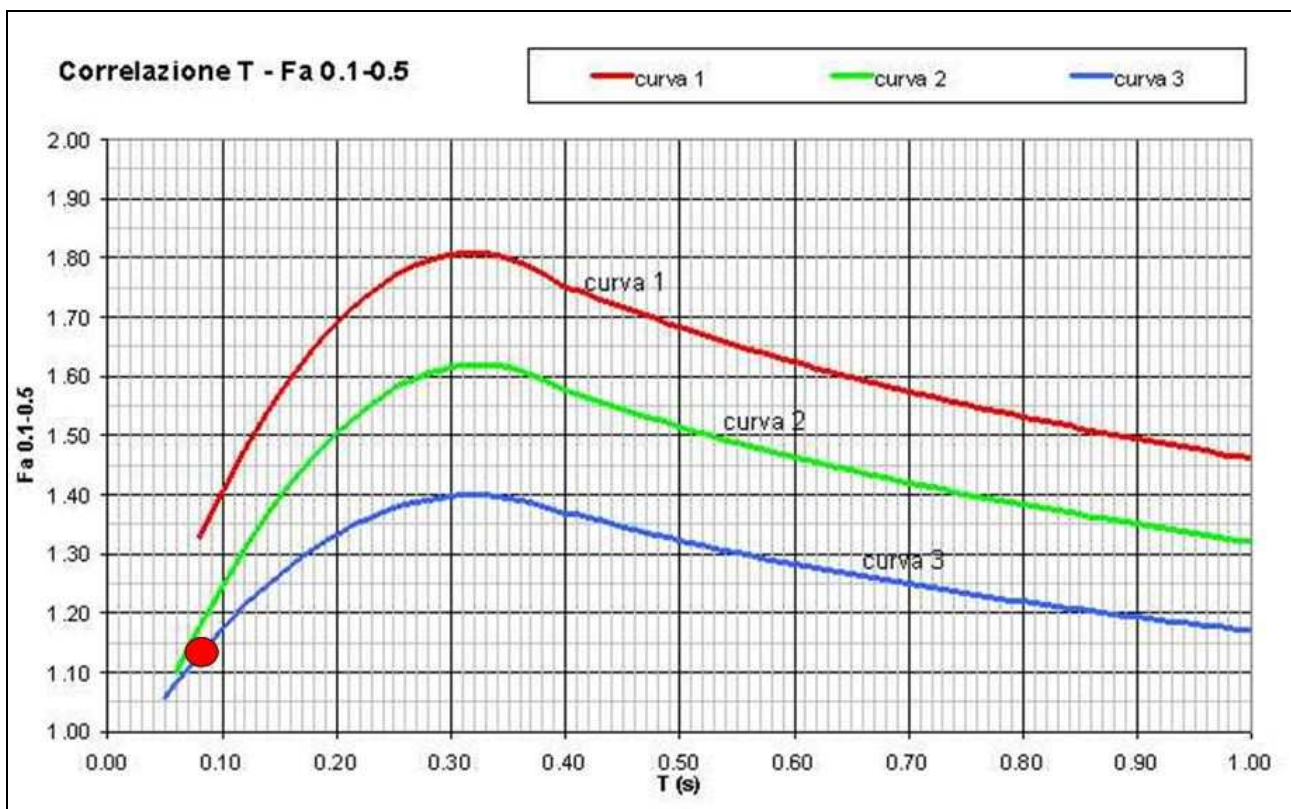


Fig. 35: Abaco di riferimento per la litologia ghiaiosa per determinare Fa sulla base di T medio di 0.083s e della curva di riferimento (riferito ad edifici bassi).

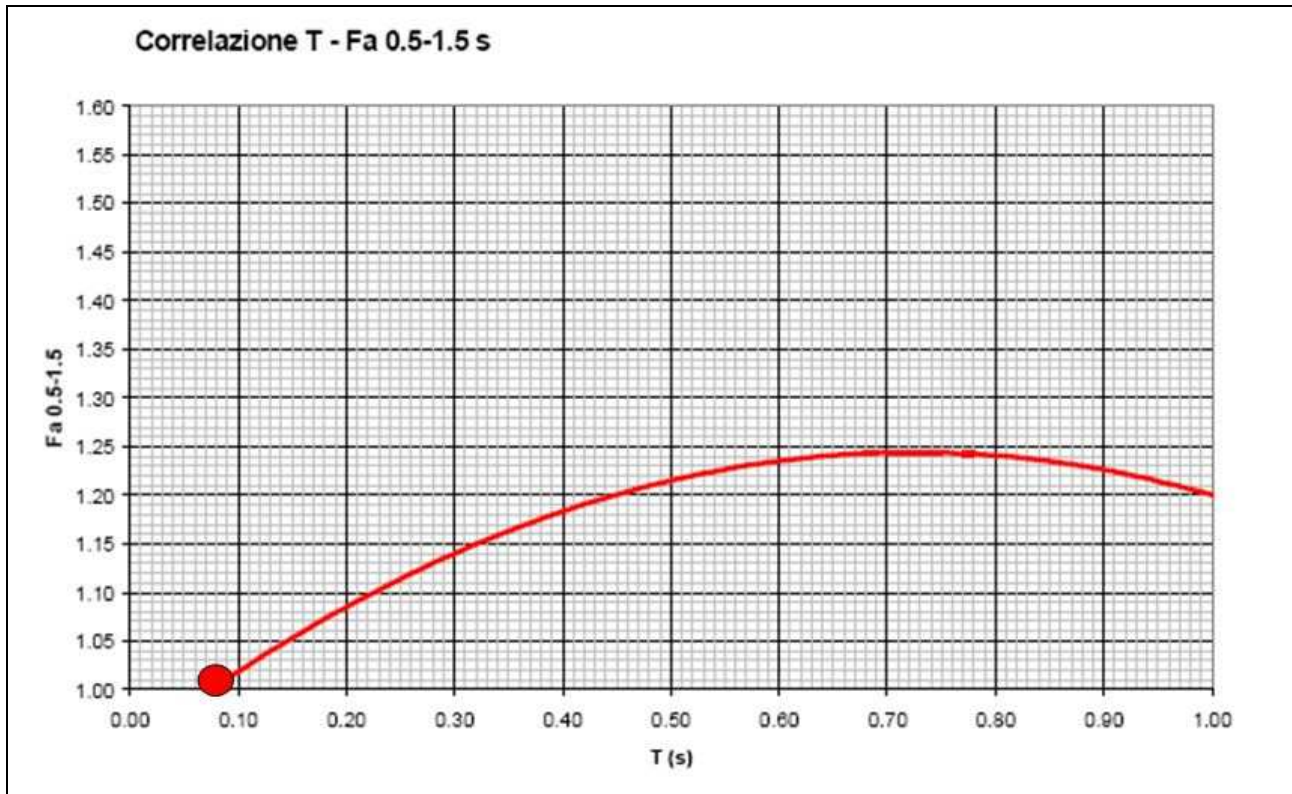


Fig. 36: Abaco di riferimento per la litologia ghiaiosa per determinare Fa sulla base di T medio di 0.194s e della curva di riferimento (riferito ad edifici alti).

La procedura prevede di valutare Fa con le schede di valutazione sopra riportate e di confrontarlo con il corrispettivo valore di soglia, considerando una variabilità di $\pm 0,1$, che tiene conto la variabilità del valore di Fa ottenuto. Dagli abachi emerge come il valore medio attribuito al periodo ($T=0.194$), identifichi sulla curva blu un valore di **Fa di 1.50 per edifici bassi (Fa di riferimento per i terreni di tipo B=1,4) e Fa 1,14 per edifici alti (Fa di riferimento per i terreni di tipo B = 1.7).**

Ne deriva che, nel caso di edifici bassi, il valore di Fa calcolato e riferito alla categoria di sottosuolo B è superiore al valore di riferimento, ma nel range di variabilità (variabilità di $\pm 0,1$) previsto dal metodo applicato e per tale motivo si ritiene di poter confermare tale categoria di sottosuolo (B) ai fine progettuali e pertanto nel capitolo riguardante la classificazione sismica (capitolo 6) si farà correttamente riferimento alla categoria di sottosuolo B.

Le tabelle sottostanti riportano i valori di Fa relativi, nel primo caso ad edifici bassi (max 4 piani), nel secondo caso ad edifici alti e flessibili (5 o più piani) per ogni tipo di suolo individuato dalla Regione Lombardia per il comune di Cassiglio:

VALORI SOGLIA PER IL PERIODO COMPRESO TRA 0.1 - 0,5s					
COMUNE	Classificazione sismica del sito	Valori di soglia			
		Suolo tipo B	Suolo tipo C	Suolo tipo D	Suolo tipo E
Cassiglio	3	1.4	1.8	2.2	2.0

VALORI SOGLIA PER IL PERIODO COMPRESO TRA 0.5 - 1,5s					
COMUNE	Classificazione sismica del sito	Valori di soglia			
		Suolo tipo B	Suolo tipo C	Suolo tipo D	Suolo tipo E
Cassiglio	3	1.7	2.4	4.2	3.1

5.13. Valutazione della suscettibilità alla liquefazione dei terreni dell'area in studio

Alla luce della tipologia di sismostrati individuati con le indagini di cui ai punti precedenti e valutata la granulometria dei depositi presenti nell'area in esame, caratterizzata da ghiaia, ciottoli e massi subordinata alla componente sabbiosa e fine, non si è ritenuto necessario procedere con la verifica a liquefazione dei sedimenti presenti.

6. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Su incarico della Società "Italgen spa" con sede in via Kennedy, 1 a Villa di Serio (BG) è stato realizzato il presente studio geologico finalizzato ad investigare gli aspetti geologici, geomorfologici e idrogeologici, nonché di dinamica geomorfologica e degli areali sviluppati a monte dell'invaso di Cassiglio in funzione della valutazione degli apporti terrigeni in alveo, della stima delle volumetrie accumulate nei pressi dell'invaso oltre che nell'invaso stesso anche e soprattutto in relazione alla loro distribuzione granulometrica.

Nell'ambito dell'espletamento dell'incarico affidato dal Committente si è proceduto con l'effettuazione delle seguenti tipologie di attività e indagini:

- a) **Consultazione delle diverse fonti di natura bibliografica disponibili per l'areale in esame** con particolare attenzione a quanto indicato nel recente foglio CARG Lecco (076) della Carta Geologica d'Italia (scala 1:50.000) e nelle relative note illustrative, nella Carta Geologica della Provincia di Bergamo a cura del Servizio Territorio della Provincia di Bergamo (scala 1:50.000) oltre che alle informazioni ed alla documentazione di natura geologica presente sul geoportale della Provincia di Bergamo e della Regione Lombardia sia per gli aspetti geologici della pianificazione territoriale a scala comunale (componente geologica, idrogeologica e sismica del PGT) che sovracomunale (PTCP della Provincia di Bergamo, PAI e PGRA) (vedi capitolo 2 e capitolo 3).
- g) **Rilevamento geologico e geomorfologico** con restituzione cartografica alla scala 1:5.000 di rilievo geologico strutturale e geomorfologico con evidenziati i principali elementi di dinamica geomorfologica attivi e quiescenti presenti nell'area di indagine e di **rilevamento geomecanico** (per gli affioramenti rocciosi ritenuti più significativi sono state compilate delle schede monografiche di affioramento per un numero totale di 8 schede) effettuate negli areali dei sottobacini sopraccitati.
- h) **Valutazione della granulometria dei depositi presenti** lungo gli alvei dei sottobacini in esame e nelle aree di accumulo prospicenti l'invaso in esame sia dal lato della Valle di Cassiglio e dei suoi affluenti principali (Valle Gazonera e Valle Canale del Chignolo) sia dal lato della Valle dei Faggi. Tale valutazione ha consentito la stesura di 8 schede di analisi granulometrica punto di partenza per le valutazioni sulla tipologia di materiale movimentabile nei corsi d'acqua in esame e sulle volumetrie effettivamente movimentate e sedimentate nell'area di invaso.
- i) **Stima del volume medio di materiale solido sedimentatosi in un anno nell'invaso in esame e valutazione del volume totale di materiali accumulatisi nell'ottica delle attività di svasso per il ripristino delle condizioni ottimali di gestione dell'invaso stesso**
- j) **Campagna di indagini geofisiche mediante tecnica "Tomografia sismica a rifrazione (in onde P)" e mediante metodologia MASW / ReMi oltre che mediante acquisizioni di misure puntuali di rumore sismico ambientale di tipo HVSR** comprensiva di acquisizione dati, elaborazione, interpretazione e stesura dei report tecnici e da effettuarsi nei tratti ritenuti più significativi nell'area di fondovalle afferente all'invaso in esame.

Scopo principale della campagna di indagini geofisiche è quello di investigare il sottosuolo per una profondità di 20 - 30 onde per permettere di discretizzare la presenza delle diverse lenti di depositi quaternari presenti e di individuare la profondità del substrato roccioso e la tipologia dello stesso anche nell'ottica di fornire utili indicazioni per la

quantificazione dei volumi di sedimento presenti ed in funzione di fornire indicazioni circa la stabilità dei versanti dell'invaso in esame in caso di suo svaso.

k) **Stesura della presente relazione geologica e tecnica finale, degli elaborati cartografici e degli Allegati tecnici di seguito elencati:**

- **Tav. 01:** Carta Geologica e strutturale (scala 1:5.000).
- **Tav. 02:** Carta Geomorfologica e della dinamica geomorfologica (scala 1:5.000).
- **Tav. 03:** Carta delle pendenze e dell'acclività di versante (scala 1:5.000).
- **Tav. 04:** Carta dell'Uso del suolo e della copertura vegetazionale (scala 1:5.000).
- **Allegato A:** Schede di sezioni d'alveo rilevate.
- **Allegato B:** Schede analisi geomeccanica affioramenti rocciosi.
- **Allegato C:** Schede di valutazione speditiva della granulometria del materiale in alveo.
- **Allegato D:** Report misure di rumore sismico ambientale con metodologia HVSR.

In conclusione per quanto riguarda gli aspetti geologici relativi alla zona di invaso e del bacino idrografico sotteso naturalmente, corrispondente ai bacini del torrente Cassiglio e della valle dei Faggi, le considerazioni riportate nei precedenti capitolo e paragrafi, tenuto conto delle indicazioni contenute nei report e negli allegati nonché nelle tavole cartografiche allegata alla presente relazione hanno messo in evidenza una situazione caratterizzata da un trasporto solido elevato e contraddistinto da una forte frazione grossolana che tende a sedimentarsi al limite della zona di invaso. La sedimentazione di materiale grossolano è responsabile di una riduzione della capacità di invaso iniziale, dell'ordine di un terzo, che può essere rimessa solo con interventi di escavazione. Per il resto dell'invaso è presente al fondo del materiale più fine la cui rimozione potrebbe avvenire, almeno in parte, con la sola apertura degli scarichi.

Dal punto di vista strettamente morfologico ed idrogeologico, in riferimento anche alle condizioni di stabilità, non si rilevano particolari controindicazioni connesse con le eventuali operazioni di svaso.

Si resta comunque a disposizione per eventuali approfondimenti d'indagine nonché per presenziare, se ritenuto necessarie, ad eventuali sopralluoghi congiunti con i referenti tecnici del Committente nonché con i funzionari delle Autorità preposte alla valutazione dei contenuti del presente studio.

Pisogne, maggio 2019



Dott. Geol. Fabio Fenaroli

Fabio Fenaroli

Ha collaborato: Dott.ssa Sonia Botticchio, Dott. Alberto Savini.

COMMITTENTE: "italgen spa" – Via Kennedy, 1 - 24020 – Villa di Serio (BG)

IMPIANTO IDROELETTRICO DI OLMO AL BREMBO – DERIVAZIONE STABINA

STUDIO GEOLOGICO DI SUPPORTO ALLA STESURA DEL PROGETTO DI GESTIONE DELL'INVASO DI CASSIGLIO

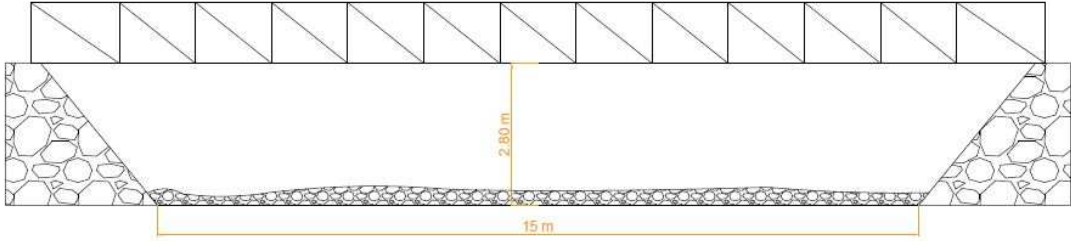


AI SENSI DELLA D.G.R. XI/5736 DEL 24 OTTOBRE 2016

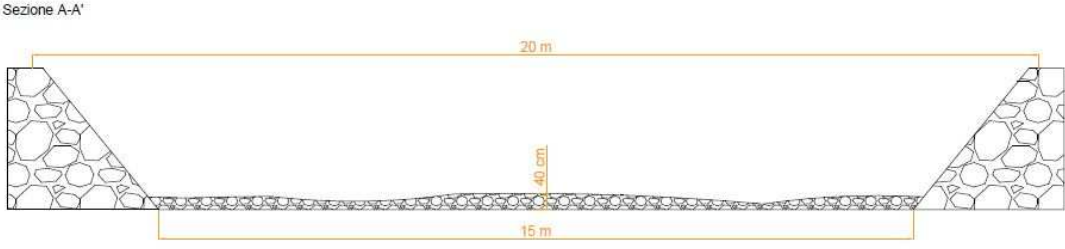
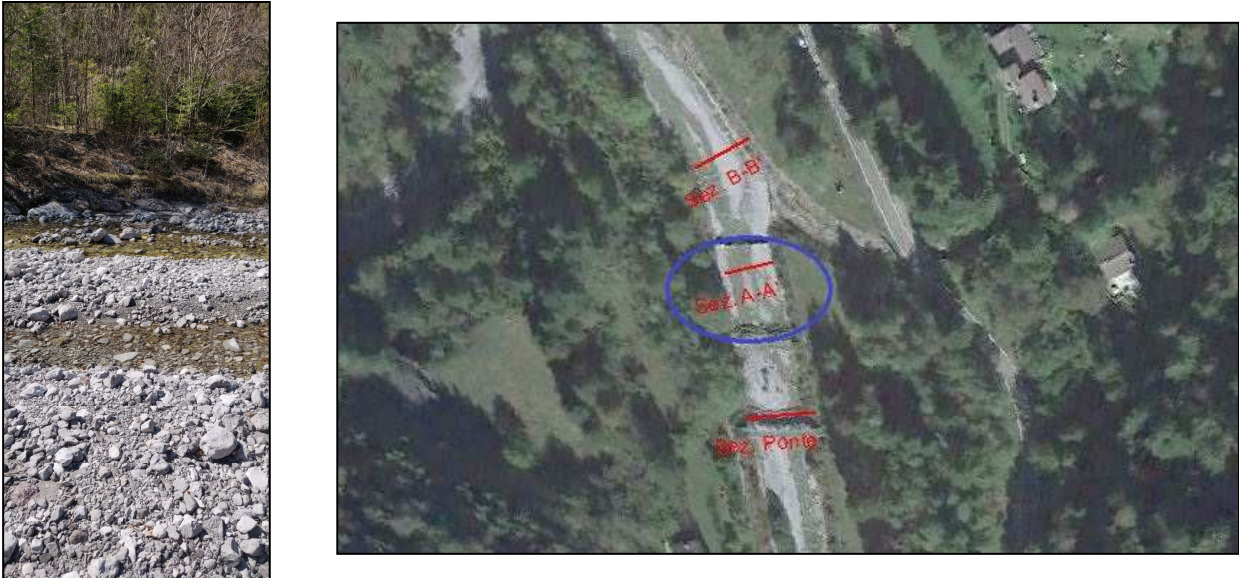
ALLEGATO A:
Schede di sezioni d'alveo rilevate

COMMITTENTE: "italgen spa" – Via Kennedy, 1 - 24020 – Villa di Serio (BG)

IMPIANTO IDROELETTRICO DI OLMO AL BREMBO – DERIVAZIONE STABINA
STUDIO GEOLOGICO DI SUPPORTO ALLA STESURA DEL PROGETTO DI GESTIONE DELL'INVASO DI CASSIGLIO
AI SENSI DELLA D.G.R. XI/5736 DEL 24 OTTOBRE 2016

SCHEDA DI CARATTERIZZAZIONE _ SEZIONE PONTE

CORSO D'ACQUA	Torrente Cassiglio	DATA RILIEVO	26/03/2019
QUOTA SEZIONE	641 m s.l.m.	RIF. CARTOGRAFICO_ CTR C4A2	
COORDINATE GEOGRAFICHE (UTM Zone 32N)	NORD	5089853.70	
	EST	547425.19	
DESCRIZIONE SEZIONE	Ponte in ferro a monte delle ultime due briglie		
DESCRIZIONE MORFOLOGICA DELLA SEZIONE			
SEZIONE	<p style="text-align: center;">Sezione ponte</p> 		
	<p>SPONDA DX A MONTE</p> <p>Argine artificiale, massi cementati</p>		
<p>SPONDA SX A MONTE</p> <p>Argine artificiale, massi cementati</p>			
<p>SPONDA DX A VALLE</p> <p>Argine artificiale, massi cementati</p>			
<p>SPONDA SX A VALLE</p> <p>Argine artificiale, massi cementati</p>			
DESCRIZIONE FONDO ALVEO A MONTE		Fondo regolare con presenza di ciottoli e ghiaie di varie dimensioni	
DESCRIZIONE FONDO ALVEO A VALLE		Fondo regolare con presenza di ciottoli e ghiaie di varie dimensioni	
NOTE			
FOTOGRAFIE			
			
Vista della sezione verso valle e ubicazione della stessa			

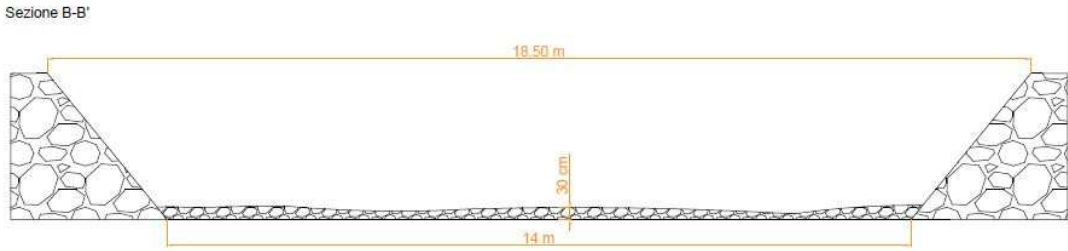
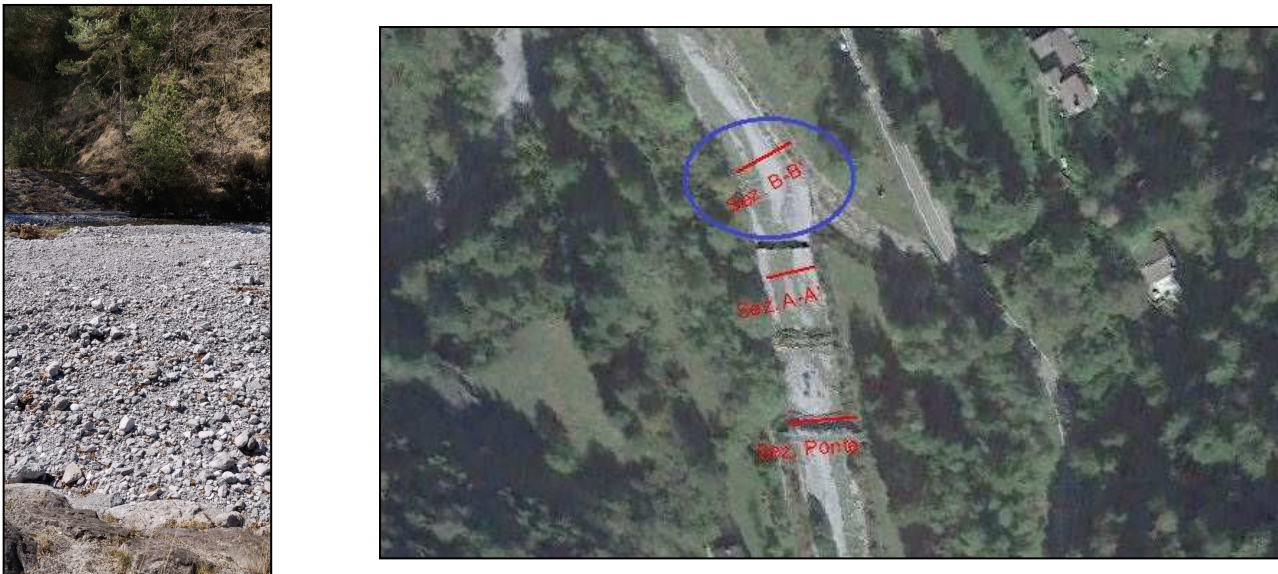
SCHEDA DI CARATTERIZZAZIONE _ SEZIONE A-A'			
CORSO D'ACQUA	Torrente Cassiglio	DATA RILIEVO	26/03/2019
QUOTA SEZIONE	638 m s.l.m.	RIF. CARTOGRAFICO_ CTR C4A2	
COORDINATE GEOGRAFICHE (UTM Zone 32N)	NORD	5089890.93	
	EST	547424.91	
DESCRIZIONE SEZIONE	Appena a monte dell'ultima briglia		
DESCRIZIONE MORFOLOGICA DELLA SEZIONE			
SEZIONE			
	<p>Sezione A-A'</p>		
SPONDA DX A MONTE	Argine artificiale, massi cementati		
SPONDA SX A MONTE	Argine artificiale, massi cementati		
SPONDA DX A VALLE	Argine artificiale, massi cementati		
SPONDA SX A VALLE	Argine artificiale, massi cementati		
DESCRIZIONE FONDO ALVEO A MONTE	Fondo regolare con presenza di ciottoli e ghiaie di varie dimensioni		
DESCRIZIONE FONDO ALVEO A VALLE	Fondo regolare con presenza di ciottoli e ghiaie di varie dimensioni		
NOTE	Spessore massimo del deposito misurato 40 cm		
FOTOGRAFIE			
			
Vista alveo dalla sponda destra e ubicazione della sezione			

COMMITTENTE: "italgen spa" – Via Kennedy, 1 - 24020 – Villa di Serio (BG)

IMPIANTO IDROELETTRICO DI OLMO AL BREMBO – DERIVAZIONE STABINA

STUDIO GEOLOGICO DI SUPPORTO ALLA STESURA DEL PROGETTO DI GESTIONE DELL'INVASO DI CASSIGLIO

AI SENSI DELLA D.G.R. XI/5736 DEL 24 OTTOBRE 2016

SCHEDA DI CARATTERIZZAZIONE _ SEZIONE B-B'			
CORSO D'ACQUA	Torrente Cassiglio	DATA RILIEVO	26/03/2019
QUOTA SEZIONE	635 m s.l.m.	RIF. CARTOGRAFICO_ CTR C4A2	
COORDINATE GEOGRAFICHE (UTM Zone 32N)	NORD	5089946.46	
	EST	547406.97	
DESCRIZIONE SEZIONE	Sezione a monte dell'immissione del Torrente Gazonera		
DESCRIZIONE MORFOLOGICA DELLA SEZIONE			
SEZIONE			
SPONDA DX A MONTE	Argine artificiale, massi cementati		
SPONDA SX A MONTE	Argine artificiale, massi cementati		
SPONDA DX A VALLE	Argine artificiale, massi cementati		
SPONDA SX A VALLE	Argine artificiale, massi cementati		
DESCRIZIONE FONDO ALVEO A MONTE	Fondo regolare con presenza di ciottoli e ghiaie di varie dimensioni		
DESCRIZIONE FONDO ALVEO A VALLE	Fondo regolare con presenza di ciottoli e ghiaie di varie dimensioni		
NOTE	Spessore massimo del deposito misurato 30 cm		
FOTOGRAFIE			
			
Vista alveo dalla sponda destra e ubicazione della sezione			

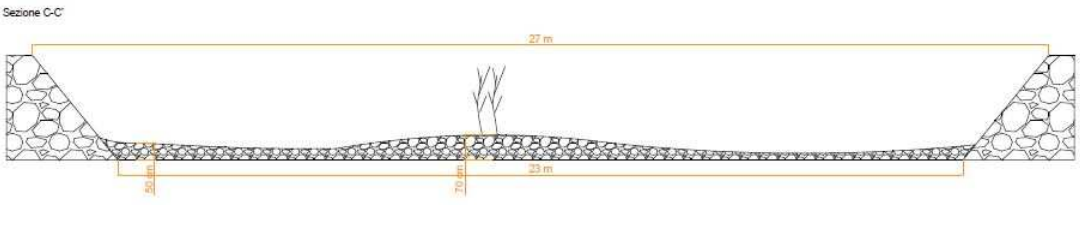

COMMITTENTE: "italgen spa" – Via Kennedy, 1 - 24020 – Villa di Serio (BG)

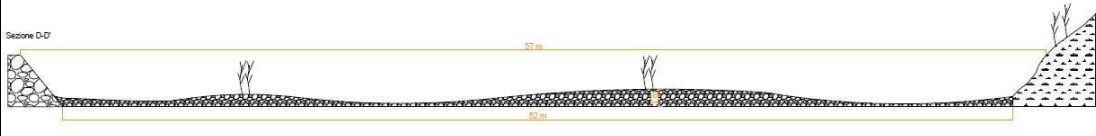

IMPIANTO IDROELETTRICO DI OLMO AL BREMBO – DERIVAZIONE STABINA



STUDIO GEOLOGICO DI SUPPORTO ALLA STESURA DEL PROGETTO DI GESTIONE DELL'INVASO DI CASSIGLIO

AI SENSI DELLA D.G.R. XI/5736 DEL 24 OTTOBRE 2016

SCHEDA DI CARATTERIZZAZIONE _ SEZIONE C-C'

CORSO D'ACQUA	Torrente Cassiglio	DATA RILIEVO	26/03/2019
QUOTA SEZIONE	630 m s.l.m.	RIF. CARTOGRAFICO_ CTR C4A2	
COORDINATE GEOGRAFICHE (UTM Zone 32N)	NORD	5090015.54	
	EST	547345.22	
DESCRIZIONE SEZIONE	Sezione a valle dell'immissione del Torrente Gazonera		
DESCRIZIONE MORFOLOGICA DELLA SEZIONE			
SEZIONE			
SPONDA DX A MONTE	Argine artificiale, massi cementati		
SPONDA SX A MONTE	Argine artificiale, massi cementati		
SPONDA DX A VALLE	Argine artificiale, massi cementati		
SPONDA SX A VALLE	Argine artificiale, massi cementati		
DESCRIZIONE FONDO ALVEO A MONTE	Fondo regolare con presenza di ciottoli e ghiaie di varie dimensioni		
DESCRIZIONE FONDO ALVEO A VALLE	Fondo regolare con presenza di ciottoli e ghiaie di varie dimensioni		
NOTE	Al centro è presente una barra parzialmente vegetata		
FOTOGRAFIE			
			
Vista dell'alveo dalla sponda destra e ubicazione sezione			

SCHEDA DI CARATTERIZZAZIONE _ SEZIONE D-D'			
CORSO D'ACQUA	Torrente Cassiglio	DATA RILIEVO	26/03/2019
QUOTA SEZIONE	627 m s.l.m.	RIF. CARTOGRAFICO_ CTR C4A2	
COORDINATE GEOGRAFICHE (UTM Zone 32N)	NORD	5090165.26	
	EST	547322.22	
DESCRIZIONE SEZIONE	Sezione al termine dell'argine cementato		
DESCRIZIONE MORFOLOGICA DELLA SEZIONE			
SEZIONE			
SPONDA DX A MONTE	Scarpata naturale, vegetata		
SPONDA SX A MONTE	Argine artificiale, massi cementati		
SPONDA DX A VALLE	Scarpata naturale, vegetata		
SPONDA SX A VALLE	Scarpata artificiale, strada		
DESCRIZIONE FONDO ALVEO A MONTE	Fondo regolare con presenza di ciottoli e ghiaie di varie dimensioni		
DESCRIZIONE FONDO ALVEO A VALLE	Fondo regolare con presenza di ciottoli e ghiaie di varie dimensioni		
NOTE	Spessore massimo dei depositi misurato 1m		
FOTOGRAFIE			
			
Vista dell'alveo dalla sponda destra e ubicazione sezione			

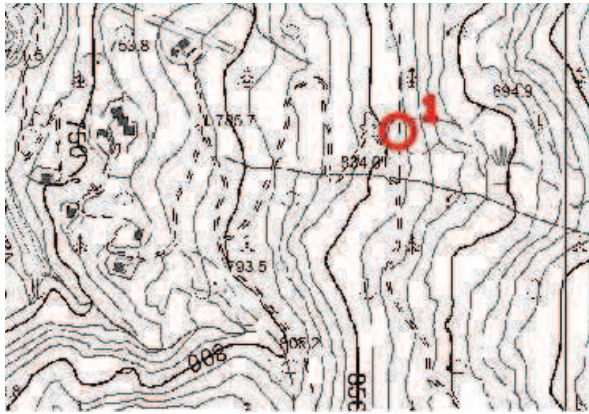
SCHEDA DI CARATTERIZZAZIONE _ SEZIONE E-E'			
CORSO D'ACQUA	Torrente Cassiglio	DATA RILIEVO	26/03/2019
QUOTA SEZIONE	625 m s.l.m.	RIF. CARTOGRAFICO_ CTR C4A2	
COORDINATE GEOGRAFICHE (UTM Zone 32N)	NORD	5090218.84	
	EST	547311.43	
DESCRIZIONE SEZIONE	Sezione a ridosso del lago di Cassiglio		
DESCRIZIONE MORFOLOGICA DELLA SEZIONE			
SEZIONE			
SPONDA DX A MONTE	Scarpata naturale, vegetata		
SPONDA SX A MONTE	Scarpata artificiale, strada		
SPONDA DX A VALLE	Scarpata naturale, vegetata		
SPONDA SX A VALLE	Scarpata artificiale, strada		
DESCRIZIONE FONDO ALVEO A MONTE	Fondo regolare con presenza di ciottoli e ghiaie di varie dimensioni		
DESCRIZIONE FONDO ALVEO A VALLE	Fondo regolare con presenza di ciottoli e ghiaie di varie dimensioni		
NOTE	Spessore massimo dei depositi misurato 1,50 m		
FOTOGRAFIE			
			
Vista dell'alveo al suo interno e ubicazione sezione			

ALLEGATO B:
Schede di analisi geomeccanica affioramenti rocciosi

COMMITTENTE: "italgen spa" – Via Kennedy, 1 - 24020 – Villa di Serio (BG)

IMPIANTO IDROELETTRICO DI OLMO AL BREMBO – DERIVAZIONE STABINA
STUDIO GEOLOGICO DI SUPPORTO ALLA STESURA DEL PROGETTO DI GESTIONE DELL'INVASO DI CASSIGLIO
AI SENSI DELLA D.G.R. XI/5736 DEL 24 OTTOBRE 2016

N



UBICAZIONE AFFIORAMENTO -SCALA 1:5000



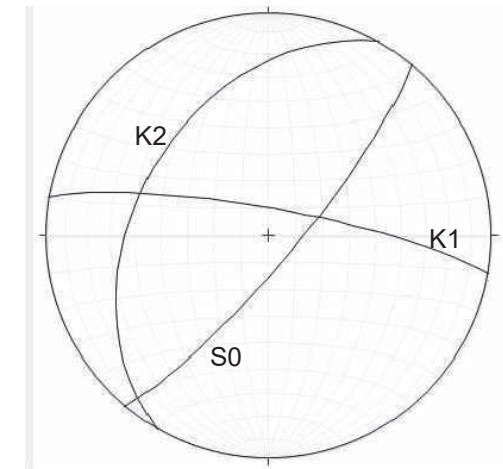
UBICAZIONE AFFIORAMENTO - ORTOFOTO



SCALA GRAFICA

		SISTEMA S0	SISTEMA K1	SISTEMA K2	SISTEMA K3
PARAMETRI DISCONTINUITA'	GIACITURA MEDIA	130N/80	10N/80	300N/40	
	SPAZIATURA (m)	0,2	0.2-0.4	0,15	
	APERTURA (mm)	0.1-0.5	0.1-0.5	0.1-0.5	
	PERSISTENZA (m)	1-3	0.5-1	1-3	
	ALTERAZIONE	LEGGERMENTE ALTERATA	LEGGERMENTE ALTERATA	LEGGERMENTE ALTERATA	
	RIEMPIMENTO	ND	ND	ND	
	RUGOSITA' (jrc)	8-10	8-10	8-10	
	r (Mpa)	20	20	20	
	R (Mpa)	28	28	28	
PRESENZA ACQUA	ASSENTE	ASSENTE	ASSENTE		

PARAMETRI AMMASSO ROCCIOSO	JV	25		
	RQD			
		VALORE OTTENUTO	ATTRITO (gradi)	COESIONE(Kpa)
	RMR	55	32	276
	GSI	50-55		
	PERMEABILITA' (m/s)	6 E-4		



PROIEZIONE STEREOGRAFICA

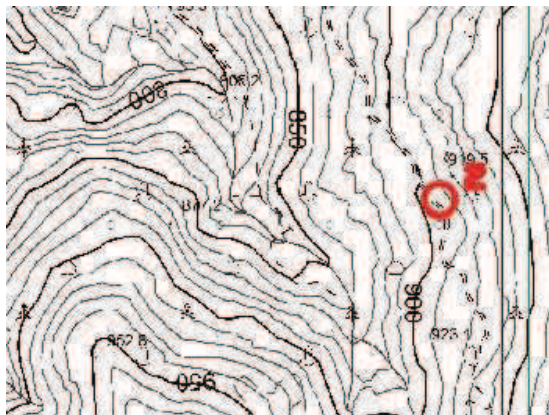
AFFIORAMENTO 1
LITOLOGIA: DOLOMIA

Via Giuseppe Palini, 5
25055 Pisogne (BS)
cell. 328.059.00.24
geologo.fenaroli@gmail.com



GEOLOGO
FABIO
FENAROLI

N



UBICAZIONE AFFIORAMENTO -SCALA 1:5000



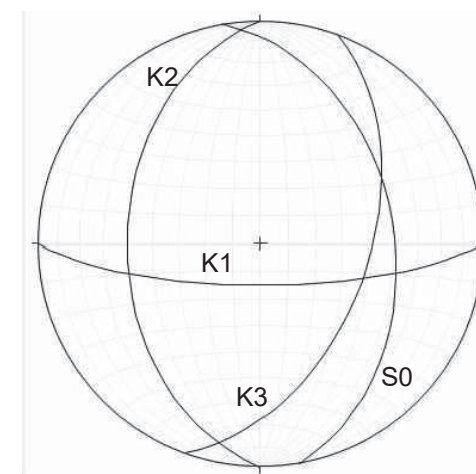
UBICAZIONE AFFIORAMENTO - ORTOFOTO



SCALA GRAFICA

		SISTEMA S0	SISTEMA K1	SISTEMA K2	SISTEMA K3
PARAMETRI DISCONTINUITA'	GIACITURA MEDIA	80N/40	180N/75	270N/40	110N/50
	SPAZIATURA (m)	0,05	0.2-0.4	0,15	0,15
	APERTURA (mm)	0.1-0.5	0.1-0.5	0.1-0.5	0.1-0.5
	PERSISTENZA (m)	1-3	0.5-1	1-3	1-3
	ALTERAZIONE	LEGGERMENTE ALTERATA	LEGGERMENTE ALTERATA	LEGGERMENTE ALTERATA	LEGGERMENTE ALTERATA
	RIEMPIMENTO	ND	ND	ND	ND
	RUGOSITA' (jrc)	8-10	8-10	8-10	8-10
	r (Mpa)	40	40	40	40
	R (Mpa)	65	65	65	65
	PRESENZA ACQUA	ASSENTE	ASSENTE	ASSENTE	ASSENTE

PARAMETRI AMMASSO ROCCIOSO	JV	40		
	RQD			
		VALORE OTTENUTO	ATTRITO (gradi)	COESIONE(Kpa)
	RMR	50	30	258
	GSI	40-45		
	PERMEABILITA' (m/s)	8 E-4		



PROIEZIONE STEREOGRAFICA

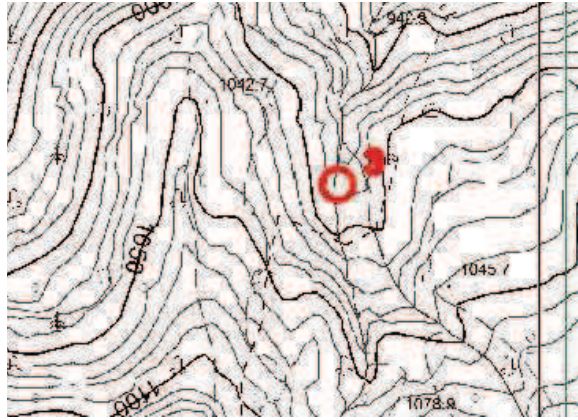
AFFIORAMENTO 2
LITOLOGIA: DOLOMIA

Via Giuseppe Palini, 5
25055 Pisogne (BS)
cell. 328.059.00.24
geologo.fenaroli@gmail.com



GEOLOGO
FABIO
FENAROLI

N



UBICAZIONE AFFIORAMENTO -SCALA 1:5000



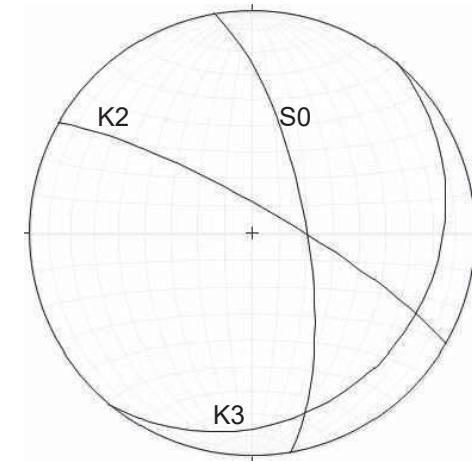
UBICAZIONE AFFIORAMENTO - ORTOFOTO



SCALA GRAFICA

		SISTEMA S0	SISTEMA K1	SISTEMA K2	SISTEMA K3
PARAMETRI DISCONTINUITA'	GIACITURA MEDIA	80N/70		30N80	130N/20
	SPAZIATURA (m)	0,4		0,8	0,2
	APERTURA (mm)	0.5-1		0.1-0.5	0.1-0.5
	PERSISTENZA (m)	1-3		1-3	1-3
	ALTERAZIONE	LEGGERMENTE ALTERATA		LEGGERMENTE ALTERATA	LEGGERMENTE ALTERATA
	RIEMPIMENTO	ND		ND	ND
	RUGOSITA' (jrc)	12-14		12-14	12-14
	r (Mpa)	90		90	90
	R (Mpa)	140		140	140
	PRESENZA ACQUA	ASSENTE		ASSENTE	ASSENTE

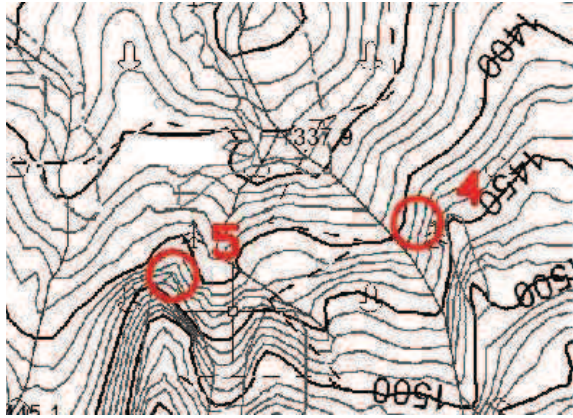
PARAMETRI AMMASSO ROCCIOSO	JV	10		
	RQD			
		VALORE OTTENUTO	ATTRITO (gradi)	COESIONE(Kpa)
	RMR	73	41	367
	GSI	70-75		
	PERMEABILITA' (m/s)	1 E-5		



PROIEZIONE STEREOGRAFICA



N



UBICAZIONE AFFIORAMENTO -SCALA 1:5000



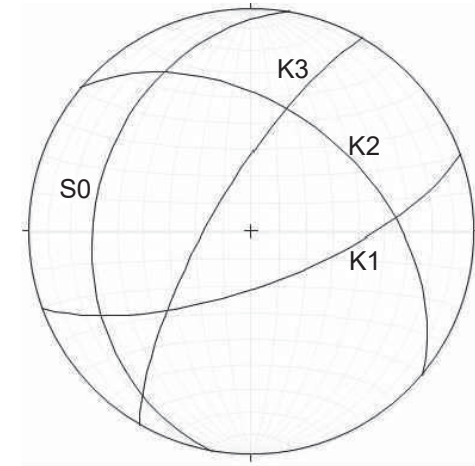
UBICAZIONE AFFIORAMENTO - ORTOFOTO



SCALA GRAFICA

		SISTEMA S0	SISTEMA K1	SISTEMA K2	SISTEMA K3
PARAMETRI DISCONTINUITA'	GIACITURA MEDIA	280N/30	160N70	40N45	300N/75
	SPAZIATURA (m)	0,1	0,2	0,2	0,2
	APERTURA (mm)	0.5-1	1-5	0.1-0.5	0.1-0.5
	PERSISTENZA (m)	1-3	1-3	1-3	1-3
	ALTERAZIONE	LEGGERMENTE ALTERATA	LEGGERMENTE ALTERATA	LEGGERMENTE ALTERATA	LEGGERMENTE ALTERATA
	RIEMPIMENTO	ND	ND	ND	ND
	RUGOSITA' (jrc)	12-14	12-14	12-14	8-10
	r (Mpa)	70	70	70	70
	R (Mpa)	90	90	90	90
	PRESENZA ACQUA	ASSENTE	ASSENTE	ASSENTE	ASSENTE

PARAMETRI AMMASSO ROCCIOSO	JV	21		
	RQD			
		VALORE OTTENUTO	ATTRITO (gradi)	COESIONE(Kpa)
	RMR	63	36	315
	GSI	55-60		
	PERMEABILITA' (m/s)	3 E-4		



PROIEZIONE STEREOGRAFICA

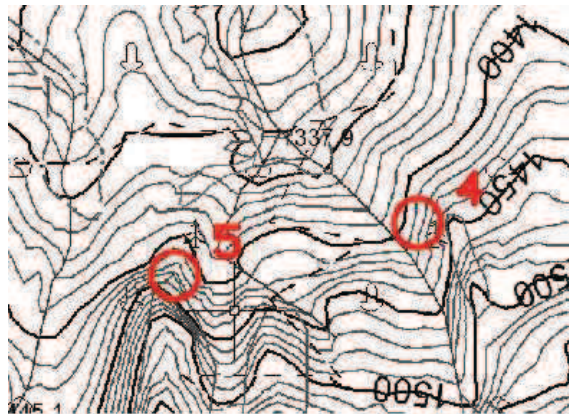
AFFIORAMENTO 4
LITOLOGIA: DOLOMIA

Via Giuseppe Palini, 5
25055 Pisogne (BS)
cell. 328.059.00.24
geologo.fenaroli@gmail.com



GEOLOGO
FABIO
FENAROLI

N



UBICAZIONE AFFIORAMENTO -SCALA 1:5000



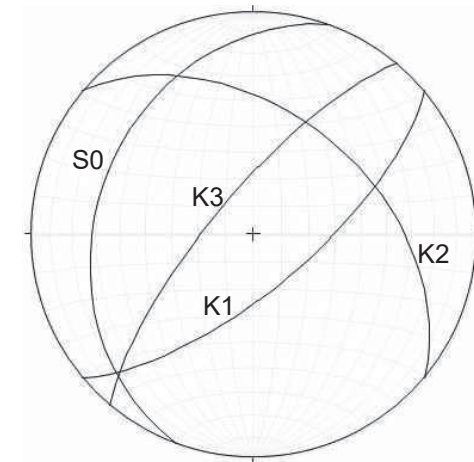
UBICAZIONE AFFIORAMENTO - ORTOFOTO



SCALA GRAFICA

		SISTEMA S0	SISTEMA K1	SISTEMA K2	SISTEMA K3
PARAMETRI DISCONTINUITA'	GIACITURA MEDIA	290N/30	140N70	40N45	310N/75
	SPAZIATURA (m)	0,1	0,2	0,3	0,2
	APERTURA (mm)	0.5-1	1-5	0.1-0.5	0.1-0.5
	PERSISTENZA (m)	1-3	1-3	1-3	1-3
	ALTERAZIONE	LEGGERMENTE ALTERATA	LEGGERMENTE ALTERATA	LEGGERMENTE ALTERATA	LEGGERMENTE ALTERATA
	RIEMPIMENTO	ND	ND	ND	ND
	RUGOSITA' (jrc)	12-14	12-14	12-14	8-10
	r (Mpa)	70	70	70	70
	R (Mpa)	90	90	90	90
	PRESENZA ACQUA	ASSENTE	ASSENTE	ASSENTE	ASSENTE

PARAMETRI AMMASSO ROCCIOSO	JV	20		
	RQD			
		VALORE OTTENUTO	ATTRITO (gradi)	COESIONE(Kpa)
	RMR	62	36	314
	GSI	55-60		
	PERMEABILITA' (m/s)	2 E-4		



PROIEZIONE STEREOGRAFICA

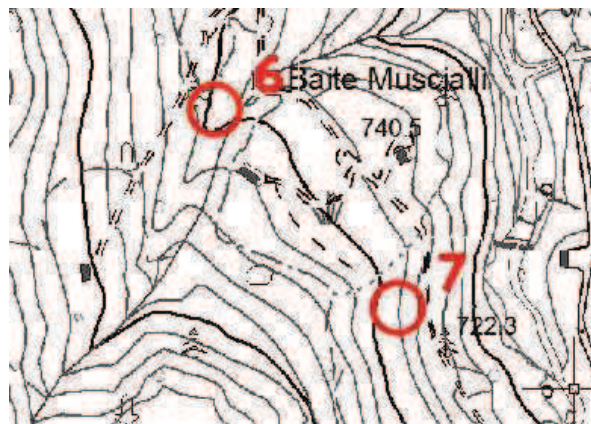
AFFIORAMENTO 5
LITOLOGIA: DOLOMIA

Via Giuseppe Palini, 5
25055 Pisogne (BS)
cell. 328.059.00.24
geologo.fenaroli@gmail.com



GEOLOGO
FABIO
FENAROLI

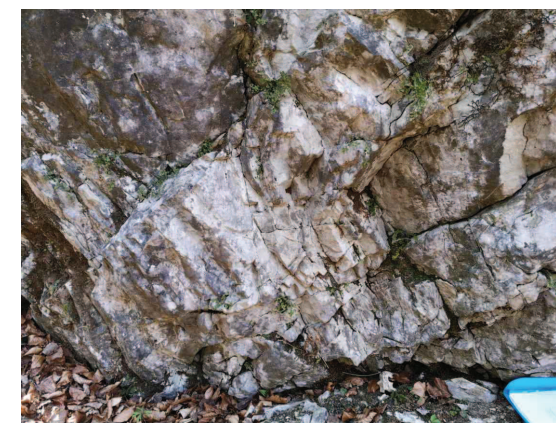
N



UBICAZIONE AFFIORAMENTO -SCALA 1:5000



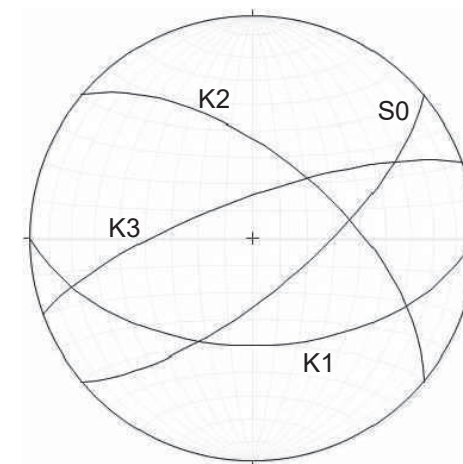
UBICAZIONE AFFIORAMENTO - ORTOFOTO



SCALA GRAFICA

		SISTEMA S0	SISTEMA K1	SISTEMA K2	SISTEMA K3
PARAMETRI DISCONTINUITA'	GIACITURA MEDIA	140N/70	180N50	40N60	340N/75
	SPAZIATURA (m)	0,2	0,2	0,3	0,2
	APERTURA (mm)	0.5-1	05-1	0.1-0.5	0.1-0.5
	PERSISTENZA (m)	1-3	1-3	1-3	1-3
	ALTERAZIONE	LEGGERMENTE ALTERATA	LEGGERMENTE ALTERATA	LEGGERMENTE ALTERATA	LEGGERMENTE ALTERATA
	RIEMPIMENTO	ND	ND	ND	ND
	RUGOSITA' (jrc)	8-10	8-10	12-14	8-10
	r (Mpa)	60	60	60	60
	R (Mpa)	70	70	70	70
	PRESENZA ACQUA	ASSENTE	ASSENTE	ASSENTE	ASSENTE

PARAMETRI AMMASSO ROCCIOSO	JV	23		
	RQD			
		VALORE OTTENUTO	ATTRITO (gradi)	COESIONE(Kpa)
	RMR	58	34	290
	GSI	55-60		
	PERMEABILITA' (m/s)	9 E-5		



PROIEZIONE STEREOGRAFICA

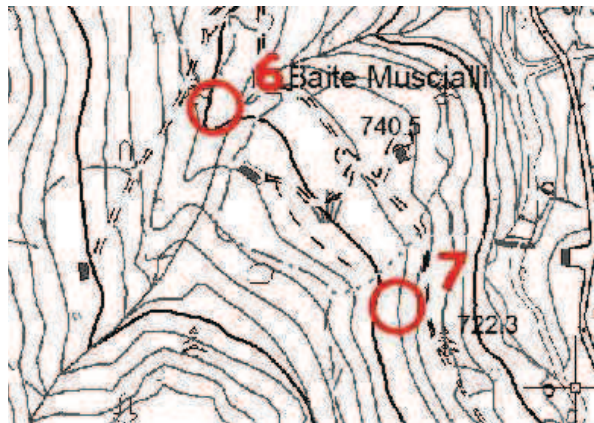
AFFIORAMENTO 6
LITOLOGIA: DOLOMIA

Via Giuseppe Palini, 5
25055 Pisogne (BS)
cell. 328.059.00.24
geologo.fenaroli@gmail.com



GEOLOGO
FABIO
FENAROLI

N



UBICAZIONE AFFIORAMENTO -SCALA 1:10000



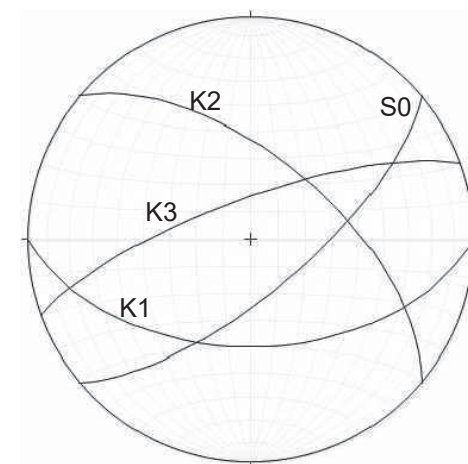
UBICAZIONE AFFIORAMENTO - ORTOFOTO



SCALA GRAFICA

		SISTEMA S0	SISTEMA K1	SISTEMA K2	SISTEMA K3
PARAMETRI DISCONTINUITA'	GIACITURA MEDIA	140N/70	180N50	40N60	340N/75
	SPAZIATURA (m)	0,15	0,15	0,3	0,2
	APERTURA (mm)	0.5-1	05-1	0.1-0.5	0.1-0.5
	PERSISTENZA (m)	1-3	1-3	1-3	1-3
	ALTERAZIONE	LEGGERMENTE ALTERATA	LEGGERMENTE ALTERATA	LEGGERMENTE ALTERATA	LEGGERMENTE ALTERATA
	RIEMPIMENTO	ND	ND	ND	ND
	RUGOSITA' (jrc)	8-10	8-10	8-10	8-10
	r (Mpa)	40	40	40	40
	R (Mpa)	60	60	60	60
	PRESENZA ACQUA	ASSENTE	ASSENTE	ASSENTE	ASSENTE

PARAMETRI AMMASSO ROCCIOSO	JV	28		
	RQD			
		VALORE OTTENUTO	ATTRITO (gradi)	COESIONE(Kpa)
	RMR	57	33	289
	GSI	50-55		
	PERMEABILITA' (m/s)	1 E-4		



PROIEZIONE STEREOGRAFICA

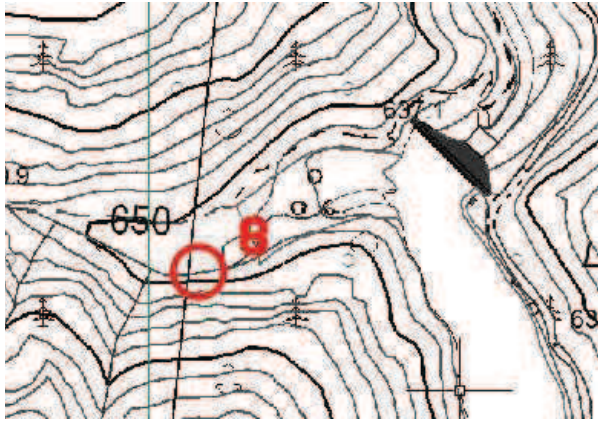
AFFIORAMENTO 7
LITOLOGIA: DOLOMIA

Via Giuseppe Palini, 5
25055 Pisogne (BS)
cell. 328.059.00.24
geologo.fenaroli@gmail.com



GEOLOGO
FABIO
FENAROLI

N



UBICAZIONE AFFIORAMENTO -SCALA 1:5000



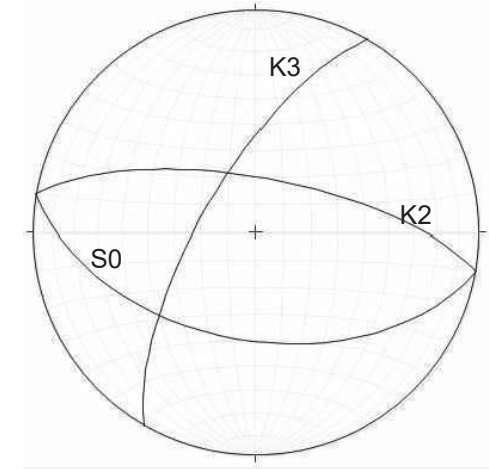
UBICAZIONE AFFIORAMENTO - ORTOFOTO



SCALA GRAFICA

		SISTEMA S0	SISTEMA K1	SISTEMA K2	SISTEMA K3
PARAMETRI DISCONTINUITA'	GIACITURA MEDIA	190N/50		10N70	300N/70
	SPAZIATURA (m)	0,15		0,1	0,2
	APERTURA (mm)	0.5-1		0.1-0.5	0.1-0.5
	PERSISTENZA (m)	1-3		1-3	1-3
	ALTERAZIONE	LEGGERMENTE ALTERATA		LEGGERMENTE ALTERATA	LEGGERMENTE ALTERATA
	RIEMPIMENTO	ND		ND	ND
	RUGOSITA' (jrc)	8-10		8-10	8-10
	r (Mpa)	80		80	80
	R (Mpa)	100		100	100
	PRESENZA ACQUA	ASSENTE		ASSENTE	ASSENTE

PARAMETRI AMMASSO ROCCIOSO	JV	20		
	RQD			
		VALORE OTTENUTO	ATTRITO (gradi)	COESIONE(Kpa)
	RMR	63	36	317
	GSI	55-60		
PERMEABILITA' (m/s)	3 E-5			



PROIEZIONE STEREOGRAFICA

AFFIORAMENTO 8
LITOLOGIA: DOLOMIA

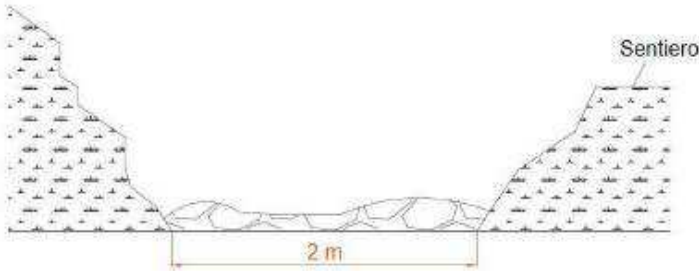
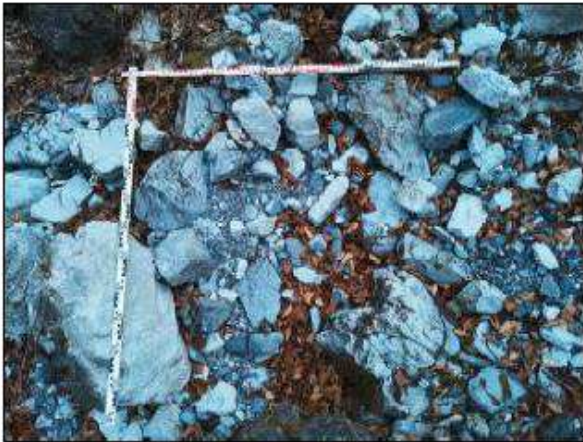
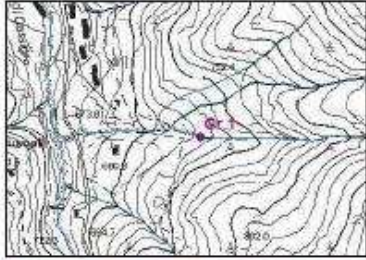

Via Giuseppe Palini, 5
25055 Pisogne (BS)
cell. 328.059.00.24
geologo.fenaroli@gmail.com

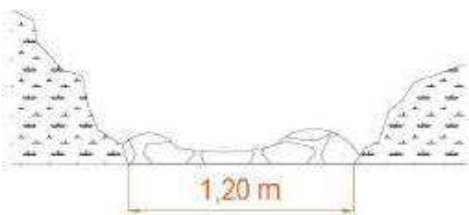


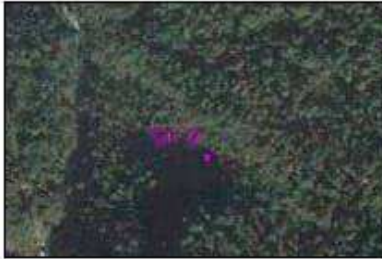


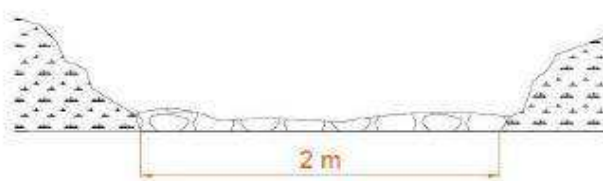

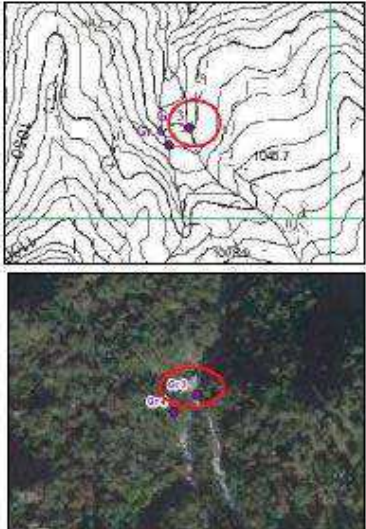
GEOLOGO
FABIO
FENAROLI

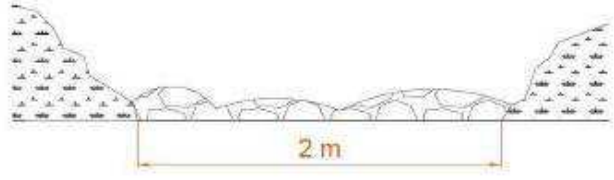

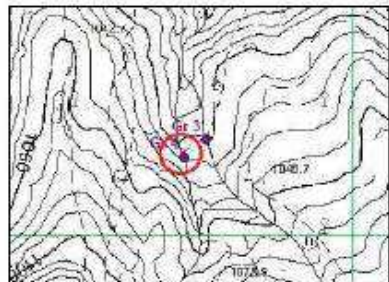

ALLEGATO C:

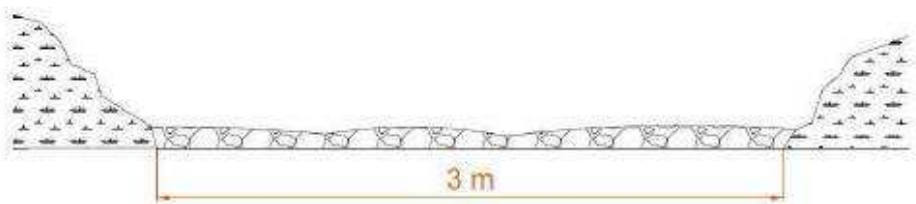



Schede di valutazione speditiva della granulometria del materiale in alveo

SCHEDA DI CARATTERIZZAZIONE GRANULOMETRICA – GR_1			
CORSO D'ACQUA	Canale di Foppa Grande	DATA RILIEVO	30/03/2019
QUOTA SEZIONE	725 m s.l.m.	RIF. CARTOGRAFICO_ CTR C4A2	
COORDINATE GEOGRAFICHE (UTM Zone 32N)	NORD	5089441.90	
	EST	547726.72	
DESCRIZIONE SEZIONE	Alveo stretto con fondo irregolare, argini naturali e vegetati.		
DESCRIZIONE MORFOLOGICA DELLA SEZIONE			
SEZIONE	<p style="text-align: center;">Sezione GR_1</p> 		
SABBIA d < 2 mm	-		
GHIAIA FINE 2 < d < 20 mm	10 %		
GHIAIA 20 < d < 60 mm	20 %		
CIOTTOLI 60 < d < 200 mm	20 %		
BLOCCHI 200 < d < 600 mm	50 %		
MASSI d > 600 mm	-		
NOTE			
FOTOGRAFIE			
			
			
Sezione granulometrica e ubicazione della stessa nella CTR (scala 1:5000) e ortofoto.			

SCHEDA DI CARATTERIZZAZIONE GRANULOMETRICA – GR_2			
CORSO D'ACQUA	Vallone o Fosso di Fogliaro	DATA RILIEVO	30/03/2019
QUOTA SEZIONE	980 m s.l.m.	RIF. CARTOGRAFICO_ CTR C4A2	
COORDINATE GEOGRAFICHE (UTM Zone 32N)	NORD	5088468.68	
	EST	548130.94	
DESCRIZIONE SEZIONE	Alveo stretto con fondo irregolare, argini naturali e vegetati.		
DESCRIZIONE MORFOLOGICA DELLA SEZIONE			
SEZIONE	<p>Sezione GR_2</p> 		
SABBIA d < 2 mm	-		
GHIAIA FINE 2 < d < 20 mm	10 %		
GHIAIA 20 < d < 60 mm	20 %		
CIOTTOLI 60 < d < 200 mm	20 %		
BLOCCHI 200 < d < 600 mm	50 %		
MASSI d > 600 mm	-		
NOTE			
FOTOGRAFIE			
		 	
Sezione granulometrica e ubicazione della stessa nella CTR (scala 1:5000) e ortofoto.			

SCHEDA DI CARATTERIZZAZIONE GRANULOMETRICA – GR_3														
CORSO D'ACQUA	Canale di Chignolo	DATA RILIEVO	30/03/2019											
QUOTA SEZIONE	1000 m s.l.m.	RIF. CARTOGRAFICO_ CTR C4A2												
COORDINATE GEOGRAFICHE (UTM Zone 32N)	NORD	5088312.62												
	EST	547908.68												
DESCRIZIONE SEZIONE	Alveo stretto con fondo irregolare, presenza anche di grandi massi, argini naturali e vegetati.													
DESCRIZIONE MORFOLOGICA DELLA SEZIONE														
SEZIONE	Sezione GR_3 													
	<table border="1"> <tr> <td>SABBIA d < 2 mm</td> <td>-</td> </tr> <tr> <td>GHIAIA FINE 2 < d < 20 mm</td> <td>10 %</td> </tr> <tr> <td>GHIAIA 20 < d < 60 mm</td> <td>30 %</td> </tr> <tr> <td>CIOTTOLI 60 < d < 200 mm</td> <td>40 %</td> </tr> <tr> <td>BLOCCHI 200 < d < 600 mm</td> <td>20 %</td> </tr> <tr> <td>MASSI d > 600 mm</td> <td>-</td> </tr> </table>			SABBIA d < 2 mm	-	GHIAIA FINE 2 < d < 20 mm	10 %	GHIAIA 20 < d < 60 mm	30 %	CIOTTOLI 60 < d < 200 mm	40 %	BLOCCHI 200 < d < 600 mm	20 %	MASSI d > 600 mm
SABBIA d < 2 mm	-													
GHIAIA FINE 2 < d < 20 mm	10 %													
GHIAIA 20 < d < 60 mm	30 %													
CIOTTOLI 60 < d < 200 mm	40 %													
BLOCCHI 200 < d < 600 mm	20 %													
MASSI d > 600 mm	-													
NOTE														
FOTOGRAFIE														
														
Sezione granulometrica e ubicazione della stessa nella CTR (scala 1:5000) e ortofoto.														

SCHEDA DI CARATTERIZZAZIONE GRANULOMETRICA – GR_4			
CORSO D'ACQUA	Canale di Chignolo	DATA RILIEVO	30/03/2019
QUOTA SEZIONE	1045 m s.l.m.	RIF. CARTOGRAFICO_ CTR C4A2	
COORDINATE GEOGRAFICHE (UTM Zone 32N)	NORD	5088291.42	
	EST	547882.18	
DESCRIZIONE SEZIONE	Alveo stretto con fondo irregolare, con presenza di grandi massi, argini naturali e vegetati.		
DESCRIZIONE MORFOLOGICA DELLA SEZIONE			
SEZIONE	Sezione GR_4		
			
SABBIA d < 2 mm	10 %		
GHIAIA FINE 2 < d < 20 mm	30 %		
GHIAIA 20 < d < 60 mm	40 %		
CIOTTOLI 60 < d < 200 mm	20 %		
BLOCCHI 200 < d < 600 mm	-		
MASSI d > 600 mm	-		
NOTE			
FOTOGRAFIE			
  			
Sezione granulometrica e ubicazione della stessa nella CTR (scala 1:5000) e ortofoto.			

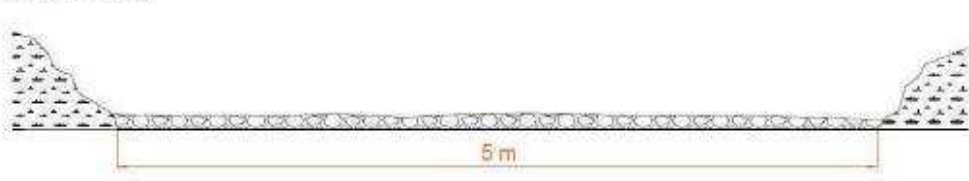

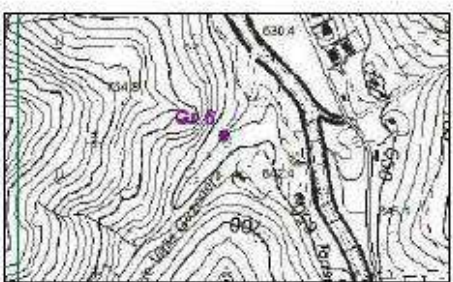

SCHEDA DI CARATTERIZZAZIONE GRANULOMETRICA – GR_5			
CORSO D'ACQUA	Valle di Cassiglio	DATA RILIEVO	30/03/2019
QUOTA SEZIONE	710 m s.l.m.	RIF. CARTOGRAFICO_ CTR C4A2	
COORDINATE GEOGRAFICHE (UTM Zone 32N)	NORD	5089173.96	
	EST	547561.38	
DESCRIZIONE SEZIONE	Alveo con fondo regolare, argini naturali e vegetati.		
DESCRIZIONE MORFOLOGICA DELLA SEZIONE			
SEZIONE	<p style="text-align: center;">Sezione GR_5</p> 		
SABBIA $d < 2 \text{ mm}$	10 %		
GHIAIA FINE $2 < d < 20 \text{ mm}$	30 %		
GHIAIA $20 < d < 60 \text{ mm}$	50 %		
CIOTTOLI $60 < d < 200 \text{ mm}$	10 %		
BLOCCHI $200 < d < 600 \text{ mm}$	-		
MASSI $d > 600 \text{ mm}$	-		
NOTE			
FOTOGRAFIE			
  			
Sezione granulometrica e ubicazione della stessa nella CTR (scala 1:5000) e ortofoto.			

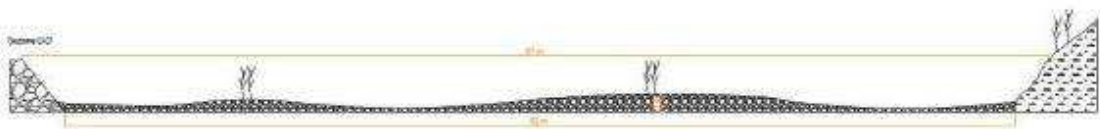

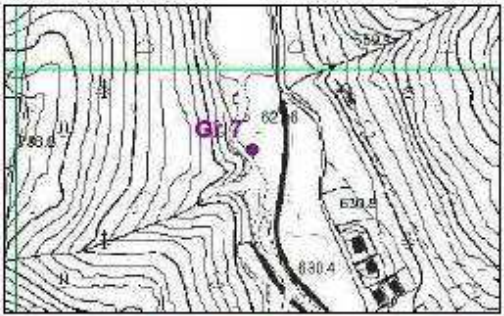

COMMITTENTE: "italgen spa" – Via Kennedy, 1 - 24020 – Villa di Serio (BG)

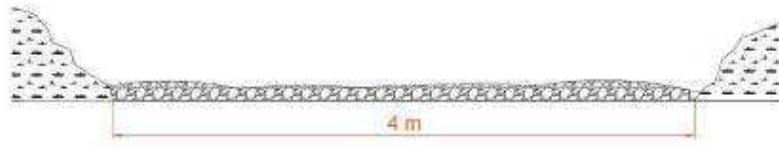
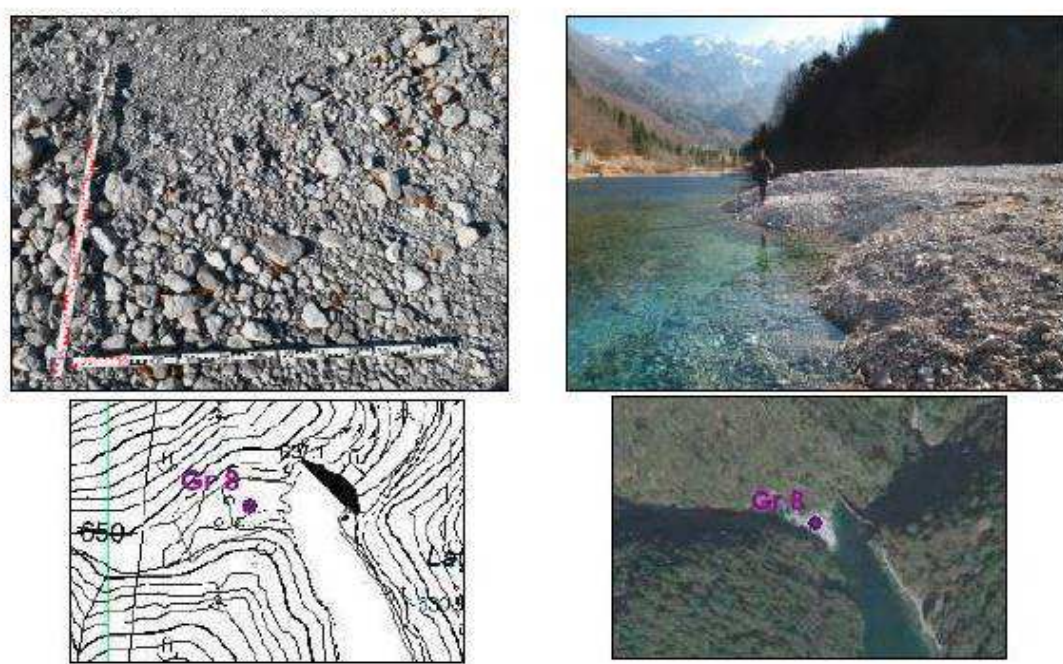
IMPIANTO IDROELETTRICO DI OLMO AL BREMBO – DERIVAZIONE STABINA

STUDIO GEOLOGICO DI SUPPORTO ALLA STESURA DEL PROGETTO DI GESTIONE DELL'INVASO DI CASSIGLIO

AI SENSI DELLA D.G.R. X/5736 DEL 24 OTTOBRE 2016

SCHEDA DI CARATTERIZZAZIONE GRANULOMETRICA – GR_6			
CORSO D'ACQUA	Torrente Valle Gazonera	DATA RILIEVO	30/03/2019
QUOTA SEZIONE	640 m s.l.m.	RIF. CARTOGRAFICO_ CTR	C4A2
COORDINATE GEOGRAFICHE (UTM Zone 32N)	NORD	5089881.76	
	EST	547316.64	
DESCRIZIONE SEZIONE	Alveo ampio con fondo regolare, argini naturali e vegetati.		
DESCRIZIONE MORFOLOGICA DELLA SEZIONE			
SEZIONE	<p style="text-align: center;">Sezione GR_6</p> 		
SABBIA d < 2 mm	10 %		
GHIAIA FINE 2 < d < 20 mm	45 %		
GHIAIA 20 < d < 60 mm	35 %		
CIOTTOLI 60 < d < 200 mm	5 %		
BLOCCHI 200 < d < 600 mm	-		
MASSI d > 600 mm	-		
NOTE			
FOTOGRAFIE			
			
			
Sezione granulometrica e ubicazione della stessa nella CTR (scala 1:5000) e ortofoto.			

SCHEDA DI CARATTERIZZAZIONE GRANULOMETRICA – GR_7			
CORSO D'ACQUA	Valle di Cassiglio	DATA RILIEVO	30/03/2019
QUOTA SEZIONE	625 m s.l.m.	RIF. CARTOGRAFICO_ CTR	C4A2
COORDINATE GEOGRAFICHE (UTM Zone 32N)	NORD	5090121.65	
	EST	547315.35	
DESCRIZIONE SEZIONE	Alveo ampio con fondo regolare, argine destro naturale e vegetato, argine sinistro a blocchi cementati.		
DESCRIZIONE MORFOLOGICA DELLA SEZIONE			
SEZIONE			
SABBIA $d < 2$ mm	5 %		
GHIAIA FINE $2 < d < 20$ mm	60 %		
GHIAIA $20 < d < 60$ mm	30 %		
CIOTTOLI $60 < d < 200$ mm	5 %		
BLOCCHI $200 < d < 600$ mm	-		
MASSI $d > 600$ mm	-		
NOTE			
FOTOGRAFIE			
			
			
Sezione granulometrica e ubicazione della stessa nella CTR (scala 1:5000) e ortofoto.			

SCHEDA DI CARATTERIZZAZIONE GRANULOMETRICA – GR_8			
CORSO D'ACQUA	Canale dei Faggi	DATA RILIEVO	30/03/2019
QUOTA SEZIONE	635 m s.l.m.	RIF. CARTOGRAFICO_ CTR	C4A2
COORDINATE GEOGRAFICHE (UTM Zone 32N)	NORD	5090404.54	
	EST	547198.35	
DESCRIZIONE SEZIONE	Alveo ampio con fondo regolare, argini naturali e vegetati.		
DESCRIZIONE MORFOLOGICA DELLA SEZIONE			
SEZIONE	<p style="text-align: center;">Sezione GR_8</p> 		
SABBIA $d < 2 \text{ mm}$	10 %		
GHIAIA FINE $2 < d < 20 \text{ mm}$	30 %		
GHIAIA $20 < d < 60 \text{ mm}$	40 %		
CIOTTOLI $60 < d < 200 \text{ mm}$	20 %		
BLOCCHI $200 < d < 600 \text{ mm}$	-		
MASSI $d > 600 \text{ mm}$	-		
NOTE			
FOTOGRAFIE			
			
Sezione granulometrica e ubicazione della stessa nella CTR (scala 1:5000) e ortofoto.			

ALLEGATO D:

Report misure di rumore sismico ambientale con metodologia HVSR

Acquisizione di rumore sismico ambientale (metodo HVSR)

A completamento della campagna di indagini geofisiche sono state effettuate quattro misure di acquisizione di rumore sismico ambientale in punti di misura ritenuti significativi e posti in prossimità dell'indagine MASW e ReMi effettuata al fine di individuare la frequenza fondamentale dei terreni presenti nell'area. Il rumore ambientale è stato elaborato tramite la tecnica HVSR originariamente teorizzata da Nakamura. Una successiva elaborazione, di seguito dettagliata nel testo, ha permesso di definire lo spessore dei sedimenti al di sopra del bedrock sismico. Tali informazioni, di fondamentale importanza nelle fasi di pianificazione, permettono anche in fase di progettazione di definire importanti elementi nei confronti della vulnerabilità sismica. La conoscenza dettagliata dello spessore delle coperture, consente di definire con un maggior grado di affidabilità, un gradiente di velocità delle onde di taglio (V_s) fino al bedrock soprattutto in ambiti difficilmente indagabili con le tecniche geofisiche classiche e di individuare con un livello di precisione superiore la categoria di sottosuolo (in accordo con la classificazione attualmente vigente delle Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. LL.PP. 17 Gennaio 2018).

La conoscenza della frequenza fondamentale dei terreni consente inoltre di valutare l'occorrenza, in caso di terremoto, del fenomeno della doppia risonanza tra terreno e strutture, qualora la frequenza di risonanza delle strutture esistenti o in progetto sia la medesima di quella dei terreni.

Cenni Teorici

Nell'ipotesi di essere in presenza di una condizione geologica tale per cui si abbia un deposito sedimentario sovrapposto a un semispazio omogeneo e di essere in presenza di un contrasto di impedenza tra le due formazioni, è possibile ottenere una buona stima della frequenza fondamentale del deposito tramite l'utilizzo del metodo di Nakamura, noto anche come metodo H/V.

Il metodo di Nakamura parte dall'assunto che la componente verticale del moto non subisca modificazioni significative in frequenza e che non sia amplificata in modo significativo dallo stato superficiale, ad eccezione delle onde di Rayleigh; difatti, secondo la spiegazione oggi più accreditata (p.es., Tokimatsu), le curve Horizontal to Vertical Spectral Ratios (HVSR) del rumore ambientale sono controllate principalmente dalle onde superficiali. In particolare, la presenza di massimi pronunciati nell'andamento della funzione HVSR è legata all'annullamento della componente verticale delle onde di Rayleigh in corrispondenza della frequenza di risonanza delle onde S nei sedimenti soffici. In pratica, sarebbe l'ellitticità delle onde di Rayleigh a determinare la presenza di massimi nella funzione H/V.

Assumendo inoltre che l'effetto delle onde di Rayleigh sia simile tra la componente orizzontale (H) e la verticale (V), la deconvoluzione della componente verticale dall'orizzontale, che nel dominio delle frequenze corrisponde al rapporto spettrale H/V, risulterebbe essere una buona stima della risposta del sito rispetto alla frequenza di risonanza. Misurando quindi segnali sismici generati da sorgenti sismiche artificiali o da modeste vibrazioni naturali del terreno note come microtremiti o "rumore ambientale" (noise), è possibile stimare quali componenti del moto sono state amplificate durante il percorso, quali attenuate ed in quale rapporto.

La frequenza di risonanza di uno strato coincide pertanto con la frequenza per la quale assume il valore massimo il rapporto $R_{HV} = H_i/V_i$ tra gli spettri delle componenti orizzontale e verticale del moto del suolo nello stesso sito, con H/V definito dalla seguente relazione:

$$H/V(f) = \frac{\sqrt{|A_{NS}(f) \cdot A_{EW}(f)|}}{A_Z(f)}$$

Ovvero come combinazione tra le ampiezze spettrali delle componenti orizzontali $A_{NS}(f)$ e $A_{EW}(f)$ attraverso la media geometrica dei moduli.

Analogamente a quanto sopra riportato, numerosi studi sperimentali hanno dimostrato l'affidabilità dell'analisi H/V applicata alle misure di rumore sismico al fine di determinare le frequenze proprie degli edifici e delle strutture in genere. Si sottolinea che la determinazione della frequenza fondamentale del sottosuolo e delle frequenze di risonanza delle strutture risultano in stime affidabili delle caratteristiche dinamiche di tali sistemi esclusivamente in campo lineare.

Trattamento del segnale

L'acquisizione del rumore ambientale è stata effettuata attraverso sensore Gemini-2 di Pasi costituito da un unico contenitore con integrati un geofono 3D ad alte prestazioni e bassa frequenza di risonanza a 2Hz Hz reali, opportunamente accoppiati ed una scheda di acquisizione a 24 bit reali con porta USB per collegamento ad un pc esterno.

Sul punto di misura è stato acquisito il segnale del *noise*, campionato a 128 Hz per una durata di 35 minuti. Si è scelto di utilizzare tale durata di acquisizione al fine di massimizzare il rapporto segnale/rumore (dove per rumore di intendono segnali vicini di origine antropica).

Successivamente si è proceduto al trattamento dei segnali ritenuti affidabili attraverso l'utilizzo dei software Geopsy e Easy HVSR, sviluppati secondo le direttive del progetto europeo SESAME. L'analisi è stata eseguita sull'intero lunghezza della traccia registrata, procedendo all'eliminazione di eventuali finestre spurie sulla base di un giudizio esperto, a partire da finestre temporali di 20s. Tale valore è risultato ottimale rispetto alle finestre temporali acquisite e le frequenze indagate.

Per ogni finestra, la serie temporale relativa a ciascuna componente del moto viene pre-processata (*de-trend* lineare e *tapering* con finestra coseno al 5%) ed analizzata per la determinazione dello spettro (FFT e liscio mediante una finestra mobile triangolare di larghezza pari al 5% della frequenza centrale); per ciascuna frequenza, le ampiezze spettrali delle componenti orizzontali vengono mediate (media geometrica) e il risultato viene diviso per l'ampiezza della componente verticale ottenendo così una stima della funzione HVSR; quindi si identifica la frequenza per la quale il rapporto HVSR è massimo.

I rapporti HVSR ottenuti per ciascuna finestra temporale e per ogni frequenza vengono analizzati statisticamente ottenendo una curva HVSR media con il relativo intervallo di confidenza; viene anche stimato l'intervallo di confidenza relativo alla frequenza corrispondente al massimo della funzione H/V; inoltre sono valutate la direzionalità e la stazionarietà nel tempo delle stime HVSR.

Risultati delle misure HVSR

I segnali sono stati inizialmente ripuliti da interferenze di origine antropica attraverso l'individuazione di tracce fuori trend sia dal grafico delle singole tracce, sia da una prima analisi della curva H/V. La curva HVSR così ottenuta è notevolmente migliorata sia in termini di chiarezza che di ampiezza del segnale.

In **tabella 1** sono riportati i codici identificativi delle misure effettuate, l'ubicazione (coordinate WGS 1984 UTM Zone 32N) e la data di esecuzione della prova.

ID	Frequenza (HZ)	X (Longitudine)	Y (Latitudine)	Data di esecuzione della misura
HVSR 1	12,32	5089791.389533	547303.467999	26/03/2019
HVSR 2	12,49	5089669.301678	547375.879843	26/03/2019
HVSR 3	2,96	5089879.685933	547254.570997	26/03/2019
HVSR 4	12,45	5089922.807077	547258.397974	26/03/2019

Interpretazione del risultato in chiave stratigrafica

In accordo con quanto definito da Albarello et al., sulla base delle frequenze di risonanza determinate sperimentalmente è possibile fornire una stima di massima degli spessori delle coperture soffici responsabili dei possibili fenomeni di risonanza osservati. Di seguito viene riportato un abaco che consente di definire una stima approssimativa delle profondità dei contrasti individuati.

Tab. 1 - Abaco per la stima dello spessore delle coperture (h) a partire dai valori delle frequenze di risonanza (f_0) determinate dalle misure H/V.

F_0 (Hz)	h (m)
<1	>100
1-2	50-100
2-3	30-50
3-5	20-30
5-8	10-20
8-20	5-10
>20	<5

Tale abaco è stato definito per stimare dei valori indicativi della profondità del contrasto di impedenza, sulla base del noto rapporto $f=V_s/4h$, in mancanza di altre evidenze geofisiche o stratigrafiche.

Risulta di notevole importanza sottolineare come l'utilizzo dei dati derivati da analisi HVSR non possa trovare altre applicazioni se non quelle di definire la frequenza fondamentale di terreni naturali o di strutture.

In **tabella 2** sono riportati i codici identificativi delle misure effettuate, il valore di frequenza rilevato e lo spessore della colonna di terreni al di sopra del bedrock

ID	Frequenza (Hz)	Spessore (m)
HVSR 1	12,32	8
HVSR 2	12,49	8
HVSR 3	2,96	50
HVSR 4	12,45	8

Modello geologico

In presenza di altri dati quali stratigrafie di pozzi, sondaggi e/o indagini geofisiche realizzate in prossimità dei punti di misura, è possibile utilizzare i risultati delle indagini HVSR per determinare la profondità del contrasto di impedenza

sismica (o profondità del bedrock) nell'ipotesi di poter estendere un dato puntuale previa opportuna e precisa calibrazione. In presenza di tali dati è possibile caratterizzare in modo speditivo e con una bassa percentuale di errore aree molto estese dal punto di vista areale.

Nel caso in esame sono stati utilizzati i dati dell'indagine geofisica MASW eseguita sempre per il seguente lavoro e, di seguito, vengono fornite una colonnina stratigrafica di riferimento (Fig. 1) e un diagramma delle velocità V_s riferita ai vari strati intercettati dalle prove HVSR (Fig. 2)

Per il presente modello geologico non è stata presa in considerazione l'HVSR 3 in quanto presenta valori anomali rispetto al contesto geologico all'intorno e l'acquisizione potrebbe essere stata influenzata dalle condizioni atmosferiche presenti come il forte vento e da rumori antropici costanti e impossibili da eliminare totalmente. Pertanto il modello geologico è da ritenersi valido solo per le HVSR 1/2/4.

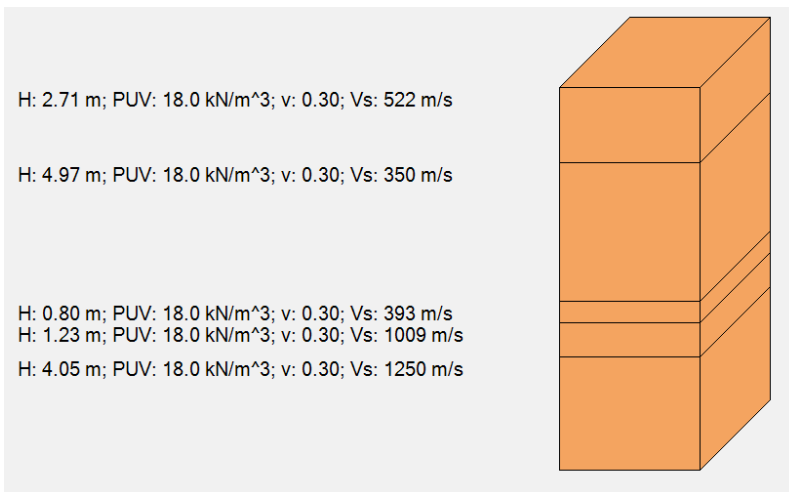


Fig. 1: Colonna stratigrafica

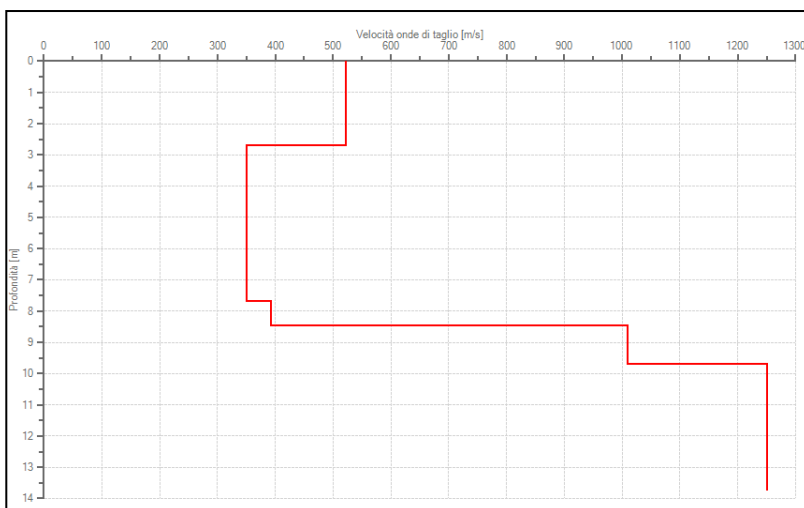


Fig. 2: Diagramma delle velocità V_s

Da quanto precedentemente riscontrato emerge che il terreno indagato presenta un valore delle V_s pari a **395.76 m/s** con riferimento all'attuale piano campagna e pertanto riferibile alla classificazione attualmente vigente delle Norme Tecniche per le Costruzioni (D.M. LL.PP. 17 Gennaio 2018) ad una **categoria di sottosuolo B**.