



Sede Legale:
Via Lamarmora 230, 25124 Brescia
Sede direzionale e amministrativa:
Corso di Porta Vittoria 4, 20122 Milano
A2A-DGE-BGT-IMI-SII

Pratica:	10222	Riattivazione Pompaggio Orichella
Documento:	10222-C-OR-KOR-C-RT-503-0	
Note:		—

IMPIANTO IDROELETTRICO DI:

ORICHELLA

CENTRALE DI:

ORICHELLA

OGGETTO:

*Impianto di Pompaggio di Orichella
Centrale di Orichella
Interventi finalizzati alla Riattivazione del Pompaggio*

TITOLO:

Relazione Geotecnica

CONSULENTE:



Il progettista:

Ing. Marco Braghini

CONCESSIONARIO:



Il Project Manager:

Dott. Ing. Roberto Castellano

Il Legale Rappresentante:

Dott. Ing. Roberto Scottoni

DOCUMENTO N°:

2019.0800.007-GT-GEN-RT-104

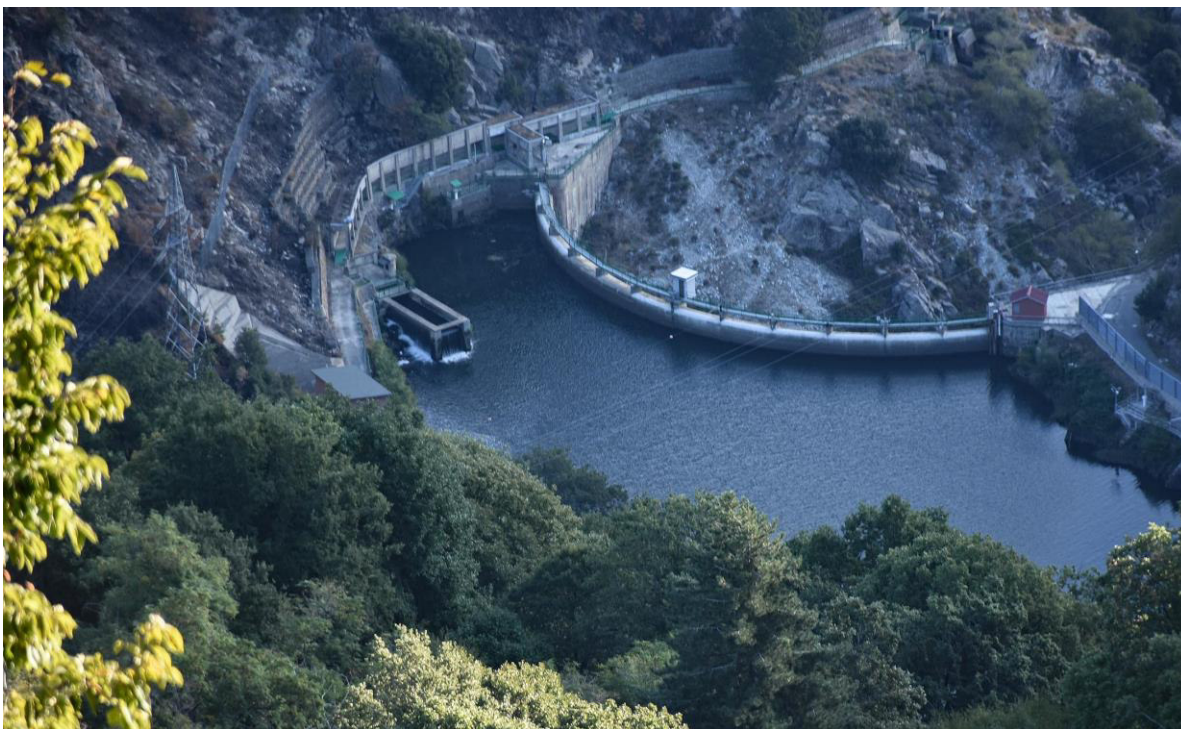
TIPO DOCUMENTO:

RELAZIONE TECNICA

			LOMBARDI			A2A	
2							
1							
0	30/06/2023	Prima emissione	MR/AGi	AGi	Pi/Bal	V. Natoli	R. Castellano
REV.	DATA	DESCRIZIONE DELLA REVISIONE	REDAZIONE	VERIFICA	APPROVAZIONE	VERIFICA	APPROVAZIONE

IMPIANTO IDROELETTRICO DI ORICHELLA CENTRALE DI ORICHELLA

INTERVENTI FINALIZZATI ALLA RIATTIVAZIONE DEL POMPAGGIO



Relazione Geotecnica

00	30.06.2023	AGi/MR	Pi/Bal
Versione	Data	Redatto	Verificato

Lombardi SA Ingegneri Consulenti
Via del Tiglio 2, C.P. 934, CH-6512 Bellinzona-Giubiasco
Telefono +41(0)91 735 31 00
www.lombardi.group, info@lombardi.group

INDICE

1.	INTRODUZIONE	1
1.1	Contesto generale e scopo del lavoro	1
1.2	Struttura del rapporto	2
1.3	Documenti analizzati	2
1.3.1	Documentazione dell'impianto esistente e del progetto di fattibilità	2
1.3.2	Documentazione di progetto	4
2.	SISTEMA IDROELETTRICO ORTICA	5
2.1	Cenni Storici	5
2.2	Descrizione del Sistema ORTICA	5
3.	DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO ESISTENTE	8
4.	STATO DI PROGETTO	10
4.1	Generalità	10
4.2	Opere civili in progetto	10
5.	CENNI SULL' ASSETTO GEOLOGICO	14
6.	INDAGINI GEOGNOSTICHE	17
6.1	Premessa	17
6.2	Campagna indagini ISMES 1985-1986	17
6.2.1	Sondaggi geognostici	17
6.2.2	Prove dilatometriche	19
6.2.3	Indagini geofisiche	20
6.2.4	Prove di laboratorio	23
6.2.5	Considerazioni finali	23
6.3	Campagna indagini GEOTECNA 2010-2011	24
6.3.1	Sondaggi geognostici	25
6.3.2	Indagini geofisiche	26
6.3.3	Tomografia elettrica	27
6.3.4	Caratterizzazione geomeccanica	28
6.3.5	Considerazioni finali	33

6.4	Campagna indagini TERRACH 2021	33
6.4.1	Sondaggi geognostici	34
6.4.2	Prove Lugeon	35
6.4.3	Prove dilatometriche	36
6.4.4	Rilievo con sonda televisiva ed analisi geostrutturale	36
6.4.5	Prove di laboratorio	38
7.	CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA	41
7.1	Premessa	41
7.2	Rilievo geomeccanico CESI maggio 2014	41
7.3	Rilievo geomeccanico CESI novembre 2021	43
7.4	Rilievi CESI laser-scanner	45
7.5	Criteri di classificazione tecnica dell'ammasso roccioso	47
7.6	Criteri di caratterizzazione geomeccanica	48
7.7	Caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso roccioso	48
7.8	Zonazione geomeccanica	55
7.8.1	Zona geomeccanica 1 (UG1)	55
7.8.2	Zona geomeccanica 2 (UG2)	56
7.8.3	Zone di faglia (UG3)	57
8.	CAMPAGNA DI RILIEVO GEOMECCANICO LOMBARDI	59
8.1	Premessa	59
8.2	Metodologia di rilievo	60
8.3	Raccomandazioni I.S.R.M.	61
8.3.1	Orientazione (giacitura)	61
8.4	Spaziatura	63
8.5	Persistenza	63
8.6	Rugosità	64
8.7	Resistenza a compressione delle pareti delle discontinuità	67
8.8	Apertura	69
8.9	Alterazione	71
8.10	Riempimento	71

8.11	Calcolo volume medio del blocco	72
8.12	Calcolo dell'indice di Rock Quality Designation (RQD)	72
8.13	Criteri di classificazione tecnica dell'ammasso roccioso	72
8.14	Stazioni di Misura	74
8.14.1	Stop S1.1	74
8.14.2	Stazione S1.2	77
8.14.3	Stazione S1.3	79
8.14.4	Stazione S1.4	81
8.14.5	Stazione S2.1	83
8.14.6	Stazione S2.2	85
8.14.7	Stazione S2.3	87
8.14.8	Stazione S2.4	88
8.14.9	Stazione S3	90
8.14.10	Stazione S4.1	93
8.14.11	Stazione S4.2	95
8.14.12	Stazione S4.3	97
8.14.13	Stazione S4.4	99
8.15	Analisi Statistica delle discontinuità	101
8.16	Famiglie di discontinuità	104
8.17	Parametrizzazione dell'ammasso roccioso	105
8.18	Valutazione dei cinematismi di crollo	107
8.18.1	Scivolamento planare	108
8.18.2	Scivolamento a cuneo	109
8.18.3	Ribaltamento (toppling)	111

1. INTRODUZIONE

1.1 Contesto generale e scopo del lavoro

La Società A2A S.p.A. (A2A) è proprietaria e gestisce gli impianti idroelettrici dell'asta idraulica situata in Sila (province di Cosenza e Crotona in Calabria), costituita da invasi e prese che alimentano le centrali di Orichella, Timpagrande e Calusia. Il presente documento fa parte del Progetto per la riattivazione dell'impianto di pompaggio della centrale idroelettrica di Orichella, sita nel Comune di San Giovanni in Fiore (CS).

L'attuale impianto è stato progettato e realizzato negli anni '80 del XX secolo con due gruppi ternari pompa – turbina Francis – alternatore (ciascuno da circa 76 MW in generazione e circa 27 MW in pompaggio) e tutte le opere civili annesse; la centrale è alimentata dalle acque in arrivo dal serbatoio dell'Ampollino, che rappresenta anche il recettore del pompaggio. L'invaso di valle è costituito dal lago di Orichella detto anche di "quota 800".

Nel corso del tempo, la sezione di pompaggio venne messa fuori servizio dai precedenti gestori, pur permanendo vigenti le disposizioni degli Atti Concessori che consentono di sollevare mediante pompaggio la risorsa idrica raccolta nell'invaso di Orichella a "quota 800" per immetterla nel serbatoio dell'Ampollino.

Oggigiorno risulta quanto mai opportuno prospettare una riattivazione del pompaggio, allo scopo di contribuire efficacemente alla evoluzione del sistema elettrico italiano, che deve adeguarsi ai cambiamenti imposti dal recente pacchetto di misure "Fit for 55" e dalla necessità di diminuire la dipendenza dai combustibili fossili, anche assecondando gli obiettivi prospettati da TERNA nel "Rapporto Adeguatezza Italia 2022" dedicato alle problematiche della rete elettrica.

Allo scopo di aumentare la flessibilità del sistema di pompaggio Orichella-Ampollino e delle sottostanti centrali di Timpagrande e Calusia, viene prospettata l'eventuale possibilità di convogliare le acque derivate direttamente verso valle in alternativa al pompaggio già assentito dai predetti atti concessori. Viene altresì prospettato il ripristino della componentistica dedicata al pompaggio all'interno dei Gruppi elettromeccanici, adottando le più moderne caratteristiche tecnologiche.

Obiettivo del presente rapporto è la Relazione Geotecnica. I contenuti si basano sui documenti storici reperiti e fanno particolare riferimento al documento "*Progetto di Fattibilità per l'intervento di manutenzione straordinaria della Diga di Orichella - Caratterizzazione geomeccanica della roccia presente in fondazione e sulle spalle della diga*" realizzato da CESI nel maggio 2022 [27].

In questa fase di progetto, si ritiene ragionevole, data la vicinanza tra queste e la diga di Orichella, considerare l'assetto geologico e geomorfologico del progetto in linea con quanto descritto nel doc. [19] e relativo all'imposta dello sbarramento.

Per definire nel dettaglio il modello geologico, idrogeologico e geotecnico sarà necessario realizzare, preliminarmente alla fase di esecutivo, un piano di indagini geognostiche, in

corrispondenza delle nuove opere interessate dal progetto di ripristino dell'impianto di pompaggio di Orichella. Allo scopo di definire tali indagini, viene incluso nel presente Progetto anche il documento "2019.0800.007-GT-GEN-RT-116 Piano indagini geognostiche" [30].

1.2 Struttura del rapporto

Il presente rapporto ha la seguente struttura:

- **Capitolo 1:** contiene l'introduzione con le motivazioni e lo scopo dell'attività tecnica affidata;
- **Capitolo 2:** descrive brevemente le caratteristiche del sistema idroelettrico dell'asta della Sila in cui si inserisce l'impianto di pompaggio di Orichella;
- **Capitolo 3:** descrive le opere dell'impianto esistente;
- **Capitolo 4:** illustra gli interventi in progetto;
- **Capitolo 5:** riporta brevemente l'assetto geologico;
- **Capitolo 6:** contiene le indagini geognostiche a disposizione;
- **Capitolo 7:** illustra la caratterizzazione geotecnica degli ammassi e dei giunti;
- **Capitolo 8:** illustra la campagna di rilievo geomeccanico effettuata da Lombardi.

1.3 Documenti analizzati

1.3.1 Documentazione dell'impianto esistente e del progetto di fattibilità

Per la redazione del presente rapporto è stato fatto riferimento ai documenti elencati nel seguito, compresi nella documentazione d'incarico ricevuta da A2A:

- [1] Ing. Angelo Omodeo – Progetto di derivazione da Fiume Ampollino N° 327 – 24 Aprile 1925;
- [2] Ing. Angelo Omodeo – Progetto di derivazione da Fiume Ampollino N° 328 – 23 Aprile 1925;
- [3] Ing. Angelo Omodeo – Progetto di derivazione da Fiume Ampollino N° 327BIS – 7 Febbraio 1927;
- [4] Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici – Servizio Dighe – Verbale di visita e collaudo delle dighe di Trepidò e di Orichella – Impianti Silani – 31 Dicembre 1930;
- [5] ISMES – Diga di Orichella – Indagini per la determinazione delle caratteristiche della roccia di fondazione – 11 Giugno 1986;
- [6] ISMES – Diga di Orichella – Misure soniche nella muratura e nella roccia di fondazione – 11 Giugno 1986;
- [7] ISMES – Diga di Orichella – Indagini in sito e in laboratorio per la determinazione delle caratteristiche fisico-chimiche della roccia di fondazione e del calcestruzzo – 24 Luglio 1986;
- [8] ISMES – Diga di Orichella – Rapporto finale di sintesi – 30 Luglio 1986;
- [9] ANIDEL – Diga di Orichella – Impianti idroelettrici della Sila;

- [10] Presidenza del Consiglio dei Ministri – Dipartimento per i servizi tecnici nazionali – Servizio Nazionale Dighe – Foglio di condizioni per l'esercizio e la manutenzione – Diga di Orichella – Marzo 1997;
- [11] ENEL – Diga di Orichella – Analisi numeriche per la verifica della sicurezza sismica – 16 Giugno 1999;
- [12] Geotecna Progetti – Diga di Orichella – Studio sullo stato di invecchiamento della struttura ed aggiornamento della caratterizzazione geomeccanica della roccia di imposta-indagini integrative sul corpo diga e sulla roccia di fondazione – Gennaio 2012;
- [13] ISPRA – Inventario dei fenomeni franosi in Italia (progetto IFFI);
- [14] APAT – Progetto CARG – Foglio 580 “Soverato” della Carta Geologica d'Italia a scala 1:50'000 (In allestimento, disponibile per la consultazione on-line);
- [15] Foglio 237 “San Giovanni in Fiore” (1887-1890) della Carta Geologica d'Italia a scala 1:100'000;
- [16] Tavoleta 237 II NO “Petilia Policastro” della Carta Geologica della Calabria a scala 1:25'000 (1970-1971);
- [17] Carta geologica dell'Arco Calabro-Peloritano a scala 1:500'000 di Bonardi et alii (1976);
- [18] Carta geologica e Carta litologica a scala 1:250'000 del Piano Stralcio di Bacino per l'assetto idrogeologico (PAI) della Regione Calabria (2001).
- [19] CESI, N° DOC AN12SCE077-B3003885 – Diga di Orichella. Comune di Cotronei (KR) – Valutazione delle condizioni geologiche delle sponde ai fini delle verifiche di sicurezza sismica secondo il Decreto 26 giugno 2014 “Norme Tecniche per la progettazione e costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse)” (marzo 2015).
- [20] TERRACH – Diga di Orichella – Indagini geognostiche in sito – Relazione illustrativa e allegati – dicembre 2021
- [21] ISMGEO – Diga di Orichella – Prove geomeccaniche di laboratorio – Doc. RAT 014/22 – 24/01/22
- [22] A2A: Aggiornamento della caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso roccioso in corrispondenza del sito d'imposta sulla base delle nuove indagini – Rapporto C2300456, 2022.
- [23] A2A: Progetto di fattibilità – Riattivazione pompaggio di Orichella – G1 – Approfondimenti idraulici, febbraio 2020.
- [24] A2A: Progetto di fattibilità – Riattivazione pompaggio di Orichella – Analisi complessiva dei possibili interventi sull'asta idroelettrica Silana, luglio 2020.
- [25] A2A: Progetto di fattibilità – Riattivazione pompaggio di Orichella – H1 – Valutazioni pompaggio OCH – rev. 4, aprile 2022.
- [26] Lombardi: 10220-C-TI-DOR-C-RT-300-0 – Progetto di Fattibilità per l'intervento di manutenzione straordinaria della Diga di Orichella – Analisi dei risultati della campagna indagine 2021 sul calcestruzzo e la roccia di fondazione della diga (giugno 2022).

- [27] Lombardi: 10220-C-TI-DOR-C-RT-301-0 – Progetto di Fattibilità per l'intervento di manutenzione straordinaria della Diga di Orichella – Caratterizzazione geomeccanica della roccia presente in fondazione e sulle spalle della diga (giugno 2022).
- [28] Lombardi: 10220-C-TI-DOR-C-RT-302-0 – Diga di Orichella – Progetto di fattibilità dell'intervento di manutenzione straordinaria della diga di Orichella – Aggiornamento dello studio sismotettonico per il sito della diga (giugno 2022).

1.3.2 Documentazione di progetto

- [29] Lombardi – 2019.0800.007-GT-GEN-RT-103 – Impianto Idroelettrico di Orichella – Interventi finalizzati alla riattivazione del pompaggio – Relazione Geologica (febbraio 2023).
- [30] Lombardi – 2019.0800.007-GT-GEN-PI-116 – Impianto Idroelettrico di Orichella – Interventi finalizzati alla riattivazione del pompaggio – Piano indagini geognostiche (febbraio 2023).

2. SISTEMA IDROELETTRICO ORTICA

2.1 Cenni Storici

I tre impianti idroelettrici in serie della Sila, denominati rispettivamente di Orichella, di Timpagrande e di Calusia costituiscono il cosiddetto nodo idraulico ORTICA. Regolati in testa dai due serbatoi dell'Arvo e dell'Ampollino, utilizzano i deflussi dei fiumi Arvo ed Ampollino, entrambi affluenti di destra del Neto; quelli del torrente Frappia, convogliati nel lago Arvo; quelli dell'alto corso del fiume Tacina, derivati in gronda a Li Rinusi e quelli del F. Savuto, convogliati nel Lago Ampollino. Limitatamente agli ultimi due salti (Timpagrande e Calusia), utilizzano anche la portata fluente dal F. Neto, convogliata nel bacino di modulazione di Orichella, ubicato a valle della centrale dell'omonimo impianto.

La potenza totale installata dei tre vecchi impianti era in origine di 268 MW, con una potenza efficiente di 190 MW. Nei primi anni '80, a seguito dei lavori di ampliamento dei primi due dei tre vecchi impianti idroelettrici in serie della Sila (Orichella e Timpagrande, entrambi costruiti tra il 1922 e il 1932) è stato possibile raddoppiare la potenza efficiente con l'installazione di due gruppi di pompaggio nella centrale dell'impianto idroelettrico di Orichella. È stato inoltre costruito un bacino di modulazione sul Torrente Migliarite, dal volume utile di regolazione di 250'000 m³, collegato in parallelo col bacino di modulazione di Orichella e nel quale venivano immagazzinati anche i deflussi derivati in gronda del medio corso del Tacina.

Con il nuovo schema di utilizzazione realizzato la potenza installata totale in produzione dei primi tre impianti è aumentata da 268 a 390 MW, ed è stata installata una potenza di pompaggio di 54 MW. La producibilità media annua totale è aumentata da 668 a 757 GWh.

2.2 Descrizione del Sistema ORTICA

Sull'asta della Sila, nell'ambito dello schema idroelettrico che utilizza le acque in concessione ad A2A, insistono ad oggi cinque invasi e tre centrali idroelettriche:

- i serbatoi di testa dell'Arvo e dell'Ampollino (dove vengono anche recapitate la acque raccolte nell'invaso del Savuto mediante un pompaggio di gronda), che alimentano la centrale con gruppi ternari¹ (attualmente operativi solo in generazione) di Orichella (detta anche I Salto);
- gli invasi di Orichella e Migliarite, detti invasi di "quota 800" che alimentano la centrale di Timpagrande (detta anche II Salto);
- la centrale di Calusia (III Salto), non alimentata direttamente da un bacino, che sfrutta i deflussi turbinati dalla centrale di Timpagrande e quelli del bacino residuo del Fiume Neto.

¹ gruppi ternari sono costituiti da turbina e pompa coassiali, accoppiati ad un'unica macchina elettrica (generatore/motore)

L'invaso di Ampollino è un serbatoio di circa 65'000'000 m³ di capacità utile, situato a quota 1'271.00 m. s.l.m. (quota di massima regolazione della diga di Trepidò), che viene utilizzato per effettuare la regolazione annuale delle portate dei fiumi Ampollino, Tacina e dei torrenti Pollitrea e Fischio per la produzione di energia elettrica nelle centrali di Orichella, Timpagrande e Calusia.

L'invaso di Orichella, anch'esso formato dallo sbarramento del F. Ampollino, è un bacino di circa 180'000 m³ di capacità utile, situato a quota 795.90 m s.l.m. (quota di massima regolazione della diga di Orichella). Questo vaso viene utilizzato per effettuare la regolazione giornaliera delle portate del bacino imbrifero proprio (F. Ampollino a valle della diga di Trepidò), di quelle scaricate dalla adiacente centrale di Orichella e di quelle derivate dal fiume Neto a quota 804.10 m s.l.m. nonché di quelle dei torrenti Verardi e Marinella.

Il serbatoio di Orichella alimenta l'impianto di Timpagrande, al quale giungono anche le acque dell'invaso di Migliarite e del F. Neto. Una parte dei volumi d'acqua accumulati nell'invaso di Migliarite non viene utilizzata per la generazione ma è consegnata al Consorzio di Bonifica Jonico Crotonese (CJK) per scopi principalmente irrigui. Anche le acque scaricate dalla centrale di ultimo salto di Calusia vengono successivamente utilizzate dal Consorzio di Bonifica Jonico Crotonese (CJK) per scopi principalmente irrigui.

La presa di Juntura deriva le acque del fiume Neto poco a valle della confluenza del fiume Arvo e le convoglia all'invaso dell'Orichella, raccogliendo anche quelle di due affluenti minori del Neto con le prese Verardi e Marinella.

Si riporta in **Figura 1** lo schema di funzionamento del nodo idraulico ORTICA.

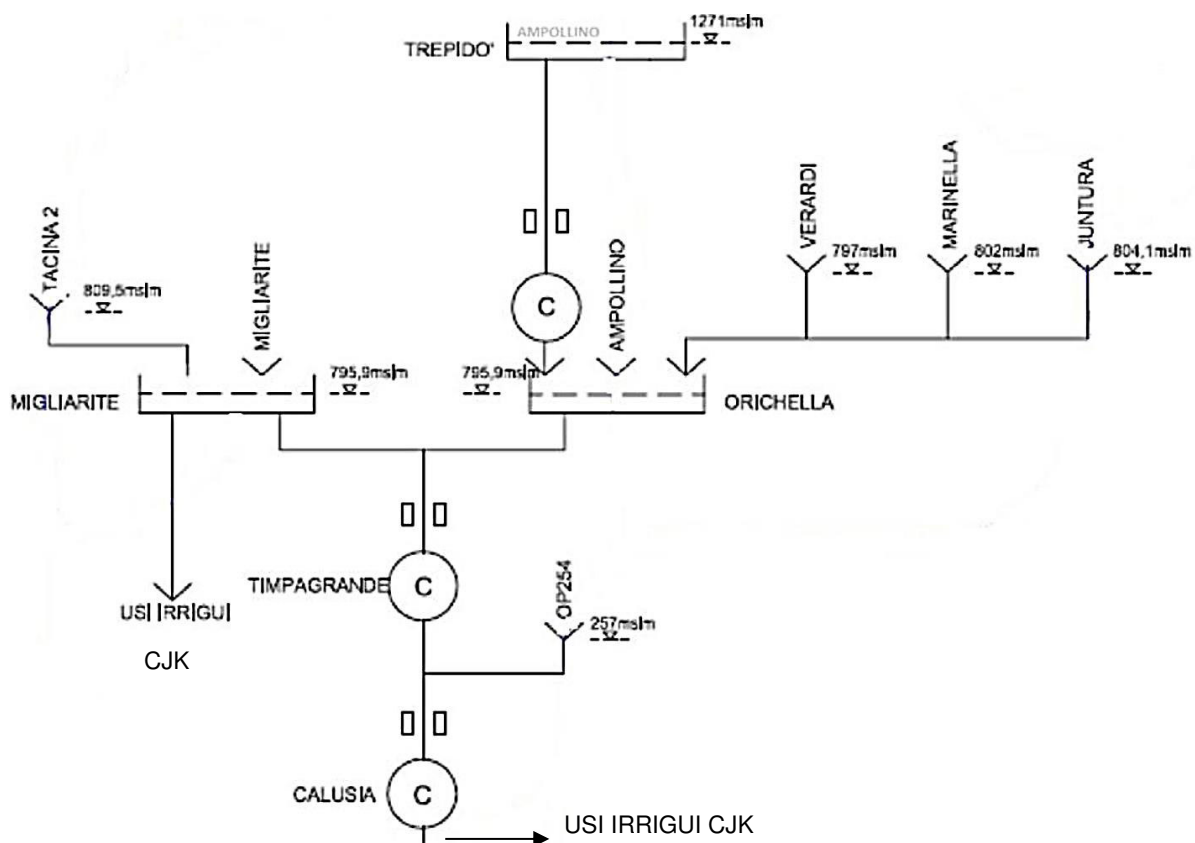


Figura 1: Schema di funzionamento del nodo idraulico ORTICA (Orichella-Timpagrande-Calusia).

3. DESCRIZIONE DELL'IMPIANTO ESISTENTE

Lo schema idroelettrico della Sila, che utilizza le acque in concessione ad A2A, sfrutta gli invasi dell'Arvo, dell'Ampollino, di Orichella e di Migliarite per produrre energia elettrica nelle centrali di Orichella, Timpagrande e Calusia.

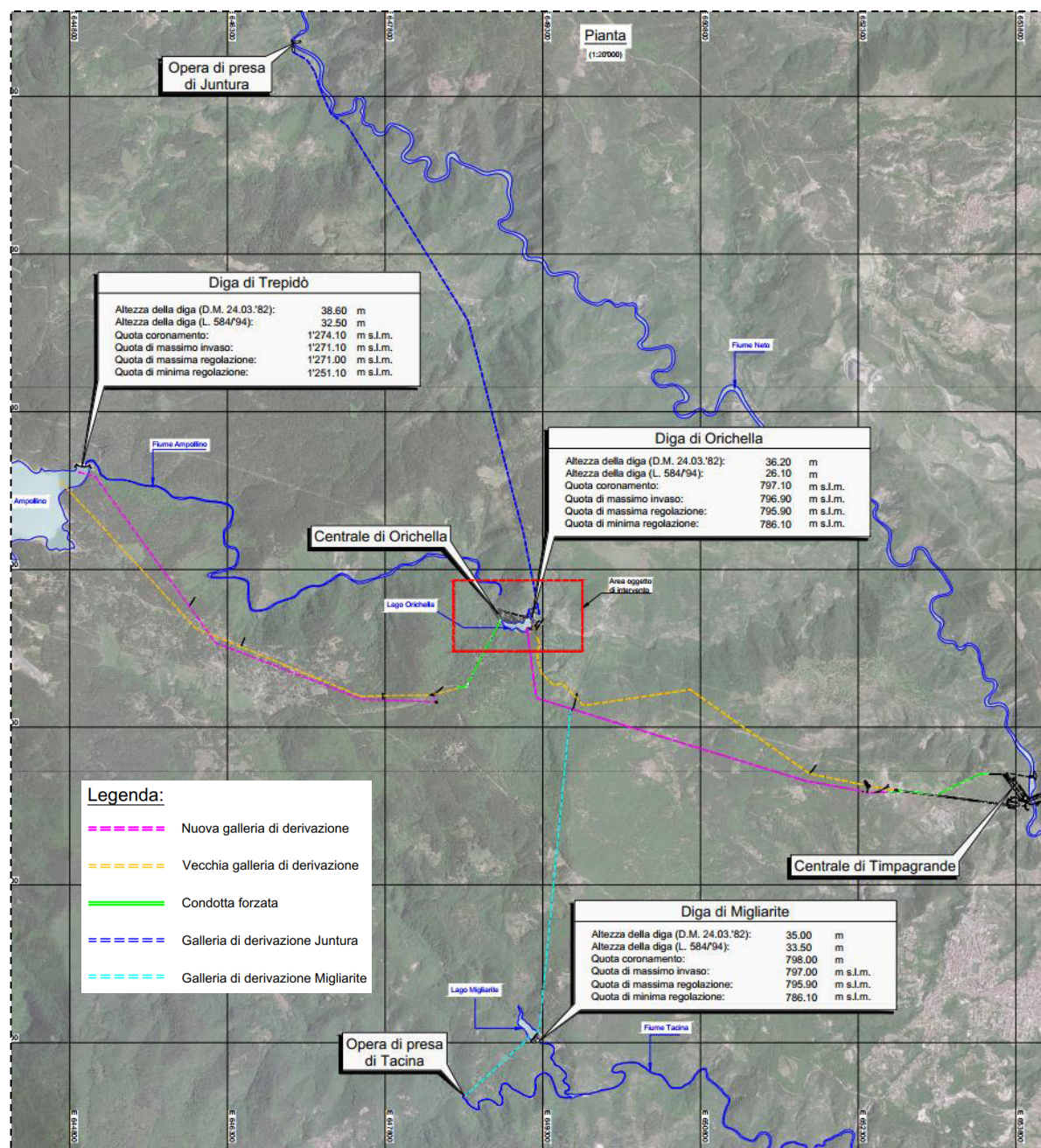


Figura 2: Corografia del nodo idraulico ORTICA (Orichella-Timpagrande-Calusia).

L'impianto di generazione e pompaggio di Orichella e l'impianto di generazione di Timpagrande, oggetto del presente lavoro, sono attualmente composti procedendo da monte verso valle dalle seguenti opere principali:

- Diga di Trepidò (Tipo a gravità ordinaria, H=38.60 m);
- Opere di presa nell'invaso di Ampollino (vecchia e nuova);
- Galleria di derivazione vecchia (D = 2.5 m, L = 4'430 m) e nuova (D = 3.30/3.10 m, L = 4'111 m);
- Pozzo piezometrico vecchio (D = 5 m, H = 52 m) e nuovo (D = 5 m, H = 63 m);
- Camera valvola (B = 8.30 x 7.00 m, H = 9.25 m);
- Condotta forzata (D = 3.00/2.70 m, L = 1'218 m);
- Centrale seminterrata di Orichella (No. 2 gruppi pompa-turbina Francis);
- Galleria di scarico e aspirazione (D = 4 m, L = 223 m);
- Opera di presa/restituzione nell'invaso di Orichella;
- Diga di Orichella (Tipo a volta ad arco, H=36.20 m);
- Opere di presa nell'invaso di Orichella (vecchia e nuova);
- Galleria di derivazione vecchia (D = 3.0 m, L = 4'040 m) e nuova (D = 3.30 m, L = 3'865 m);
- Diga di Migliarite (Tipo a gravità ordinaria, H=35.00 m);
- Opera di presa nell'invaso di Migliarite;
- Galleria di derivazione Migliarite (D = 2.40 m, L = 3'101 m);
- Pozzo piezometrico (D = 10.00 m, H = 40.40 m);
- Camera valvole;
- Condotta forzata (D = 3.20 m, L = 1'236 m);
- Centrale in caverna di Timpagrande (No. 3 gruppi Pelton).

4. STATO DI PROGETTO

4.1 Generalità

Il progetto in esame prevede di ripristinare la funzionalità delle opere di pompaggio dell'impianto idroelettrico di Orichella e al tempo stesso aumentare la flessibilità del sistema e delle sottostanti centrali di Timpagrande e Calusia. A tal fine viene proposta una soluzione tecnica che preveda l'ammodernamento delle apparecchiature elettromeccaniche esistenti e che consenta eventualmente di convogliare le acque derivate dalla presa Juntura direttamente verso Timpagrande, in alternativa all'invaso delle acque in Orichella con conseguente possibile pompaggio già assentito dai predetti atti concessori (indicata in rosso in **Figura 3**):

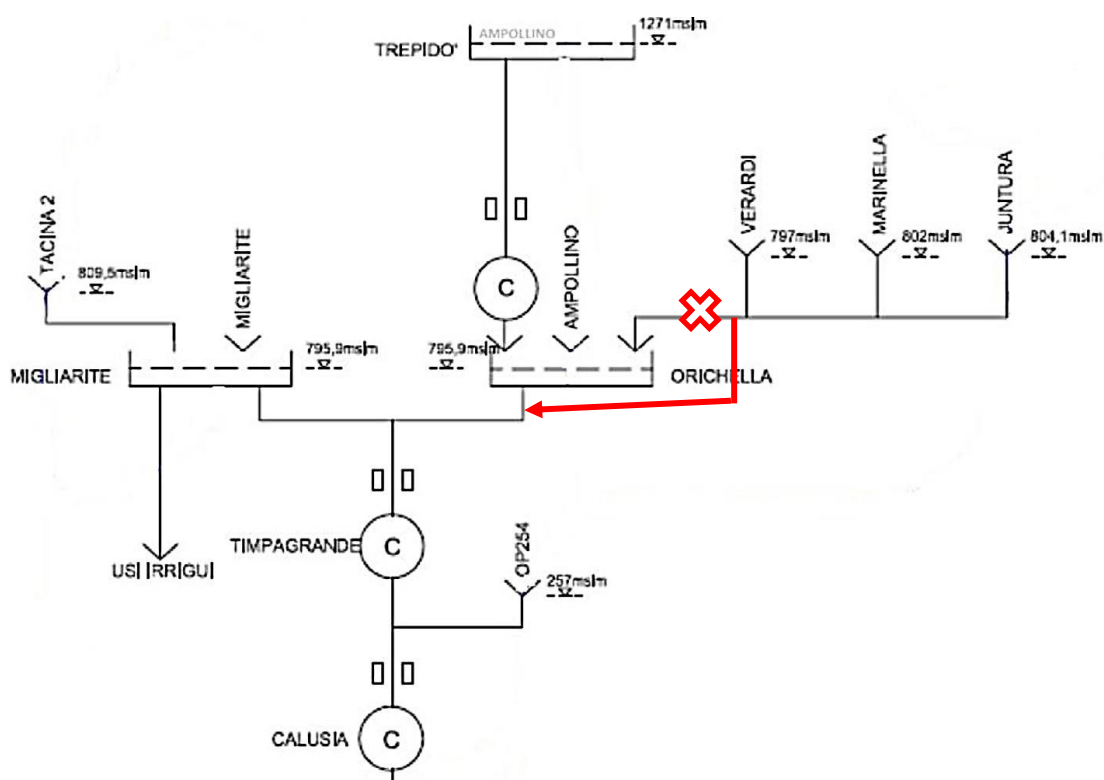


Figura 3: Schema dell'impianto nella configurazione di progetto.

4.2 Opere civili in progetto

Allo stato di fatto il canale derivatore in arrivo dall'opera di presa di Juntura è progettato per sfiorare le acque captate dal Fiume Neto direttamente all'interno del bacino di Orichella come mostrato in **Figura 4**.

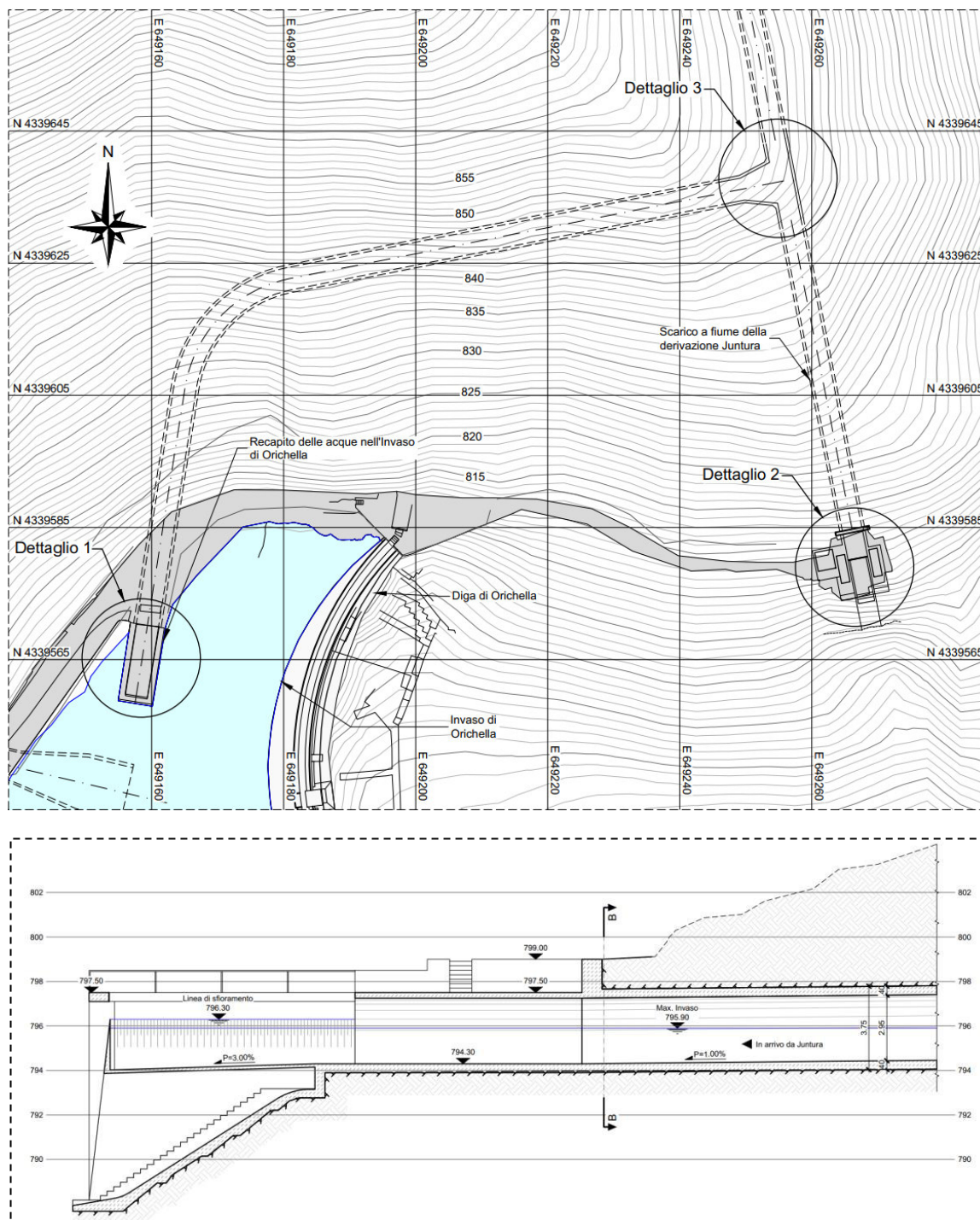


Figura 4: Sfioro in diga del canale derivatore (Juntura) dal F. Neto – Stato di Fatto.

In accordo al progetto di fattibilità [23], si prevede la realizzazione di un sifone per il convogliamento diretto della portata in arrivo da Juntura verso la vecchia galleria di derivazione di Timpagrande (v. **Figura 5**). Quest'ultimo, necessario per l'attraversamento dell'alveo a valle della diga, sarà intercettato a monte da un pancone e a valle da una paratoia a cassa chiusa.

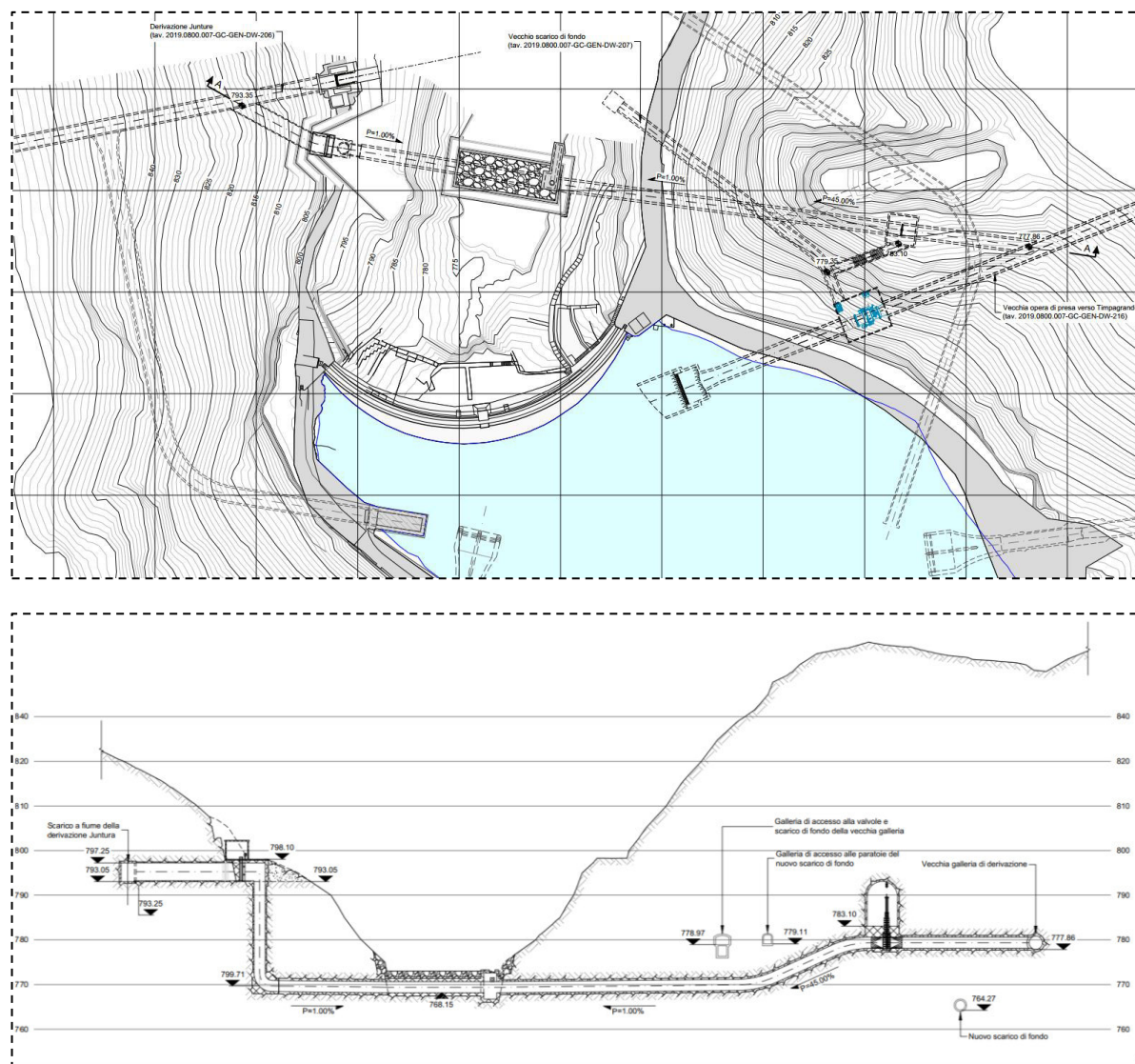


Figura 5: Planimetria e profilo del sifone in progetto.

Oltre a quanto sopracitato, si prevede l'installazione di nuove valvole a farfalla DN 2'600 in corrispondenza:

- della camera valvole sulla “vecchia” derivazione verso Timpagrande, per la quale saranno necessari lavori di demolizione e ampliamento (v. **Figura 6**);
- di una nuova camera valvole in prossimità del nodo Migliarite-Orichella, a valle della paratoia a cassa sulla “nuova” derivazione verso Timpagrande (v. **Figura 7**).

Ogni valvola sarà normalmente completamente aperta e si chiuderà automaticamente, per mezzo di un contrappeso, controllato da un sensore di velocità dell'acqua.

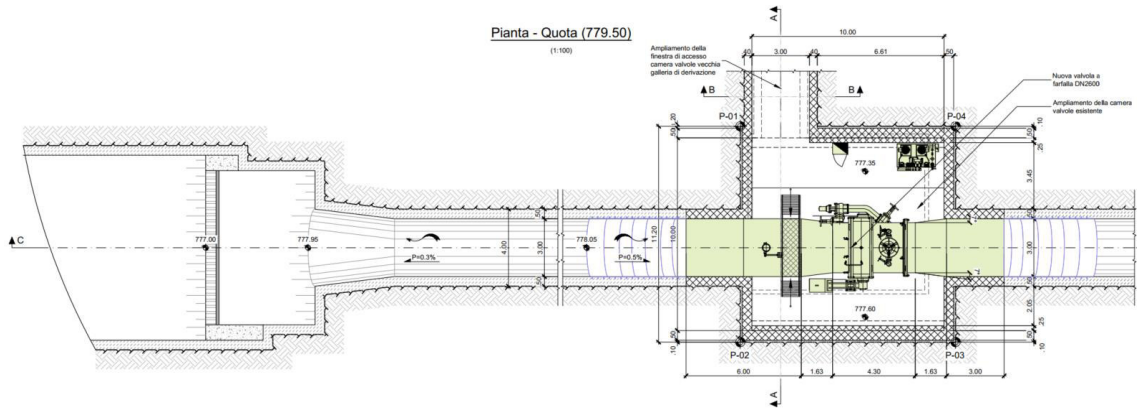


Figura 6: Ampliamento della camera valvole sulla “vecchia” derivazione verso Timpagrande ed inserimento di nuova valvola a farfalla DN 2’600.

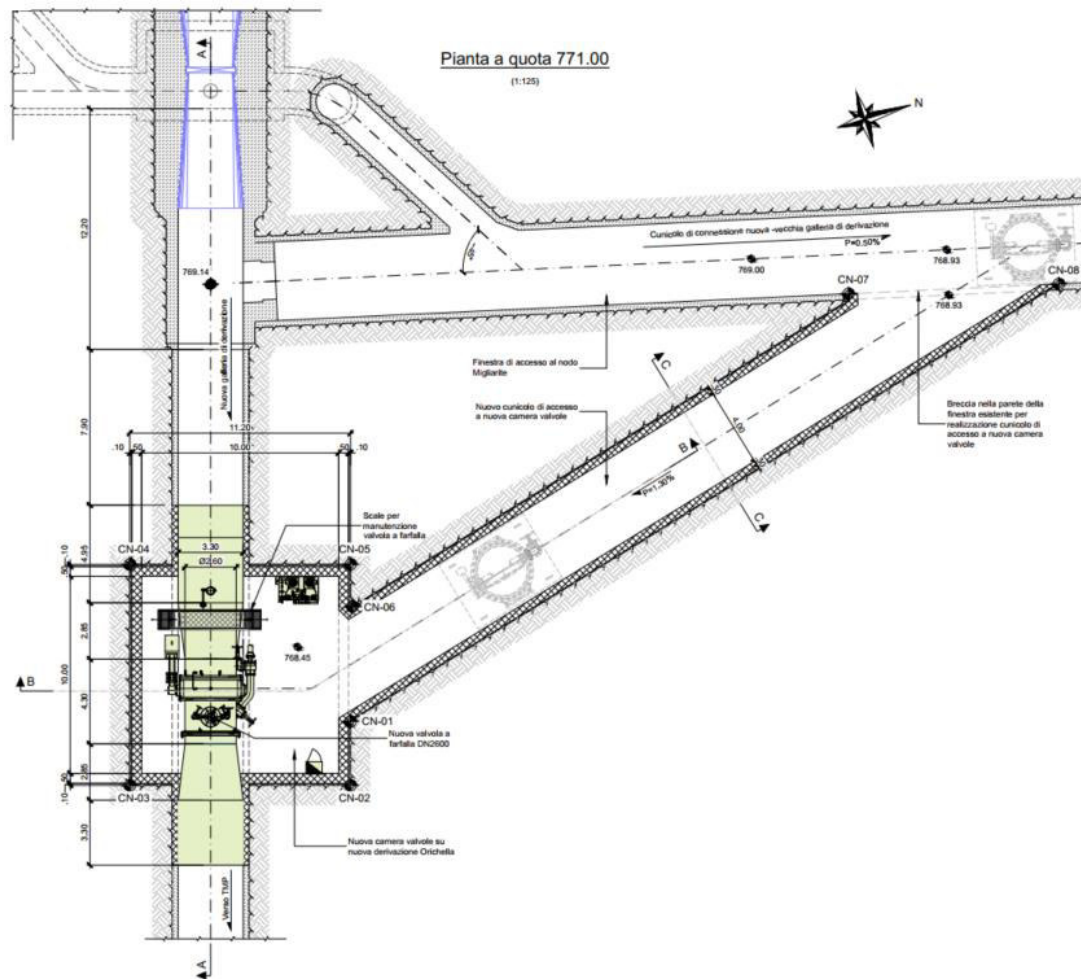


Figura 7: Nuova camera valvole in corrispondenza del nodo Migliarite sulla “nuova” derivazione verso Timpagrande ed inserimento di nuova valvola a farfalla DN 2’600.

5. CENNI SULL' ASSETTO GEOLOGICO

Rimandando alla Relazione Geologica [29] per ogni approfondimento è sufficiente in questa sede ricordare che il substrato roccioso della zona di imposta della diga di Orichella è costituito da rocce cristalline di origine ignea intrusiva appartenenti all'unità dei "Graniti calabri", di età ercinica.

La roccia risulta caratterizzata da una grana medio-fine ed inequigranulare, con cristalli di plagioclasio idiomorfo di dimensioni anche di qualche centimetro, significativamente maggiori rispetto al resto dei minerali.

La roccia si presenta, in genere, debolmente alterata, localmente moderatamente alterata, con diffusa decolorazione superficiale in affioramento. Solo lungo i piani di frattura l'alterazione è più marcata e sono localmente presenti tracce di ossidazione ed una più spinta alterazione di origine idrotermale, che ha prodotto la crescita di minerali secondari quali clorite, epidoto e sericite, ed il cambiamento di colore del granito che da grigio-biancastro passa ad un colore marcatamente verdastro. Tale processo di cloritizzazione avviene per comparsa di clorite ed epidoto a spese della biotite, di parte del plagioclasio e del quarzo, ed ha talora determinato, specie lungo le faglie principali, ove tale alterazione è stata più intensa, anche la comparsa di clorite talcosa a grana limoso-sabbiosa. Localmente sono presenti vene aplitico-pegmatitico di spessore massimo di 50 cm.

Data la notevole acclività dei versanti di entrambi i fianchi vallivi (circa 50% il destro e 65% il sinistro) il substrato è quasi ovunque affiorante o, al massimo, ricoperto da un modesto strato di eluvio. Gli affioramenti presentano generalmente altezze modeste, ad eccezione dello sperone roccioso che sovrasta la diga in sponda destra dove si superano i 50 m d'altezza.

Dal punto di vista strutturale l'elaborazione stereografica di tutti i dati giacitureali acquisiti nelle diverse campagne di indagine ha evidenziato la presenza di due sistemi di discontinuità a bassa inclinazione con immersione verso est e sud-sudest (sistemi K1 e K2) e di 3 sistemi di giunti coniugati ad elevata inclinazione con immersione verso sud-ovest, est-sudest e nord-ovest (sistemi K3-K3', K4-K4' e K5-K5') come mostrato sinteticamente nella seguente immagine in cui è riportato anche l'asse della diga.

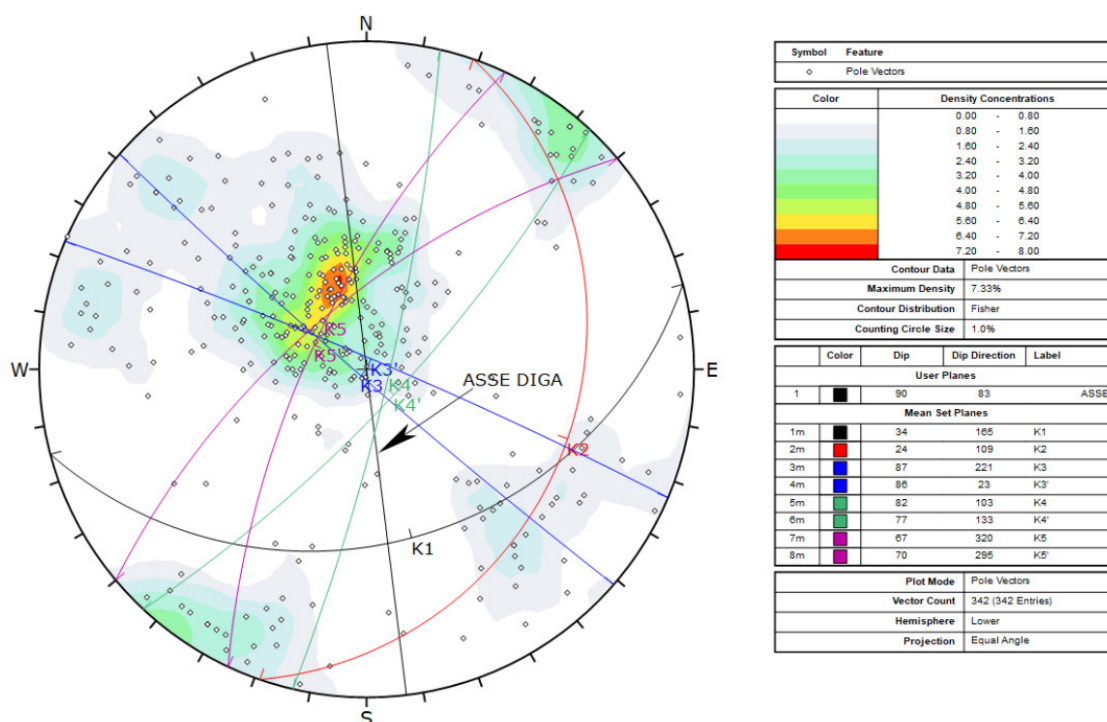


Figura 8: Analisi stereografica.

L'ammasso roccioso di fondazione risulta intersecato inoltre da alcune faglie principali lungo le quali si sono localizzate le maggiori deformazioni tettoniche di taglio. Si tratta di faglie caratterizzate da modesti spessori della zona di disturbo, da elevata continuità lineare e da prevalenti inclinazioni ad alto angolo sull'orizzontale, fino a sub-verticali, associate a movimenti di strike-slip (trascorrenti) od obliqui. Indizi sulla presenza di tali strutture principali risultano anche dall'andamento delle velocità sismiche che segnalano variazioni laterali delle velocità complessivamente compatibili con l'esistenza di discontinuità ad alto angolo.

Lo spessore complessivo delle principali zone di faglia individuate nell'ammasso, si aggira, generalmente, su valori mediamente modesti, variabili da un minimo di 0.2÷0.5 m ad un massimo di circa di 1.5÷2 m.

L'assetto geologico- strutturale della zona di imposta della diga è mostrato nella seguente immagine.

6. INDAGINI GEOGNOSTICHE

6.1 Premessa

Nell'ambito del presente studio non sono state realizzate specifiche indagini in sito e ci si è riferiti ai risultati delle indagini di terreno e prove di laboratorio condotte da:

- ISMES (1985-1986);
- GEOTECNA (2010-2011);
- TERRACH (2021).

In questa fase di progetto in corrispondenza delle nuove opere, si ritiene ragionevole, data la vicinanza tra queste e la diga di Orichella, considerare l'assetto geologico, geomorfologico e geotecnico di progetto in linea con quanto descritto nel doc. [19] e [26] e relativo all'imposta dello sbarramento.

Si fa presente dunque che, nel presente capitolo, si riporteranno esclusivamente i risultati delle indagini volte alla caratterizzazione geotecnica dell'ammasso roccioso in fondazione e sulle spalle della diga di Orichella, contenuti e descritti nel doc. [26].

6.2 Campagna indagini ISMES 1985-1986

Valutata la considerevole età dell'opera, nel 1985 fu affidato a ISMES l'incarico di eseguire una campagna indagini intesa a consentire la determinazione dei parametri indispensabili per poter valutare lo stato, e l'eventuale degrado, del manufatto. Venne inoltre stabilito di estendere le indagini anche al complesso roccioso della fondazione della diga.

Le indagini realizzate furono le seguenti (doc. [1]):

- n° 9 sondaggi a carotaggio continuo, eseguiti dal coronamento della diga;
- n° 8 prove dilatometriche in foro nella roccia di fondazione;
- misure di carotaggio sonico in ogni foro e di cross-hole sonico tra fori adiacenti;
- prove di laboratorio su n° 29 campioni di calcestruzzo e su n° 12 campioni di roccia;
- determinazione delle caratteristiche geologico-strutturali e petrografico-mineralogiche della roccia di fondazione.

6.2.1 Sondaggi geognostici

I 9 sondaggi geognostici (S1-S9), tutti eseguiti sull'asse di riferimento della diga (**Figura 10**), hanno intercettato il substrato lapideo a profondità comprese tra 9.5 e 19.8 m.

Una sintesi dei sondaggi eseguiti è mostrata nella seguente tabella:

Sondaggio	Ubicazione	Quota (m s.m.)	Lunghezza (m)	Spessore dei livelli individuati	
				Corpo diga	Substrato
S1	coronamento	798.0	32,25	13,50	18,75
S2	coronamento	797.1	40,40	23,90	16,50
S3	coronamento	797.1	40,00	23,60	16,40
S4	coronamento	797.1	40,00	30,50	9,50
S5	coronamento	797.1	40,00	30,20	9,80
S6	coronamento	797.1	40,20	30,30	9,90
S7	coronamento	797.1	40,50	25,75	14,75
S8	coronamento	797.1	40,50	26,30	14,20
S9	coronamento	798.2	35,50	15,70	19,80

Tabella 1: Sintesi delle risultanze dei sondaggi della campagna di indagini ISMES (1986).

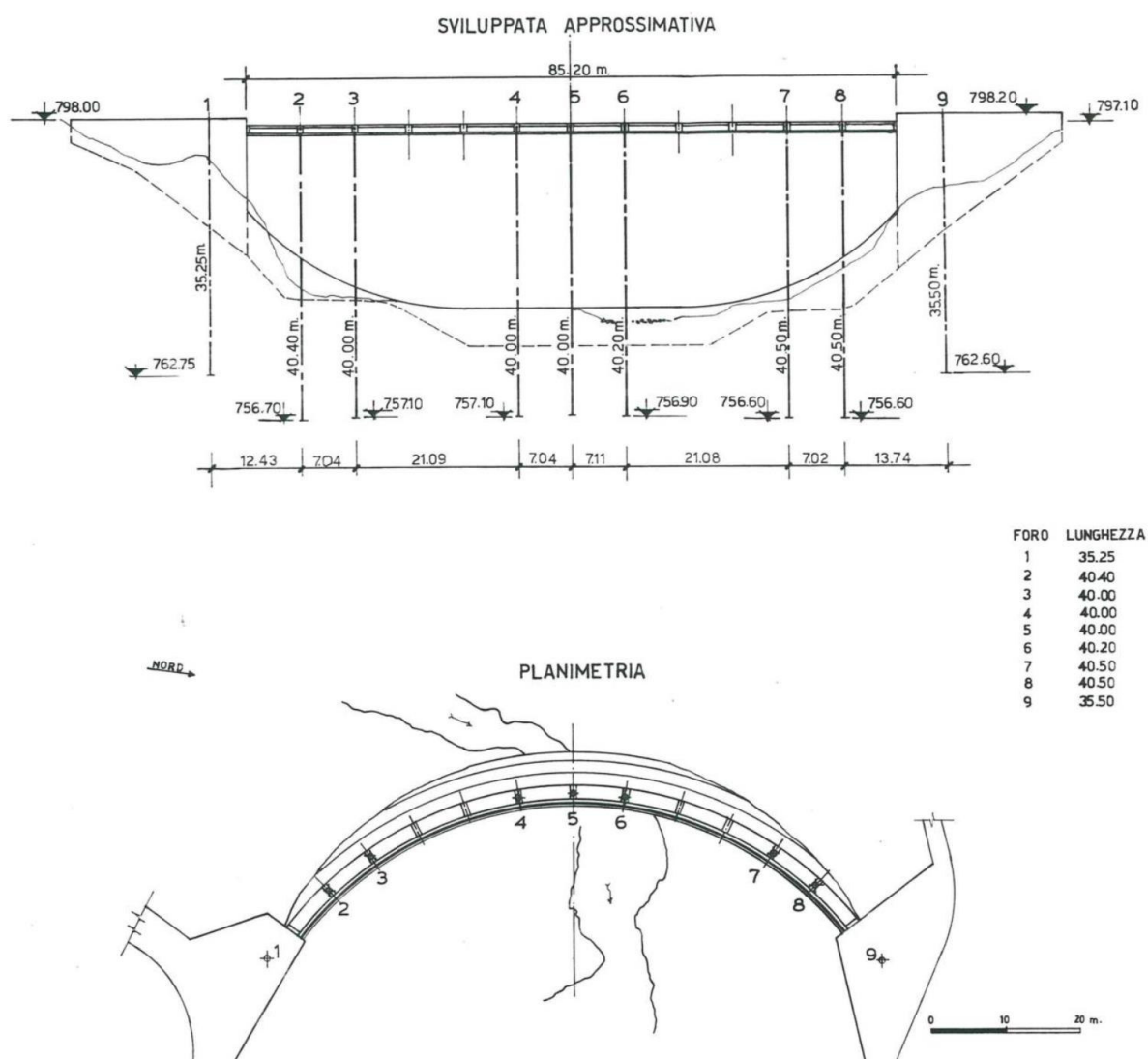


Figura 10: Ubicazione sondaggi della campagna indagini ISMES 1985-1986.

Nell'ammasso roccioso di fondazione il valore diagrammato di RQD (**Figura 11**) si presenta molto variabile; la situazione peggiore appare quella del sondaggio centrale (S5) dove, tra i 33 e 39 m di

profondità il valore è inferiore a 10%, ma anche negli altri sondaggi sono presenti fasce più o meno estese con valori a bassa percentuale.

L'analisi della distribuzione del valore medio ponderato di RQD all'interno dei diversi sondaggi (v. **Tabella 2**), ha permesso di constatare che il peggioramento delle proprietà fisico-meccaniche dell'ammasso roccioso aumenta dai fianchi verso l'asse vallivo. Non si è potuto constatare, invece, il tipico miglioramento delle condizioni di fratturazione dell'ammasso generalmente riscontrabile con l'aumento della profondità.

Sondaggio	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9
RQD	63	74	65	45	25	30	45	66	57

Tabella 2: Valore medio ponderato di RQD calcolato nei diversi sondaggi (da ISMES, 1986).

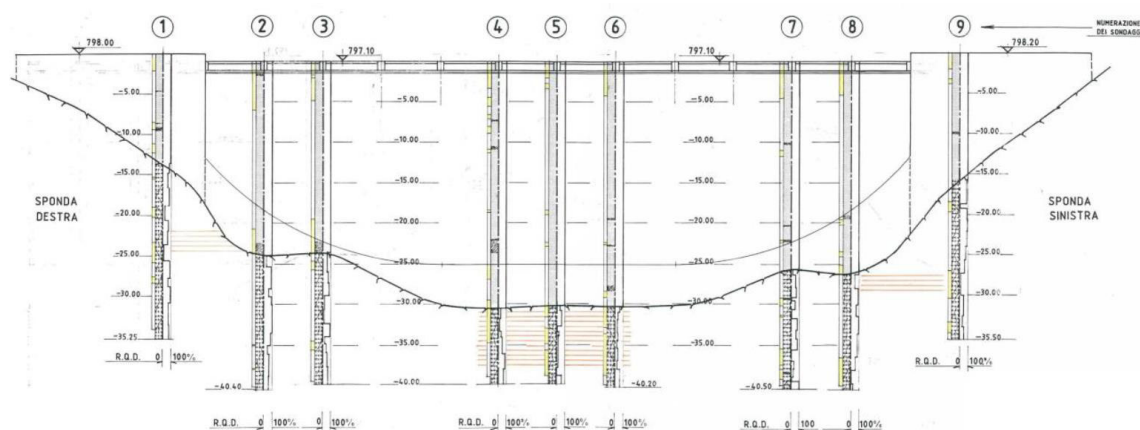


Figura 11: Sviluppo dei sondaggi della campagna indagini ISMES 1985-1986.

6.2.2 Prove dilatometriche

All'interno di n° 2 sondaggi geognostici S3 e S7 (ISMES ha restituito solamente i dati relativi alle prove eseguite nel sondaggio S3) sono state eseguite complessivamente n° 8 prove dilatometriche (n° 6 nel foro S3 e n° 2 nel foro S7), eseguite quasi esclusivamente all'interno di ammassi rocciosi da poco a mediamente alterati. Le prove previste all'interno delle porzioni di ammasso più alterate non hanno potuto essere eseguite per problemi di stabilità del foro o per eccessiva dimensione dello stesso che non consentiva l'accoppiamento della membrana del dilatometro alle pareti del foro nell'ambito della corsa utile dei trasduttori di spostamento.

I risultati delle indagini (doc. [7]), espressi come modulo di elasticità medio nelle tre direzioni di misura poste a 120° calcolato nell'intervallo di scarico 10.5÷4.5 MPa, sono riassunti nella seguente tabella:

Profondità [m]	Modulo Elastico E [MPa]
26.0	6560
27.3	11340
29.0	6700
32.0	8130
37.5	7740
38.8	5100

Tabella 3: Sintesi delle risultanze delle prove dilatometriche nel sondaggio S3 (da ISMES, 1986).

I risultati delle prove dilatometriche hanno restituito valori medi pari a circa 7'600 MPa, con un valore massimo di 11'340 MPa a -27.3 m dalla quota di bocca foro pari a 3.7 m di profondità sotto il piano di fondazione della diga in corrispondenza del sondaggio S3. Tali valori sono di molto inferiori a quelli ottenuti successivamente dalle prove di laboratorio sui campioni di roccia (valore medio prossimo a 36'000 MPa), confermando un certo stato di fratturazione dell'ammasso.

6.2.3 Indagini geofisiche

Le indagini hanno avuto lo scopo di effettuare una caratterizzazione con metodi geofisici del calcestruzzo e della roccia di fondazione della diga. Per lo svolgimento delle indagini sono state impiegate le seguenti tecniche di misura:

- misure di carotaggio sonico in tutti i fori di sondaggio;
- misure di cross-hole sonico tra le coppie di sondaggi contigui.

6.2.3.1 Rilievi di carotaggio sonico

La seguente figura mostra l'andamento delle velocità delle onde P con la profondità all'interno dei fori di carotaggio sonico.

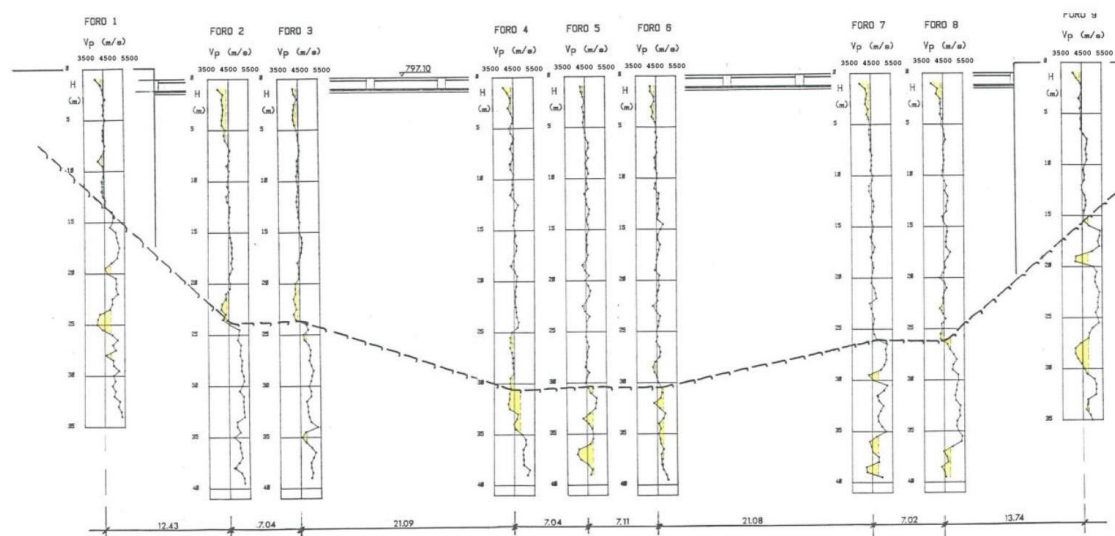


Figura 12: Diagrammi di velocità (ISMES, 1986).

Nella roccia di fondazione i carotaggi sonici hanno rilevato una notevole variabilità delle caratteristiche elastiche con valori che oscillano tra i 3'900 e i 5'400 m/s, indice di uno stato di fratturazione generalmente elevato.

ISMES pone un valore di V_P limite, al di sotto del quale, in base all'esperienza degli operatori, l'ammasso roccioso si presenta sicuramente molto fratturato (doc [6]); tale valore limite per la roccia è stato posto uguale a 4'800 m/s e lo scostamento in negativo da tale valore (evidenziato dal colore giallo nei diagrammi di velocità in **Figura 12**) è da considerarsi proporzionale al decadimento delle qualità fisico-meccaniche dell'ammasso roccioso.

6.2.3.2 Misure di cross-hole

I diagrammi delle rappresentazioni delle velocità soniche misurate tra foro e foro (cross-hole), concordano sostanzialmente con quelli relativi ai carotaggi sonici.

I valori di cross-hole mediamente inferiori restituiti dall'ammasso roccioso di fondazione, rispetto a quelli misurati con indagine di carotaggio sonico, vanno interpretati come un dato di condizione generale dell'ammasso. Infatti, se i dati di carotaggio sonico possono essere interpretati come dati a piccola scala delle condizioni dell'ammasso validi per un intorno breve dal foro di indagine, i dati di cross-hole generalmente rendono un quadro a scala più grande, mediamente caratterizzato da scadenti proprietà elastiche e meccaniche.

In particolare, i dati misurati tra i fori S4, S5 e S6 evidenziano una fascia di roccia piuttosto degradata caratterizzata da valori di V_P , mediamente inferiori a 4'500 m/s, alquanto bassi per una roccia granitica (v. **Figura 13**). Anche per le velocità misurate con indagine cross-hole è stato posto il valore limite, indice delle qualità elastiche, definito durante l'elaborazione dei dati misurati durante le indagini di carotaggio sonico per l'ammasso roccioso ($V_P = 4'800$ m/s).

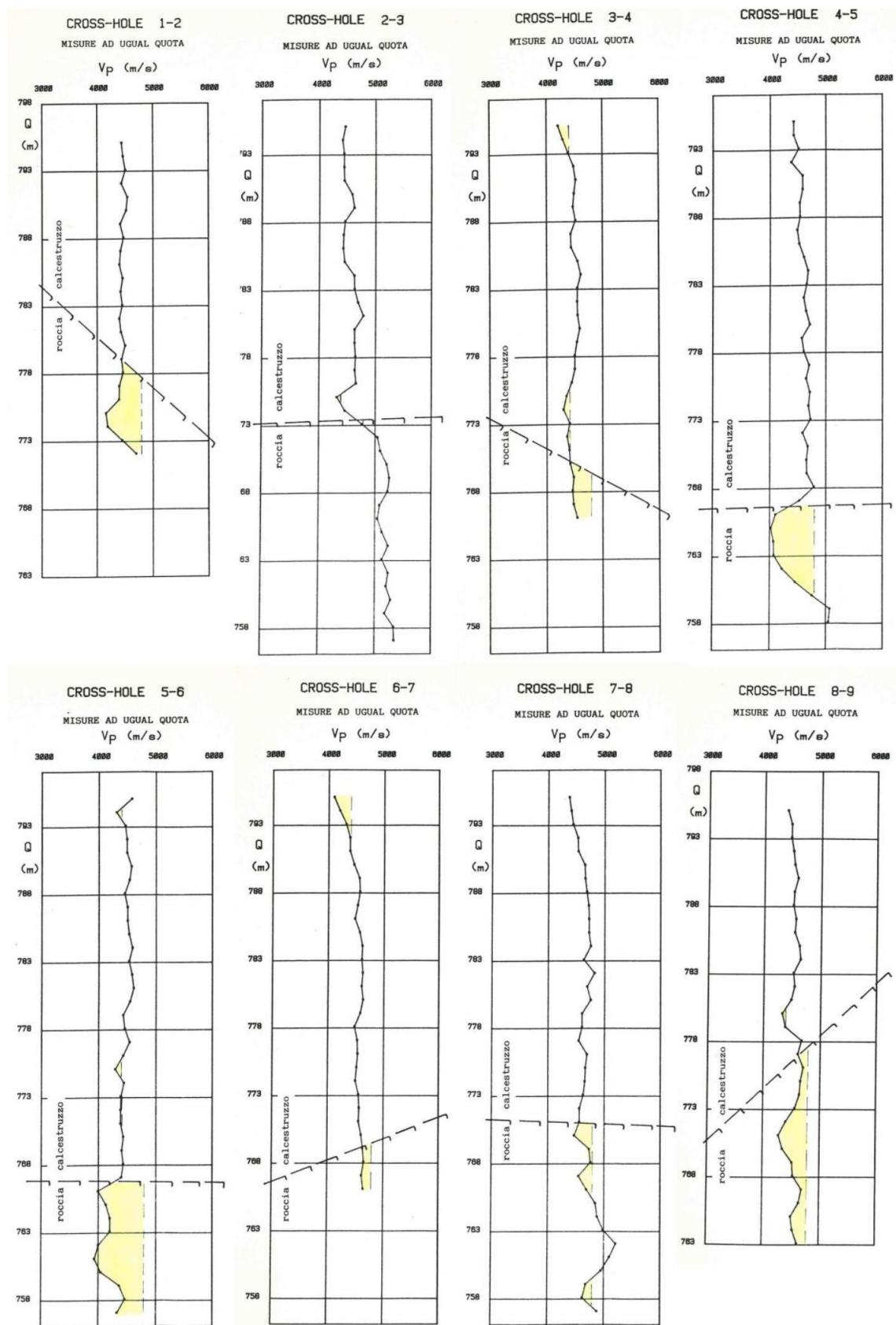


Figura 13: Diagrammi di velocità relativi alle misure con tecnica cross-hole (ISMES, 1986).

6.2.4 Prove di laboratorio

Dai sondaggi eseguiti, sono stati prelevati complessivamente n° 41 campioni, 29 di calcestruzzo della diga e 12 di roccia, sui quali sono state eseguite le seguenti indagini di laboratorio:

- n° 41 determinazioni della massa volumica apparente;
- n° 10 determinazioni della massa volumica reale (solo campioni di roccia);
- n° 41 determinazioni della velocità sonica post-essiccazione;
- n° 20 prove di permeabilità (solo per il calcestruzzo);
- n° 32 prove di compressione monoassiale in controllo di carico;
- n° 6 prove di trazione diretta (solo per il calcestruzzo).

La tabella seguente riporta i valori di tutte le prove di laboratorio effettuate sui campioni di roccia disponibili, una sintesi dei valori medi e la loro distribuzione statistica:

Sondaggio	Prof. (m)	Massa vol. app.	Massa vol. reale	Velocità sonica	Porosità	U.C.S.	Modulo elastico	Coeff. Poisson
		kN/mc	kN/mc	m/s	%	MPa	Mpa	-
2	32,90	25,99		3875		110,61	33.780,0	0,22
2	33,95	26,09	26,59	4260	2,00	102,29	38.280,0	0,23
3	26,30	25,69		3890		76,85	32.150,0	0,20
3	32,40	25,99	26,19	4360	0,70	129,63	46.400,0	0,24
5	32,40	25,60	26,29	3360	2,50	79,44	22.930,0	0,14
6	39,00	25,69	26,29	4040	2,10	71,15	30.900,0	0,29
7	34,35	25,99	26,29	4390	1,10	113,16	39.610,0	0,23
7	40,05	25,89	26,19	4200	1,20	123,17	39.770,0	0,27
8	30,10	25,99	26,29	4380	1,20	108,35	40.500,0	0,27
8	33,10	25,99	26,29	4250	1,20	106,34	38.550,0	0,26
9	22,80	26,09	26,29	4350	0,90	120,20	39.760,0	0,23
9	32,00	25,69	26,19	4080	1,70	57,19	28.080,0	0,21
media		25,89	26,29	4119,58	1,46	99,87	35.892,5	0,23
Dev. St		0,17	0,11	300,37	0,58	23,06	6.471,4	0,04
CV %		0,67	0,43	7,29	39,96	23,09	18,03	17,02

Tabella 4: Sintesi delle prove di laboratorio sui campioni di roccia (da ISMES, 1986).

Le prove di compressione su campioni di roccia non hanno subito gli iniziali cicli di carico ma sono stati portati direttamente a rottura, con le medesime modalità di prova seguite per il calcestruzzo. Il modulo elastico secante e il coefficiente di Poisson sono stati calcolati nell'intervallo di sollecitazione pari a 0 e $\sigma_c/2$ MPa (con σ_c pari al valore di resistenza ultima a compressione).

I valori del carico di rottura a compressione monoassiale variano tra 71.15 e 129.63 MPa e il modulo di deformabilità secante varia tra 22'930 e 46'400 MPa.

6.2.5 Considerazioni finali

In merito ai risultati acquisiti dalle indagini in sito, dalle prove di laboratorio e dalle successive elaborazioni effettuate, ISMES giunse alle seguenti conclusioni per la roccia di fondazione:

“I dati ricavati dalle indagini in sito e dalle prove di laboratorio confermano che la roccia di imposta della diga è interessata da un'intensa fratturazione, più accentuata verso l'asse vallivo e quindi verso il centro del piano di imposta. Al di sotto del piano di imposta della diga non è stata rilevata traccia dei trattamenti di cucitura e consolidamento eseguiti all'epoca della costruzione.”

Veniva comunque espresso un parere positivo rispetto al generale comportamento del complesso fondazione-diga.

6.3 Campagna indagini GEOTECNA 2010-2011

A2A, nel 2010, attuale gestore dell'impianto, ha richiesto a GEOTECNA Progetti una valutazione dello stato di invecchiamento della struttura muraria della diga di Orichella e un aggiornamento della caratterizzazione geomeccanica della roccia di imposta. A tal fine è stata predisposta una campagna indagini, articolata in due fasi, consistita in prove sia dirette che indirette, di seguito riassunte:

Per il calcestruzzo del corpo diga:

- n° 4 sondaggi a carotaggio continuo eseguiti dal coronamento della diga (3bis, 4bis, 6bis e 7bis);
- Esecuzione di log geomeccanici nei nuovi sondaggi 3bis, 4bis, 6bis e 7 bis;
- n° 12 sezioni tomografiche tra i fori di sondaggio (nei vecchi sondaggi ISMES del 1986), che hanno interessato anche la roccia di fondazione;
- n° 13 log sonici (nei vecchi sondaggi ISMES del 1986);
- n° 5 sondaggi a carotaggio continuo, inclinati verso lo zoccolo di fondazione (Si1, Si2, Si3, Si1bis e Si2bis), eseguiti dal piede di valle;
- n° 3 rilievi sismici tomografici tra i fori Si1, Si2, Si3 e il paramento di valle del corpo diga;
- Prove di laboratorio sui campioni prelevati dai fori di sondaggio.

Per la roccia di fondazione:

- n° 5 sondaggi a carotaggio continuo lungo il piede di valle dello sbarramento;
- Esecuzione di log geomeccanici sulle carote estratte dai nuovi sondaggi;
- n° 2 profili tomografici trasversali all'asse vallivo a valle dello sbarramento;
- Rilievi geomeccanici di dettaglio sugli affioramenti prossimi alla zona di imposta della diga.

L'ubicazione delle indagini integrative sopra elencate è mostrata nella figura seguente:

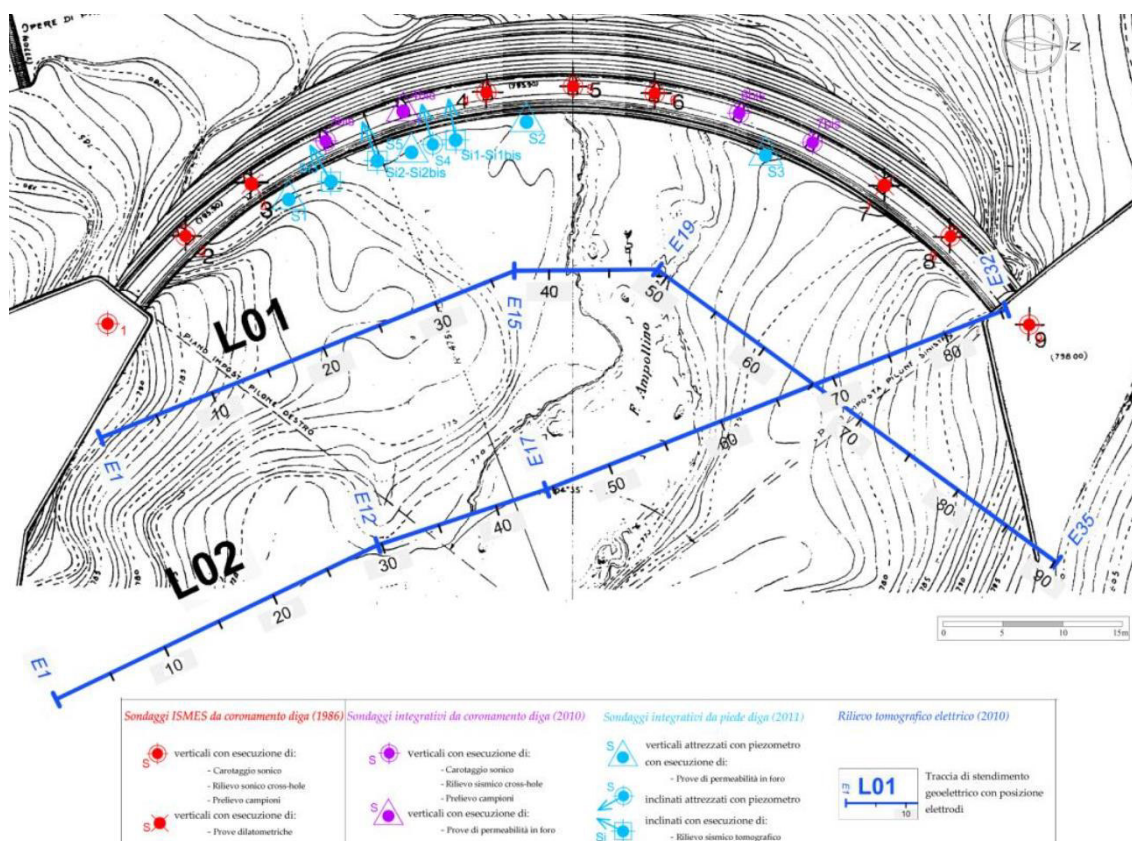


Figura 14: Ubicazioni indagini integrative (GEOTECNA, 2011).

In seguito, si riportano i risultati delle indagini effettuate sull'ammasso roccioso in fondazione della diga di Orichella.

6.3.1 Sondaggi geognostici

Una sintesi dei risultati dei sondaggi eseguiti è mostrata nella seguente tabella:

Sondaggio	Ubicazione	Quota (m s.m.)	Lunghezza (m)
S1	Piede di valle	773.8	13.00
S2	Piede di valle	772.1	21.85
S3	Piede di valle	772.6	25.00
S4	Piede di valle	772.6	12.00
S5	Piede di valle	772.1	20.00

Tabella 5: Sintesi delle risultanze dei sondaggi della campagna integrativa (GEOTECNA, 2011).

I valori di RQD (mostrati nelle seguenti tabelle), per il substrato lapideo, sono risultati mediamente pari al 57% nei sondaggi S1, S2 e S3. I sondaggi S4 e S5 hanno reso valori medi particolarmente elevati, rispettivamente di 70 e 80%.

S1				S2				S3			
Profondità [m]		Lunghezza carota [m]	RQD [%]	Profondità [m]		Lunghezza carota [m]	RQD [%]	Profondità [m]		Lunghezza carota [m]	RQD [%]
da	a			da	a			da	a		
0	1,5	1,5	16	0	1,5	1,5	16	0	1,5	1,5	17
1,5	2,5	1,0	41	1,5	2,5	1,0	63	1,5	2,5	1,0	70
2,5	3,5	1,0	42	2,5	3,5	1,0	49	2,5	3,5	1,0	0
3,5	4,2	0,7	28	3,5	4,5	1,0	100	3,5	4,5	1,0	41
4,2	5,2	1,0	68	4,5	5,5	1,0	68	4,5	5,5	1,0	63
5,2	6,2	1,0	62	5,5	6,5	1,0	86	5,5	6,5	1,0	71
6,2	7,2	1,0	29	6,5	7,5	1,0	12	6,5	7,5	1,0	78
7,2	8,2	1,0	56	7,5	8,5	1,0	12	7,5	8,5	1,0	53
8,2	9,2	1,0	71	8,5	9,5	1,0	0	8,5	9,5	1,0	56
9,2	10,2	1,0	73	9,5	10,5	1,0	53	9,5	10,5	1,0	32
10,2	11,2	1,0	100	10,5	11,5	1,0	62	10,5	11,5	1,0	45
11,2	12,0	0,8	46	11,5	12,5	1,0	60	11,5	12,5	1,0	51
12,0	13,0	1,0	67	12,5	13,5	1,0	14	12,5	13,5	1,0	29
				13,5	14,2	0,7	44	13,5	14,5	1,0	55
				14,2	15,1	0,9	22	14,5	15,6	1,1	75
				15,1	16,1	1,0	37	15,6	16,4	0,8	86
				16,1	17,1	1,0	56	16,4	17,2	0,8	31
				17,1	18,0	0,9	56	17,2	18,0	0,8	44
				18,0	18,8	0,8	95	18,0	19,0	1,0	22
				18,8	19,8	1,0	79	19,0	20,0	1,0	25
				19,8	20,5	0,7	100	20,0	21,0	1,0	89
				20,5	21,5	1,0	91	21,0	22,0	1,0	77
				21,5	21,9	0,4	100	22,0	23,0	1,0	94
								23,0	24,0	1,0	72
								24,0	25,0	1,0	98

S4				S5			
Profondità [m]		Lunghezza carota [m]	RQD [%]	Profondità [m]		Lunghezza carota [m]	RQD [%]
da	a			da	a		
0	2,7	2,7	7	0	2,0	2,0	7
2,7	3,5	0,8	98	2,0	3,0	1,0	98
3,5	4,5	1,0	99	3,0	4,0	1,0	88
4,5	5,5	1,0	98	4,0	4,7	0,7	88
5,5	6,5	1,0	100	4,7	5,1	0,4	92
6,5	7,5	1,0	86	5,1	5,7	0,6	80
7,5	7,9	0,4	74	5,7	6,7	1,0	87
7,9	8,5	0,6	0	6,7	7,5	0,8	86
8,5	9,5	1,0	54	7,5	8,5	1,0	86
9,5	10,2	0,7	66	8,5	9,5	1,0	68
10,2	11,2	1,0	81	9,5	10,3	0,8	82
11,2	12,0	0,8	33	10,3	11,3	1,0	71
				11,3	12,2	0,9	98
				12,2	13,0	0,8	95
				13,0	14,0	1,0	46
				14,0	15,0	1,0	67
				15,0	16,0	1,0	72
				16,0	17,0	1,0	85
				17,0	18,0	1,0	69
				18,0	19,0	1,0	84
				19,0	20,0	1,0	91

Tabella 6: Sintesi delle risultanze dei valori di RQD (GEOTECNA, 2011).

6.3.2 Indagini geofisiche

Le indagini hanno avuto lo scopo di effettuare una caratterizzazione con metodi geofisici della roccia di fondazione della diga.

I valori di velocità delle onde P (V_P), rilevate con tomografia sismica cross-hole (**Figura 15**), sono risultati piuttosto elevati (valori medi superiori a 4'000 m/s), indice di un substrato roccioso comunque

competente. Localmente, soprattutto nella parte centrale della zona di imposta della diga, la distribuzione dei valori di velocità risulta più eterogenea probabilmente a causa di una maggior fratturazione del substrato.

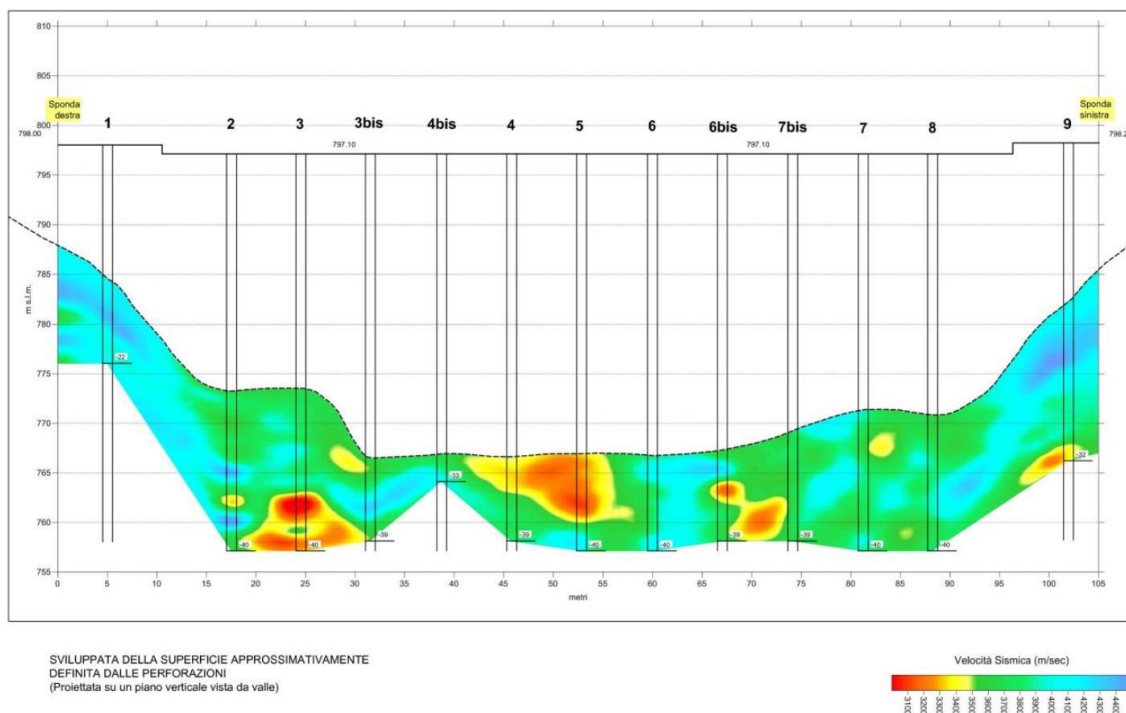


Figura 15: Tomografia sismica ammasso roccioso di fondazione (GEOTECNA, 2011).

6.3.3 Tomografia elettrica

Per una più dettagliata indagine del substrato nell'area di imposta della diga sono stati eseguiti due stendimenti "geolettrici" (L01 e L02, la cui ubicazione è mostrata in **Figura 14**). I risultati ottenuti da tale indagine (**Figura 16** e **Figura 17**) mostrano valori di resistività elevati, in accordo con la presenza di roccia granitica mediamente compatta. Analogamente a quanto riscontrato con le indagini di tipo geofisico, vengono evidenziati settori dove il substrato è più compatto (zone con resistività più elevata) e settori in cui il substrato si presenta molto fratturato e con probabile presenza di acqua (caratterizzati da una sensibile riduzione dei valori di resistività) localizzati al centro della valle.

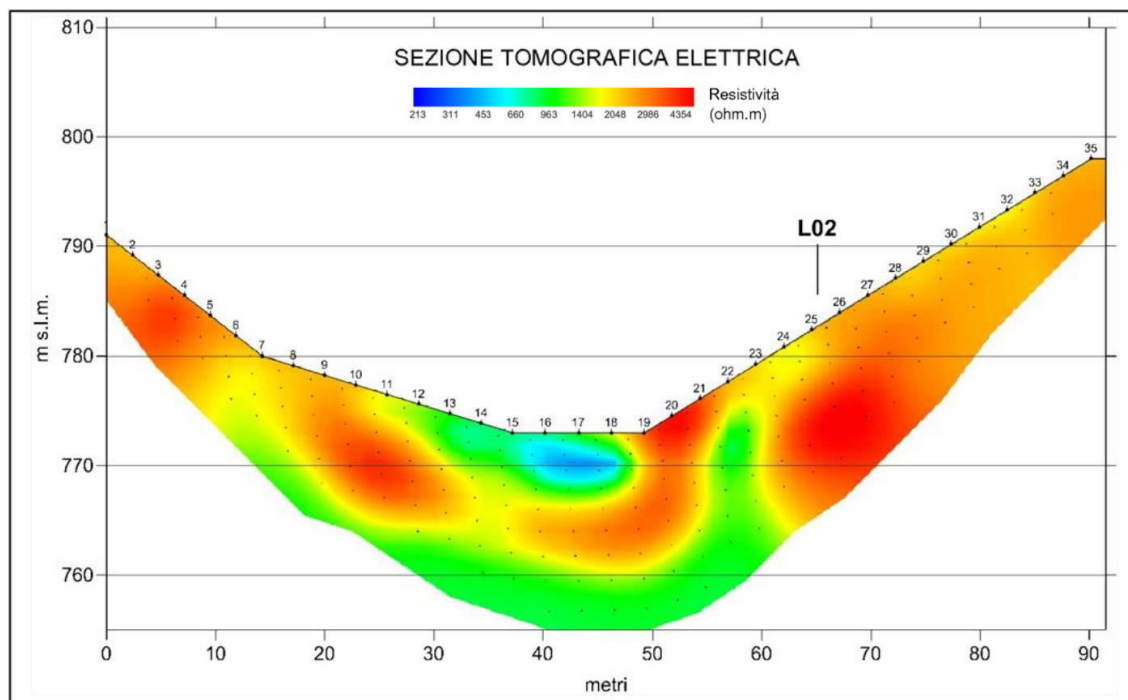


Figura 16: Tomografia elettrica della zona di imposta della diga – Linea L01 (GEOTECNA, 2011).

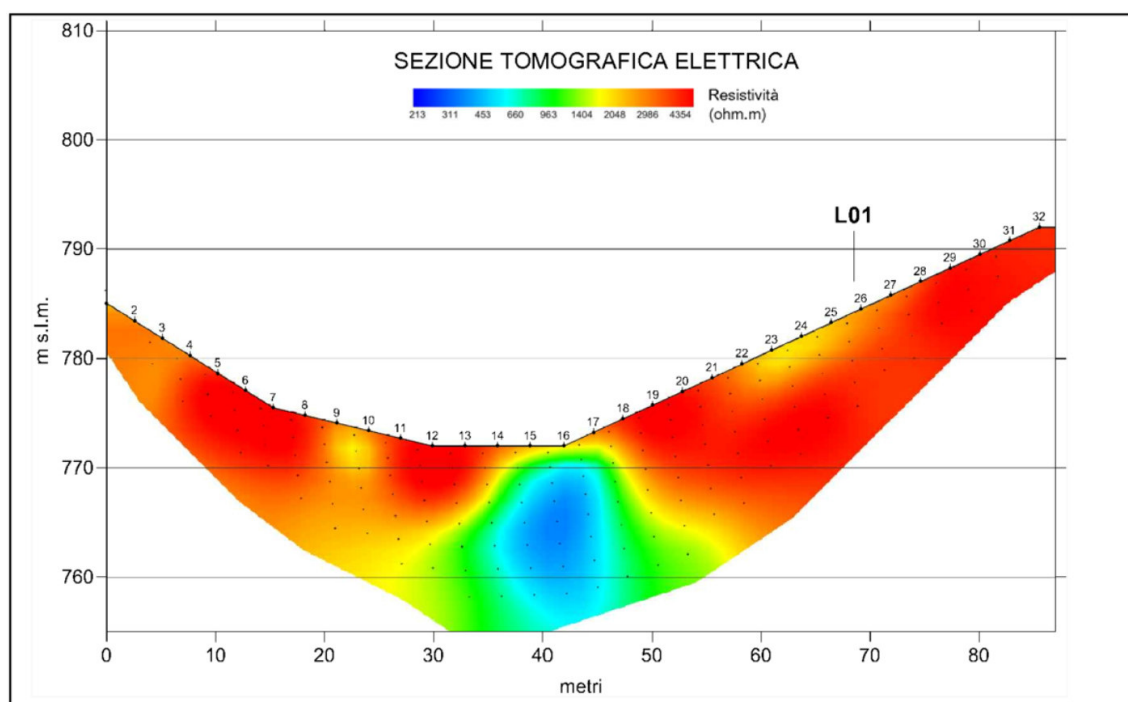


Figura 17: Tomografia elettrica della zona di imposta della diga – Linea L02 (GEOTECNA, 2011).

6.3.4 Caratterizzazione geomeccanica

La caratterizzazione geostrutturale dell'ammasso roccioso è stata finalizzata alla valutazione dei principali parametri geometrici e fisici che caratterizzano le discontinuità presenti nell'ammasso roccioso.

Data la riscontrata presenza, nell'area di studio, di zone intensamente fratturate, l'ammasso roccioso analizzato è stato suddiviso in due zone caratterizzate da parametri diversi:

- ammasso indisturbato
- ammasso tettonizzato

La localizzazione delle zone di tettonizzazione, caratterizzate da andamento subverticale e spessori, mediamente modesti, variabili da un minimo di 0.2÷0.5 m ad un massimo di circa di 1.5÷2.0 m è mostrata nella sezione di seguito riportata ricostruita sulla base di risultati delle indagini condotte.

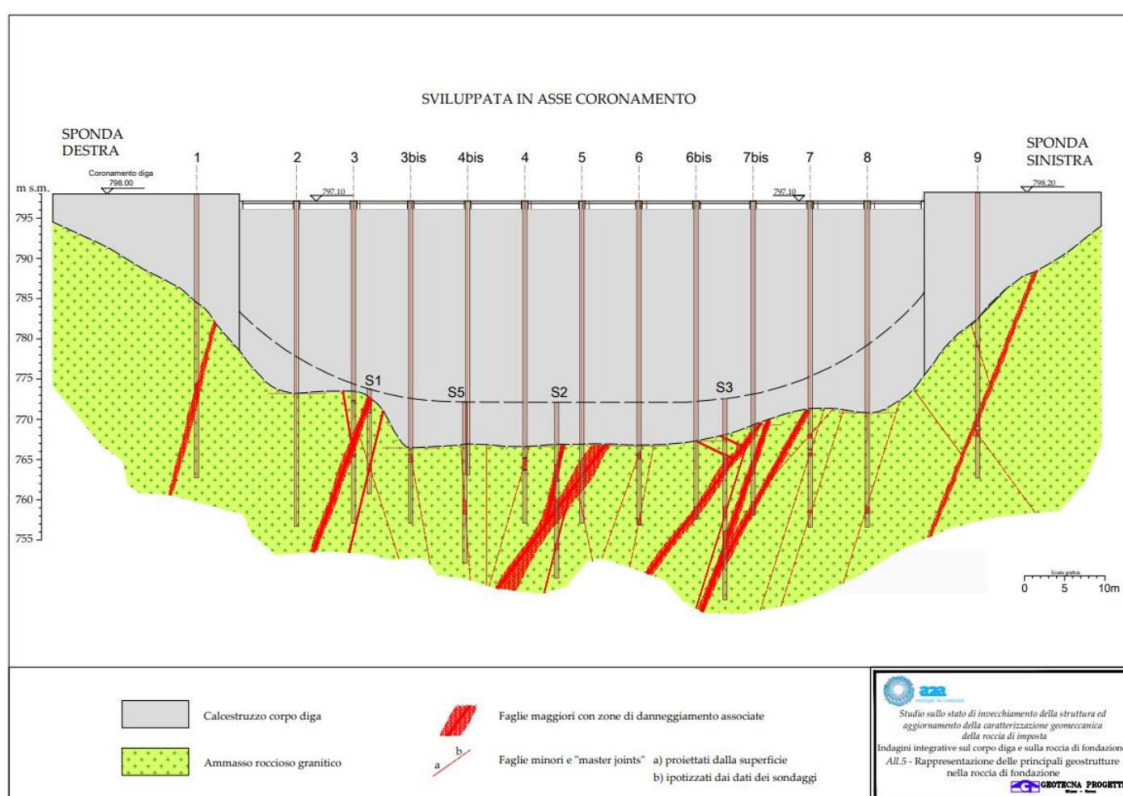


Figura 18: Sezione geostrutturale in asse diga (GEOTECNA, 2011).

6.3.4.1 Ammasso indisturbato

Partendo dai dati di terreno è stata effettuata una modellazione probabilistica con metodo Monte Carlo; i valori attribuiti ai parametri sono riassunti di seguito:

- Densità di fratturazione **J_v**

Media	Mediana	Moda	Dev. St.
25.5	21.7	13.9	17.1

Tabella 7: Densità di fratturazione J_v (GEOTECNA, 2011).

Occorre puntualizzare che tale parametro è stato valutato per l'ammasso indisturbato. Seguendo la classificazione proposta da Palmström (1982-2005), i valori medi della distribuzione di J_v sono indicativi di un ammasso con grado di fratturazione "mediamente elevato" ($J_v = 10\div30$).

– Fattore e forma dei blocchi β

Media	Mediana	Moda	Dev. St.
39.5	37.0	31.5	10.1

Tabella 8: Fattore e forma dei blocchi β (GEOTECNA, 2011).

Secondo quanto proposto da Palmström (1995), valori di β compresi tra 27 e 100 sono riconducibili a blocchi di forma pseudo-cubica o prismatica mediamente allungata.

– Dimensione dei blocchi V_b

Secondo Palmström (1995), il volume medio dei blocchi viene stimato secondo la semplice relazione:

$$V_b = \beta \cdot J_v^{-3} \text{ [m}^3\text{]}$$

– Caratteristiche fisiche delle discontinuità J_c

Le caratteristiche di forma, scabrezza, alterazione e riempimento delle superfici di discontinuità sono esprimibili, ai fini della caratterizzazione geomeccanica, mediante il fattore di qualità J_c .

Secondo Cai et Al (2004), ripreso da Barton et Al (1974) e Palmström (1995), detto fattore viene definito secondo la semplice relazione:

$$J_c = \frac{J_w \cdot J_s}{J_A}$$

dove:

J_w indice numerico indicativo dell'ondulazione delle superfici a scala metrica o superiore;

J_s indice numerico espressione della rugosità a scala decimetrica;

J_A indice delle condizioni di alterazione e riempimento delle discontinuità.

Tali indici sono ricavabili direttamente sul terreno tramite tabelle comparative. Le figure seguenti mostrano le frequenze relative dei suddetti indici ricavati dai dati di terreno elaborati statisticamente:

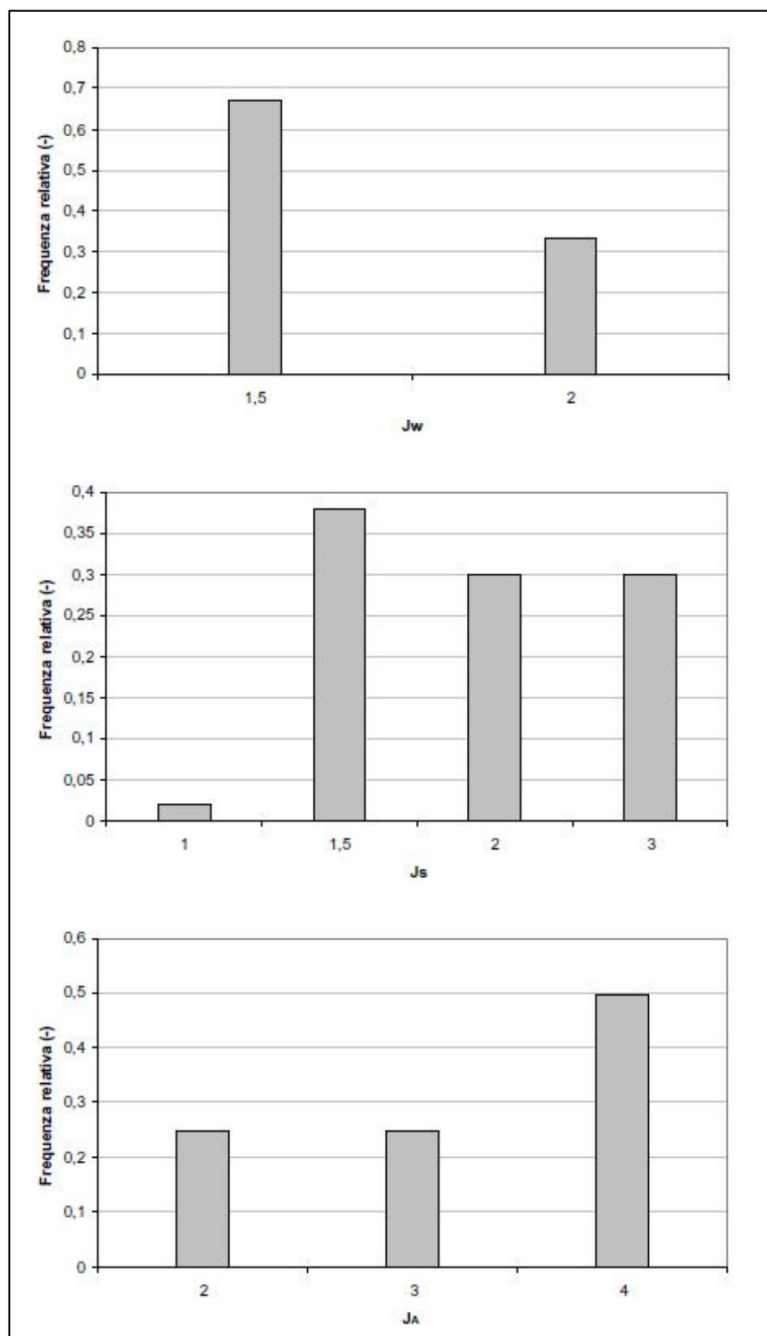


Figura 19: Distribuzione di frequenza dei parametri J_w , J_s e J_A (GEOTECNA, 2011).

Durante le operazioni di rilievo geomeccanico, inoltre, sono stati individuati quattro sistemi principali di fratture, i cui parametri giacitureali medi sono riassunti nella seguente tabella:

SET principali	Immersione N [°]	Inclinazione [°]
1	037	90
2	307	88
3	193	43
4	145	42

Tabella 9: Sintesi delle giaciture medie (GEOTECNA, 2011).

- Valutazione probabilistica dell'indice **GSI** dell'ammasso

Per meglio stimare l'indice GSI è stata effettuata una simulazione probabilistica, tramite metodo Monte Carlo, partendo dai valori di J_c precedentemente analizzati, tramite la procedura proposta da Cai et Al (2004). I risultati dell'elaborazione statistica sono riassunti nella seguente tabella:

Media	Mediana	Moda	Dev. St.	10° percentile	90° percentile
43.9	43.4	42.3	7.1	35.3	53.2

Tabella 10: Valori statistici di GSI (GEOTECNA, 2011).

- Stima dei parametri di deformabilità della roccia di fondazione

Per la valutazione del modulo di deformazione E_m sono state utilizzate sia le relazioni suggerite da Hoek et Al (2002) sia le più recenti formulazioni proposte da Hoek e Diederichs (2006).

Per tali simulazioni è stato considerato un valore di resistenza a compressione monoassiale σ_{ci} pari a 100 MPa (dalle prove di laboratorio ISMES, 1986 -**Tabella 4**), e un valore del Rapporto di Modulo MR ($E_i = MR\sigma_{ci}$) pari a 367.5; il modulo elastico E_i , utile per valutare il modulo di deformazione E_m secondo Hoek e Diederichs (2006), è stato, quindi, valutato pari a 36'750 MPa. Nella valutazione è stato trascurato il parametro correttivo D (disturbance Factor), ponendolo pari a 0. I moduli di deformabilità dell'ammasso roccioso "indisturbato" sono riepilogati nella tabella seguente:

GSI	H. & Al (2002) [MPa]	H. & D. semplificato (2006) [MPa]	H. & D. (2006) [MPa]
35.3 (10° percent)	4290.4	2636.3	4253.5
43.9 (medio)	7038.8	5586.8	7640.7
53.2 (90° percent)	12022.6	12112.5	13604.7

Tabella 11: Moduli E_d stimati per l'ammasso "indisturbato" (GEOTECNA, 2011).

Tali valori sono sostanzialmente in accordo con quanto misurato da ISMES nella campagna indagini del 1986 tramite prove dilatometriche puntuali (7'600 MPa).

6.3.4.2 Ammasso tettonizzato

Sia le anomalie riscontrate nelle velocità sismiche sia le osservazioni fatte durante i rilievi geostrutturali in situ hanno permesso di riconoscere delle zone ad elevato disturbo tettonico, caratterizzate da un netto abbassamento delle qualità fisico-meccaniche dell'ammasso roccioso. Sulla base delle osservazioni effettuate sono stati stimati, per la zona in esame, i seguenti valori medi per i parametri considerati:

- $J_c < 0.25$
- $GSI = 27$
- $\sigma_{ci} = 50 \text{ MPa}$

– MR = 367.5

I valori dei moduli di deformabilità risultanti per l'ammasso "tettonizzato" sono riepilogati nella seguente tabella:

GSI	H. & AI (2002) [MPa]	H. & D. semplificato (2006) [MPa]	H. & D. (2006) [MPa]
27	1881.4	1257.2	1239.0

Tabella 12: Moduli E_d stimati per l'ammasso "tettonizzato" (GEOTECNA, 2011).

6.3.5 Considerazioni finali

Analogamente a quanto riscontrato circa 25 anni prima, tenendo in debita considerazione l'evoluzione sia delle attrezzature di indagine, sia i mezzi per la loro interpretazione, i dati raccolti durante la campagna indagini 2010-2011 portano ad escludere la presenza di ampie zone deteriorate che possano compromettere la funzionalità della diga di Orichella.

L'ammasso roccioso di imposta risulta ovunque caratterizzato da una diffusa fratturazione di grado medio-elevato, ma privo di importanti processi di alterazione. Le modeste perdite d'acqua, comunque registrate da anni con portate pressoché costanti, presenti nella zona dello zoccolo e, forse, anche al di sotto del piano di fondazione indicano una non perfetta tenuta del sistema struttura-roccia di fondazione.

6.4 Campagna indagini TERRACH 2021

Nel mese di ottobre del 2021 è stata condotta una campagna di indagini geognostiche integrative che ha comportato l'esecuzione di due sondaggi geognostici a carotaggio continuo di lunghezza pari a 55 m perforati in corrispondenza delle spalle del corpo diga nelle posizioni mostrate nella seguente immagine.



Figura 20: Ubicazione sondaggi integrativi 2021.

Le due perforazioni sono state condotte con inclinazione di 40° e 30° rispettivamente e in corso di perforazione sono state condotte le indagini in foro di seguito riassunte:

- n° 8 prove di permeabilità Lugeon (4 per ciascun foro) eseguite nel corpo diga, al passaggio corpo diga / ammasso roccioso di fondazione e nell'ammasso roccioso di fondazione
- n° 4 prove dilatometriche (2 per ciascun foro) eseguite all'interno dell'ammasso roccioso di fondazione;
- rilievo con sonda televisiva da foro OPTV con analisi geostrutturale.

6.4.1 Sondaggi geognostici

Le perforazioni di sondaggio hanno attraversato ammassi rocciosi di natura granitica a grana media con struttura da massiva ad olocristallina, localmente a grana grossolana da poco a mediamente fratturato ed alterazione da assente a media in corrispondenza dei piani di fratturazione. Si segnala che nella perforazione S1 eseguita in corrispondenza della spalla destra si è riscontrata la perdita parziale del fluido di perforazione, più rilevante a partire da 47.5 m da testa foro.

I valori di RQD rilevati in corso di perforazione sono sintetizzati nelle seguenti tabelle.

Sondaggio S1			Sondaggio S2		
Profondità		RQD	Profondità		RQD
da	a	[%]	da	a	[%]
41,00	42,75	62	31,45	32,30	16
42,75	44,40	82	32,30	33,80	69
44,40	45,00	30	33,80	35,00	10
45,00	45,95	89	35,00	35,40	15
45,95	47,75	97	35,40	36,90	7
47,45	48,00	99	36,90	38,20	61
48,00	49,60	84	38,20	39,80	84
49,60	51,25	44	39,80	40,00	80
51,25	52,85	73	40,00	41,40	80
52,85	54,45	94	41,40	42,95	86
54,45	55,00	43	42,95	44,65	65
			44,65	45,00	65
			45,00	45,70	90
			45,70	47,25	72
			47,25	48,60	25
			48,60	50,00	66
			50,00	50,20	66
			50,20	51,80	59
			51,80	53,30	56
			53,30	55,00	65

Tabella 13: Sondaggi 2021 - RDQ.

6.4.2 Prove Lugeon

I risultati delle prove Lugeon condotte all'interno delle perforazioni di sondaggio, unitamente ad indicazioni sul regime di flusso deducibile dall'andamento dei valori di assorbimento registrati nel corso delle prove è di seguito riassunto.

Sondaggio S1					
Profondità		Permeabilità			
da	a	U.L.	m/s	regime di flusso	litologia
22,10	28,10	7,0	6,2E-07	laminare	cls
39,25	42,75	3,5	2,9E-07	laminare	contatto cls/roccia
44,00	48,20	1,2	1,0E-07	intasamento fratture	ammasso roccioso
50,00	55,00	2,5	2,3E-07	turbolento	ammasso roccioso

Tabella 14: Sondaggio S1/2021 – Prove Lugeon.

Sondaggio S2					
Profondità		Permeabilità			
da	a	U.L.	m/s	regime di flusso	litologia
22,00	27,70	12,9	1,1E-06	dilavamento	cls
30,60	32,20	7,5	4,9E-07	dilavamento	contatto cls/roccia
44,80	48,60	9,2	7,7E-07	turbolento	ammasso roccioso
53,00	55,00	12,3	8,9E-07	turbolento	ammasso roccioso

Tabella 15: Sondaggio S2/2021 – Prove Lugeon.











Behaviour	Lugeon Pattern	Flow vs. Pressure Pattern	Representative Lugeon Value
Laminar Flow			Average of Lugeon values for all steps
Turbulent Flow			Lugeon value corresponding to the highest water pressure (3rd step)
Dilation			Lowest Lugeon value recorded, corresponding either to low or medium water pressures (1st, 2nd, 4th, 5th step)
Wash-out			Highest Lugeon value recorded (5th step)
Void Filling			Final Lugeon value (5th step)

Figura 21: Regimi di flusso in prova Lugeon.

Nel complesso le prove condotte evidenziano valori di conducibilità idraulica più elevati in corrispondenza della spalla sinistra.

6.4.3 Prove dilatometriche

I risultati delle indagini condotte, espressi come modulo di elasticità medio nelle tre direzioni di misura poste a 120° calcolato nell'intervallo di scarico del secondo ciclo di carico, sono riassunti nella seguente tabella:

Prova	Profondità [m]	Modulo Elastico E [MPa]
S1-D1	43.0	18259
S1-D2	49.0	12566
S2-D1	36.5	13008
S2-D2	42.0	20460

Tabella 16: Sondaggi 2021 - Sintesi delle risultanze delle prove dilatometriche.

I risultati delle prove dilatometriche hanno restituito un valore medio pari a circa 16'000 MPa, con un valore massimo di 20'460 MPa. Tali valori sono risultati sensibilmente superiori ai valori registrati nel corso della campagna di indagini del 1986 che avevano restituito un valore medio pari a circa 7'600 MPa, con un valore massimo di 11'340 Mpa.

6.4.4 Rilievo con sonda televisiva ed analisi geostrutturale

In corrispondenza dei tratti perforati all'interno dell'ammasso roccioso di fondazione sono stati condotti rilievi con sonda televisiva da foro i cui risultati sono di seguito riassunti. Nel sondaggio S1 la

distribuzione dei poli evidenzia due principali concentrazioni con orientazione mediamente pari a 166/15 e 105/78 rispettivamente. I valori di RQD calcolati sulla base della frequenza di fratturazione risultano mediamente compresi tra 60 e 100, con l'eccezione del tratto tra 41 e 42 m da testa foro in cui si registrano valori di circa 35.

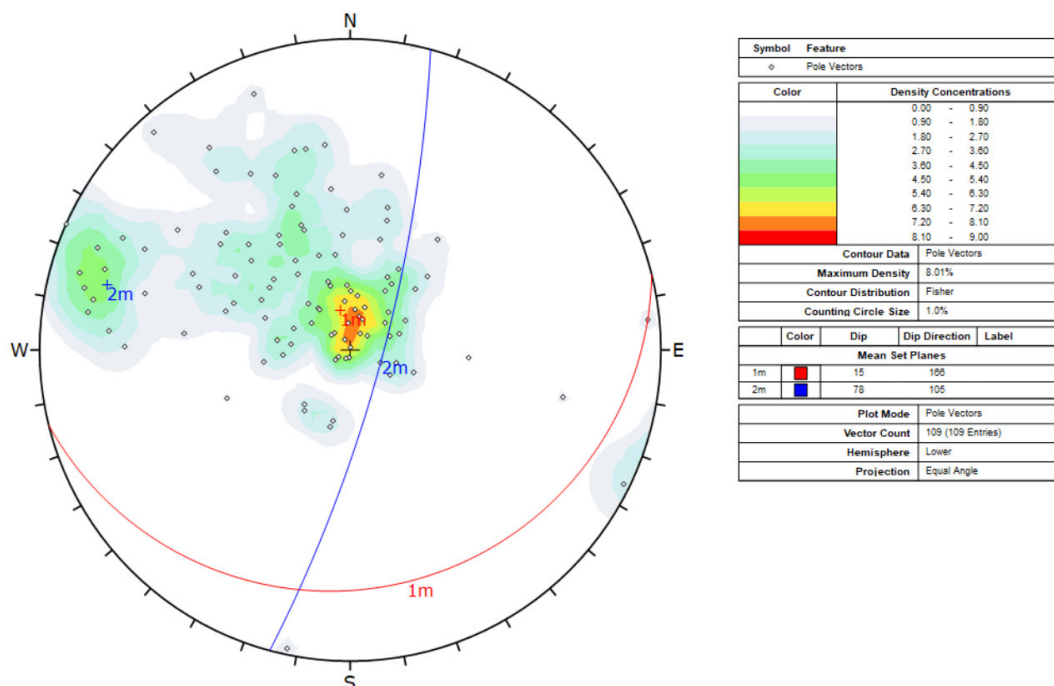


Figura 22: Analisi stereografica sondaggio S1/2021.

Nel sondaggio S2 la distribuzione dei poli evidenzia quattro principali concentrazioni con orientazione mediamente pari a 172/37, 110/28, 225/82 e 19/79 rispettivamente. I valori di RQD calcolati sulla base della frequenza di fratturazione risultano mediamente compresi tra 60 e 100, con locali riduzioni a valori compresi tra 45 e 55 nei tratti 34-35 e 52-53 m da testa foro.

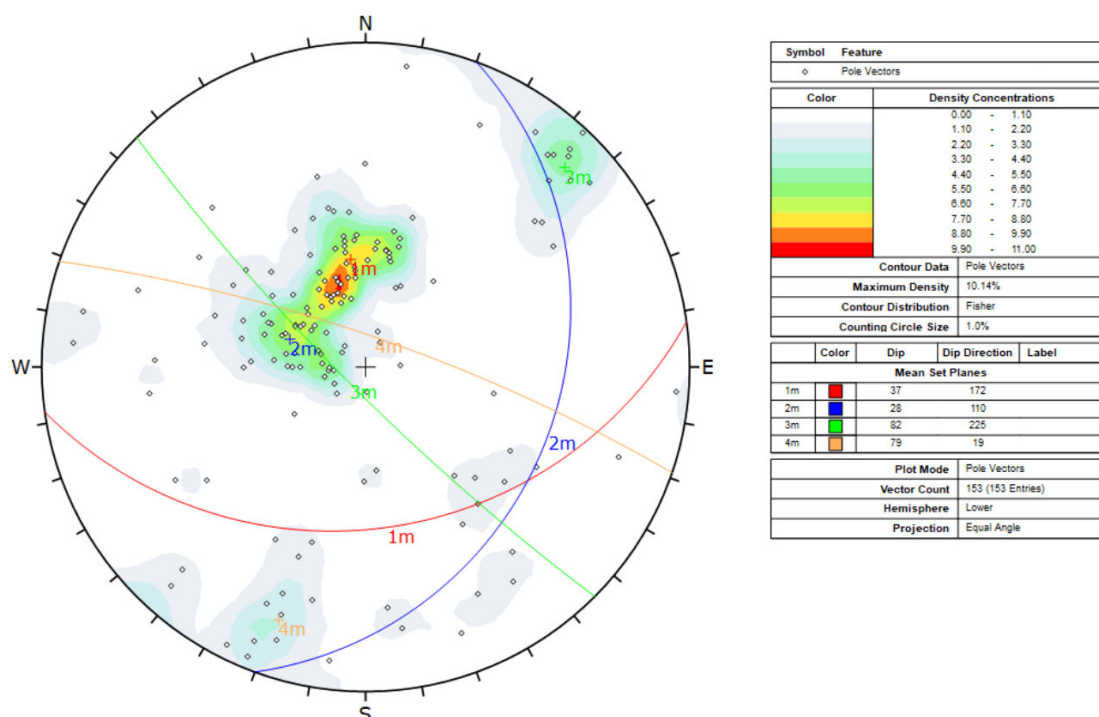


Figura 23: Analisi stereografica sondaggio S2/2021.

6.4.5 Prove di laboratorio

Su alcuni spezzoni di carota lapidea prelevati nel corso della perforazione dei sondaggi geognostici sono state condotte prove geomeccaniche di laboratorio comprendenti:

- misure di velocità di propagazione delle onde di compressione V_P ;
- determinazioni del peso di volume naturale;
- determinazioni della resistenza a compressione monoassiale con rilievo delle deformazioni assiali e diametrali e valutazione dei parametri di deformabilità;
- prove di resistenza alla compressione triassiale con rilievo delle deformazioni assiali e diametrali e valutazione dei parametri di deformabilità.

I risultati delle prove condotte sono riassunti nelle seguenti tabelle.

Sondaggio	Campione	Profondità [m]	S1						
			22	24	25	25	25	26	28
			42,04-42,20	43,04-43,20	46,52-46,68	46,68-46,84	46,84-47,00	48,44-48,60	53,84-54,00
Peso di volume naturale	γ_n	[kNm ³]	25,79	26,04	26,11	25,92	25,80	25,75	25,89
Velocità onde P	V_P	[m/s]	3547	4134	3674	3847	3158	3648	3487
Resistenza a compressione monoassiale	C_0	[MPa]	25,8	55,4	-	-	-	78,6	88,2
Modulo di elasticità tangente	E_{S0}	[GPa]	32,07	32,14	50,05	45,52	46,24	35,04	43,05
Modulo di elasticità secante	E_{S0}	[GPa]	24,83	18,36	40,66	41,24	39,61	14,01	26,21
Rapporto di Poisson	μ	[-]	0,17	0,13	0,39	0,17	0,37	0,31	0,04
Resistenza a compressione triassiale	σ_3	[MPa]	-	-	2,0	5,0	8,0	-	-
	$\sigma_1 - \sigma_3$	[MPa]	-	-	120,9	125,6	136,5	-	-

Tabella 17: Sondaggi 2021 - Sondaggio S1/2021 - Sintesi delle risultanze delle prove di laboratorio.

Sondaggio	Campione	Profondità [m]	S2									
			20 32,40-32,70	21 33,25-33,41	23 38,20-38,36	24 40,03-40,19	24 40,19-40,35	25 42,78-42,94	26 44,02-44,18	27 46,25-46,50	28 48,65-48,81	29 53,50-53,60
Peso di volume naturale	γ_n	[kN/m ³]	25,79	25,06	25,92	26,05	26,15	26,16	26,10	25,72	25,87	25,72
Velocità onde P	V_p	[m/s]	3546	3155	3443	3739	3730	3964	3937	3600	3515	2205
Resistenza a compressione monoassiale	C_0	[MPa]	-	3,2	38,5	-	-	-	71,80	-	50,20	-
Modulo di elasticità tangente	$E_{t,50}$	[GPa]	-	3,7	12,50	44,57	45,40	49,08	38,35	-	25,38	-
Modulo di elasticità secante	$E_{s,50}$	[GPa]	-	3,631	15,10	41,93	43,27	48,72	30,57	-	11,78	-
Rapporto di Poisson	μ	[-]	-	-	-	0,22	0,38	0,51	0,39	-	0,17	-
Resistenza a compressione triassiale	σ_3	[MPa]	-	-	-	2,0	5,0	8,0	-	-	-	-
	$\sigma_1 - \sigma_3$	[MPa]	-	-	-	106,0	137,3	153,8	-	-	-	-

Tabella 18: Sondaggi 2021 - Sondaggio S2/2021 - Sintesi delle risultanze delle prove di laboratorio.

Nel complesso le prove condotte hanno restituito i seguenti valori medi e di deviazione standard delle diverse grandezze misurate, definiti con esclusione dei risultati relativi al campione S2-21 in cui la rottura nella prova di compressione monoassiale è avvenuta in corrispondenza di un piano di frattura preesistente restituendo valori anormalmente bassi:

- Peso di volume naturale (γ_n): 25.92 ± 0.16 kN/m³
- Velocità onde P (V_p): $3'573 \pm 433$ m/s
- Resistenza a compressione monoassiale (C_0): 58.36 ± 22.40 MPa
- Modulo di elasticità tangenziale ($E_{t,50}$): 31.22 ± 9.93 GPa
- Modulo di elasticità secante ($E_{s,50}$): 20.12 ± 7.11 GPa

Si osserva che i valori di resistenza a compressione monoassiale ottenuti sono risultati sensibilmente inferiori ai valori ottenuti nella campagna ISMES 1986 che aveva fornito un valore medio pari a 99.75 MPa con deviazione standard pari a 23.12 MPa; i valori di modulo di elasticità misurati nelle due campagne di indagine sono risultati invece paragonabili, avendo registrato nella campagna Ismes 1986 un valore medio di 35.89 GPa con deviazione standard di 6.47 GPa.

La marcata differenza tra i valori di resistenza a compressione monoassiale determinati nelle due campagne di indagine è verosimilmente da mettere in relazione alla diversa direzione di campionamento e di carico.

L'interpretazione secondo il criterio di rottura di Hoek & Brown delle coppie di valori σ_1 - σ_3 misurati nelle prove triassiali e dei valori medi di resistenza a compressione monoassiale misurati nei due sondaggi ha consentito di ottenere l'involuppo di rottura triassiale di seguito mostrato.

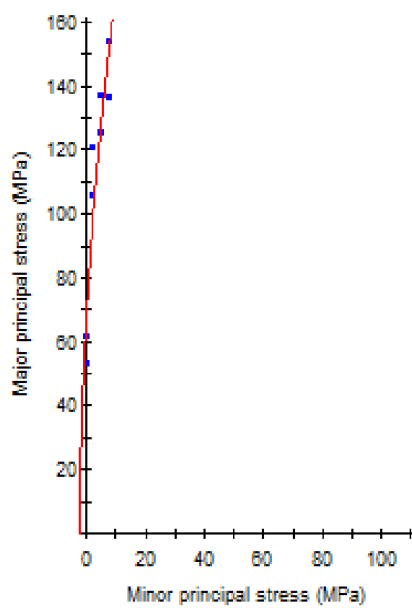


Figura 24: Involuppo di rottura triassiale sondaggi 2021.

I parametri dell'involuppo di rottura triassiale ottenuti sono di seguito sintetizzati:

- m_i : 30.99
- σ_c : 67.94 MPa
- σ_t : 2.19 MPa

7. CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA

7.1 Premessa

Relativamente alla caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso roccioso sono stati assunti gli esiti dell'analisi sviluppata da CESI nel 2022 e descritta nel documento [27], dove i risultati delle precedenti campagne di indagine ISMES 1986 e GEOTECNA 2011 sono stati integrati con gli esiti della campagna di indagini geognostiche integrative TERRACH 2021 e con le risultanze dei rilievi geomeccanici condotte da CESI (2014 e 2021), sia con tecniche tradizionali su affioramento che mediante rilievo laser-scanner (CESI 2021) e successiva analisi geostrutturale-geomeccanica.

7.2 Rilievo geomeccanico CESI maggio 2014

Nel corso de rilievo geomeccanico, condotto in accordo alle raccomandazioni ISRM ("Quantitative description of discontinuities in rock masses", 1978) lungo stese di rilievo areali, sono stati rilevati i seguenti parametri:

- giacitura (immersione/inclinazione)
- spaziatura
- tipo di terminazione
- persistenza lineare
- apertura
- alterazione delle superfici, espressa a mezzo del termine Ja di Barton e secondo le classi ISRM ($w_2 \div w_5$)
- rugosità a piccola scala, espressa attraverso il parametro JRC valutato a mezzo profilografo, ed il parametro Jr di Barton
- presenza, tipo e spessore del riempimento

L'ubicazione dell'area di rilievo è mostrata nella figura seguente:

Ad integrazione dei dati relativi alle discontinuità sono stati rilevati i seguenti parametri geomeccanici relativi all'ammasso roccioso:

- intercetta delle discontinuità
- numero di discontinuità per metro cubo d'ammasso J_v
- grado di alterazione dell'ammasso roccioso
- condizioni di umidità dell'ammasso roccioso
- stima del GSI

7.3 Rilievo geomeccanico CESI novembre 2021

L'ubicazione delle aree di rilievo è mostrata nella figura seguente:

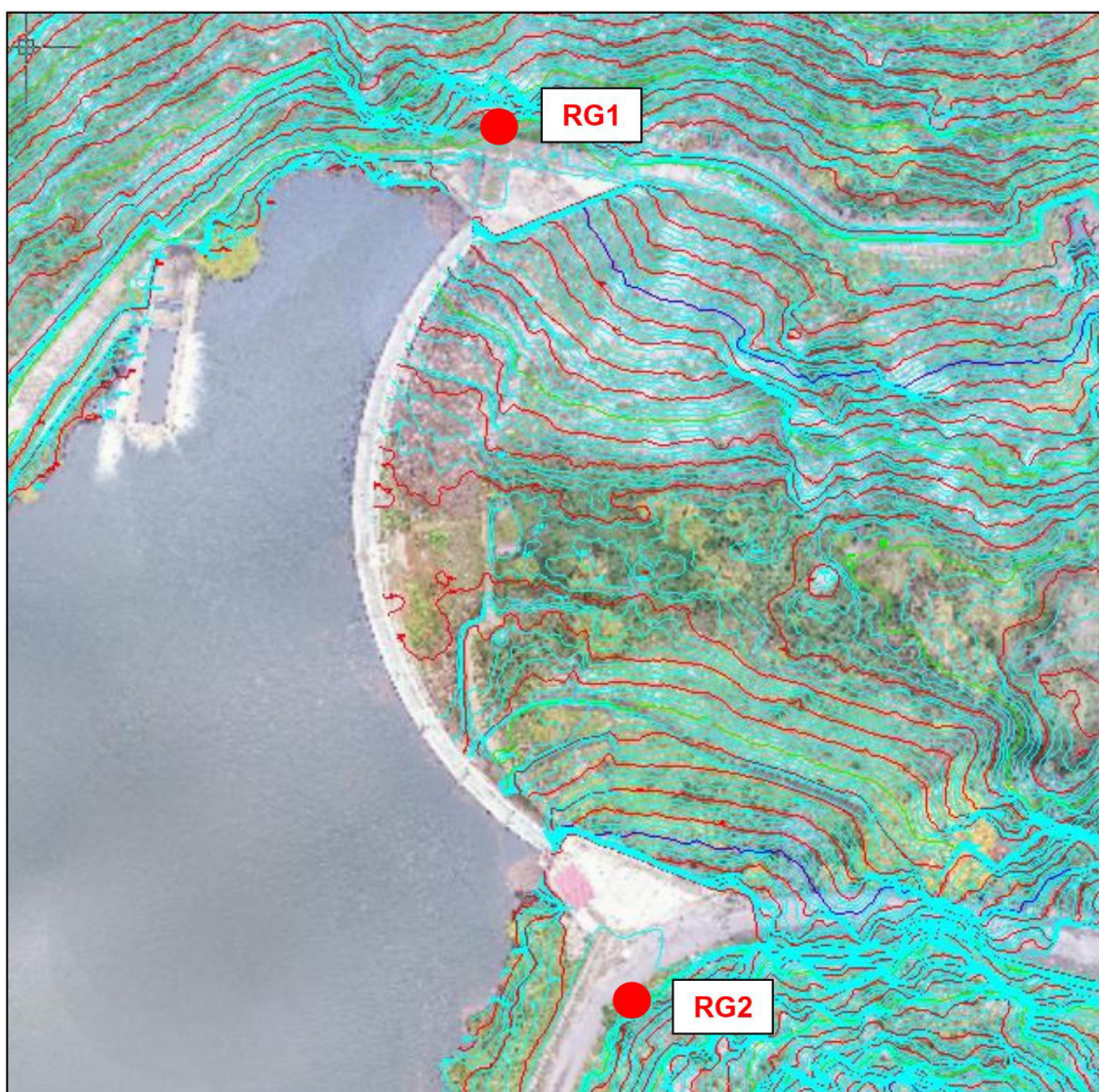


Figura 27: Ubicazione rilievi geomeccanici 2021.

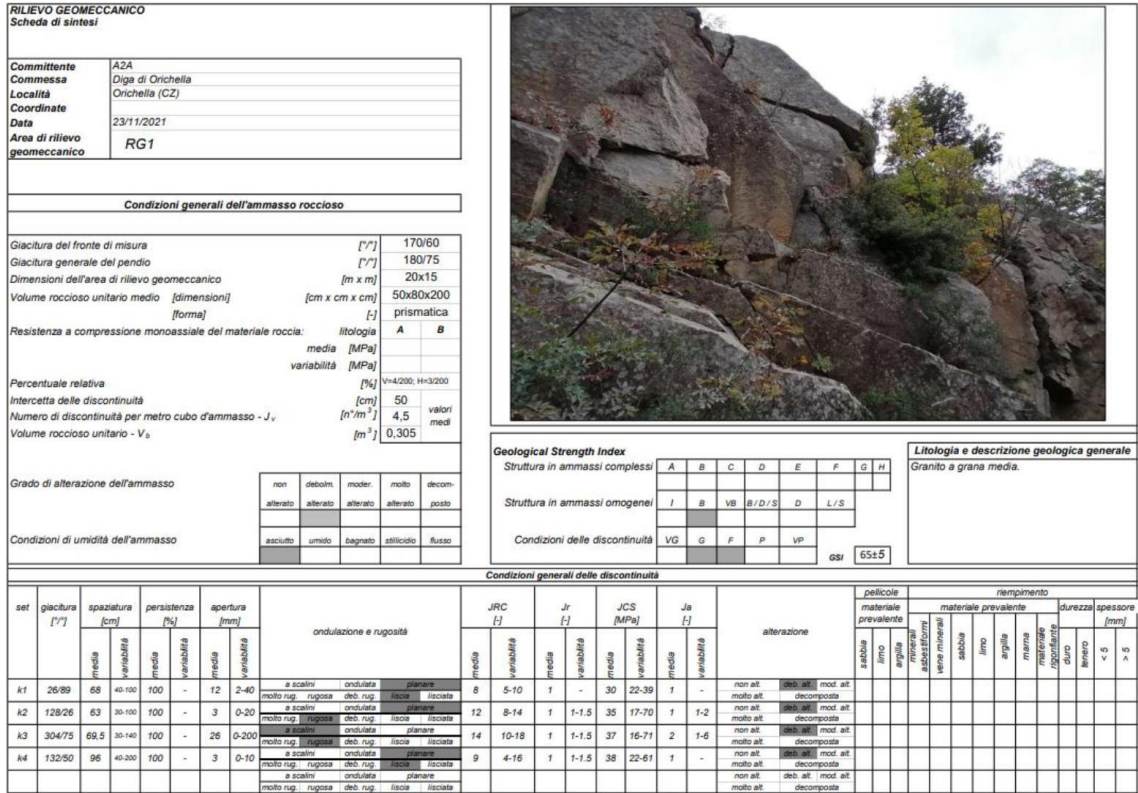


Figura 28: Sintesi rilievo geomeccanico RG1-2021.

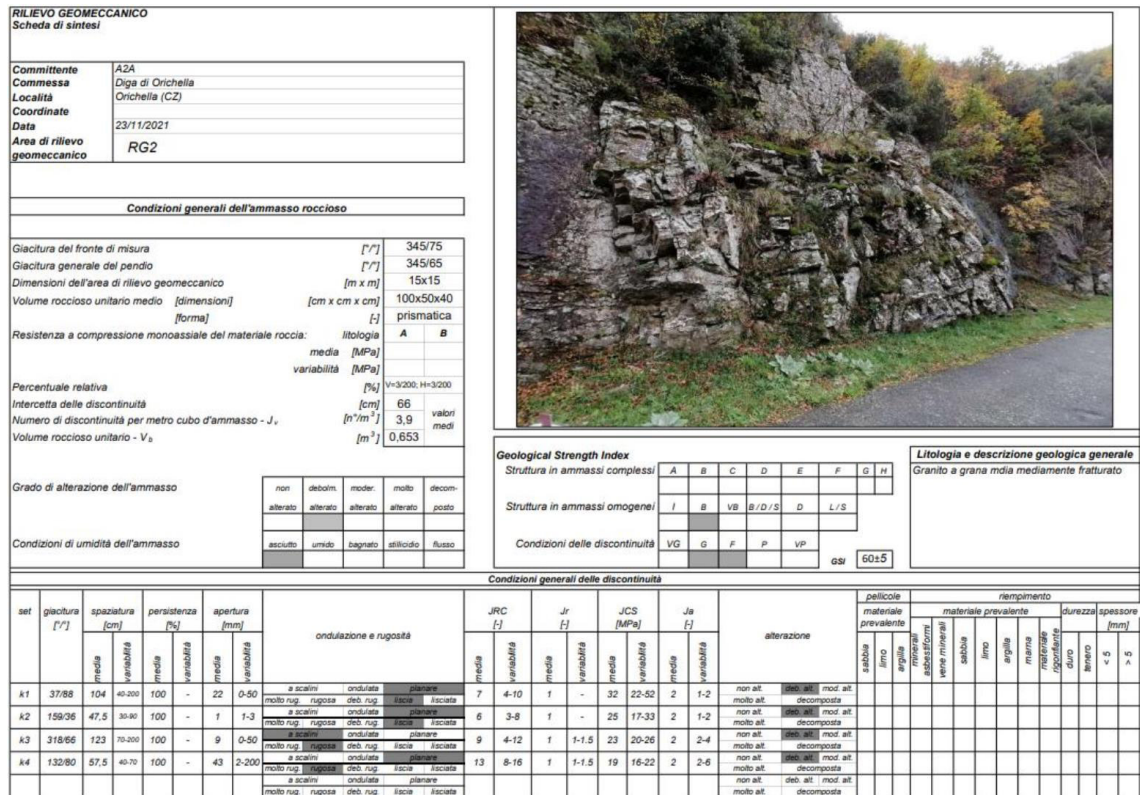


Figura 29: Sintesi rilievo geomeccanico RG2-2021.

7.4 Rilievi CESI laser-scanner

I rilievi condotti hanno consentito in prima istanza di descrivere compiutamente la morfologia delle pareti rocciose oggetto di rilievo.

Successivamente a mezzo della piattaforma di analisi dedicata, si è proceduto al raggruppamento dei piani individuati in sistemi di discontinuità e a calcolarne giacitura e spaziatura determinando l'indice J_v (numero di discontinuità per metro cubo di ammasso) ed il volume roccioso unitario medio V_b in corrispondenza di ciascun nodo di una griglia regolare di lato pari a 5 m sovrapposta alle pareti in esame in modo da ottenere una zonazione della qualità geomeccanica e delle condizioni locali di fratturazione dell'ammasso roccioso.

L'analisi della fratturazione e la determinazione del volume roccioso unitario ha comportato una fase preliminare in cui i dati giacitureali delle discontinuità osservate direttamente sul terreno sono stati confrontati con quelli dei punti restituiti dal rilievo laser-scanner. In particolare, grazie alla possibilità di selezionare e aggregare direttamente sul modello 3D i punti costituenti i principali piani di discontinuità rilevati e grazie alla capacità di identificare successivamente tutti i punti del modello con caratteristiche giacitureali simili, è stato possibile classificare la nuvola di punti in base alla giacitura di ogni famiglia di discontinuità rilevata durante la fase di indagine sul terreno.

Per le immagini relative ai piani individuati, suddivisi in funzione della famiglia di discontinuità di appartenenza, il riferimento è il doc. [27].

Dal modello 3D così ottenuto si è proceduto poi, attraverso una specifica applicazione del software sviluppata appositamente per lo scopo, alla fase di calcolo effettiva: per ogni nodo della griglia di analisi è stato analizzato un volume di versante identificato da un cubo virtuale di lato 5 m e con baricentro il nodo stesso; per ognuno dei nodi della griglia il software ha analizzato la distribuzione spaziale dei punti inclusi nel cubo di analisi, aggregandoli, tramite parametri impostati dall'utente, in piani di discontinuità.

Nella fase di analisi successiva tutti i piani individuati sono stati aggregati in set di discontinuità in base alla loro giacitura ed è stata misurata la spaziatura media tra i piani di ogni set. Con il valore medio della spaziatura tra i piani di ogni set di discontinuità è stato possibile calcolare, per ogni nodo delle griglie, il valore di J_v (numero di discontinuità per m^3) e di conseguenza quello di V_b , (volume roccioso unitario) determinato sulla base della relazione proposta da Palmström (1996).

I risultati ottenuti sono sintetizzati nelle seguenti tabelle.

nodo	A1	A3	A4	A5	A6	A7	B1	B3	B4	B5	B6	B8	C1	C3	C4	C5	C6
j_v	1,71	0,94	1,63	1,84	3,10	0,76	4,82	1,52	2,58	3,29	2,76	4,10	5,34	3,02	3,85	4,12	2,49
nodo	C7	C9	D1	D7	D8	E5	E6	E7	E8	E9	F1	F4	F6	G3	G4	G5	G6
j_v	3,30	2,49	8,79	3,85	4,23	3,69	2,79	1,09	1,91	3,56	5,23	2,57	3,23	4,34	4,99	1,03	5,28

Tabella 19: Stato di fratturazione locale [giunti/ m^3] – Spalla destra.

nodo	AC2	H11	O6	P6	P7	P14	Q6	R6	R7	S5	S6	T5	U5	Y2	Z1	Z2
j_v	4,09	3,32	4,95	4,34	2,33	4,13	3,55	2,87	2,29	4,46	2,21	3,70	3,46	2,73	7,67	1,77

Tabella 20: Stato di fratturazione locale [giunti/ m^3] – Spalla sinistra.

I risultati delle analisi sopra descritte sono mostrati graficamente di seguito a mezzo delle proiezioni sulla vista frontale delle pareti per una più agevole individuazione delle zone di ammasso a più elevata fratturazione.

Nel complesso nella zona di rilievo in spalla destra i valori di J_v ottenuti sono risultati mediamente pari a 3.2 con deviazione standard di 1.6, mentre in spalla sinistra si sono ottenuti valori mediamente pari a 3.4 con deviazione standard di 1.4.

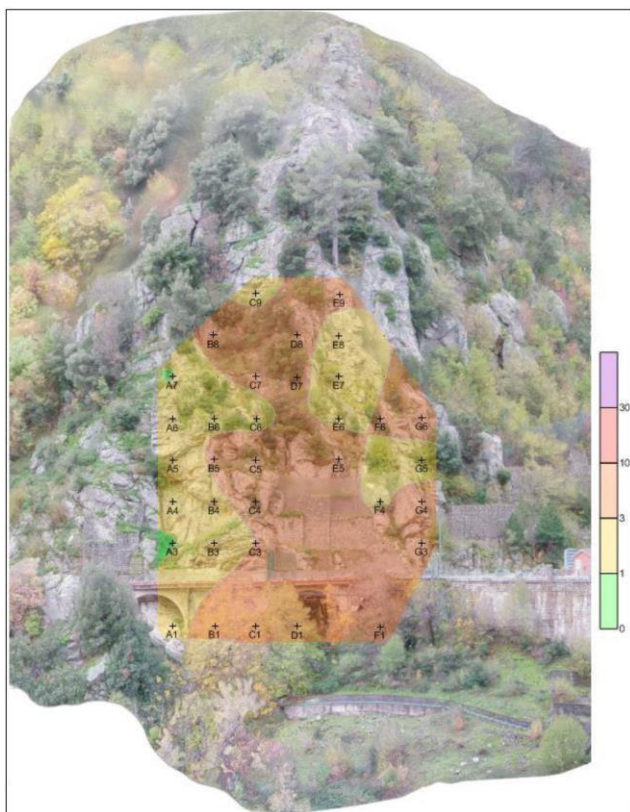


Figura 30: Distribuzione dei valori di J_v da indagine laser-scanner – Spalla destra.

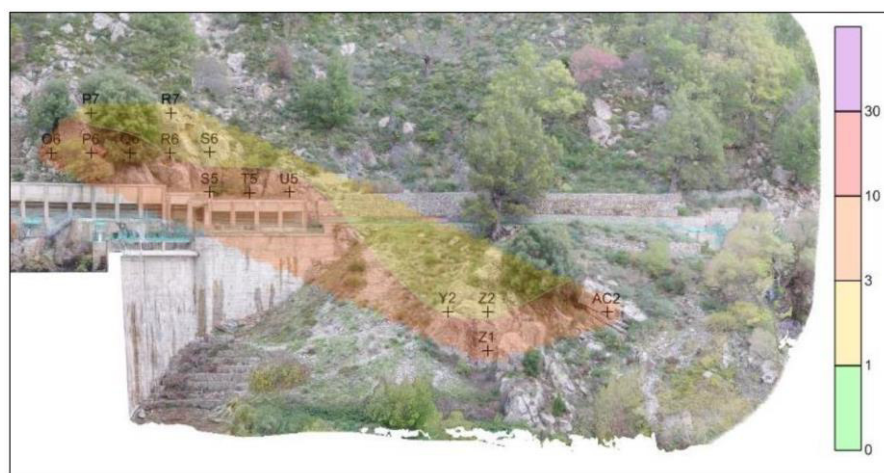


Figura 31: Distribuzione dei valori di J_v da indagine laser-scanner – Spalla sinistra.

7.5 Criteri di classificazione tecnica dell'ammasso roccioso

La caratterizzazione dell'ammasso roccioso oggetto dei rilievi è stata eseguita attraverso la classificazione geomeccanica con l'RMR System - Geomechanics Classification di Bieniawski (1973, 1979, 1989) e con il Q-System di Barton (1974, 1993).

Con il primo approccio si perviene alla classificazione dell'ammasso roccioso attraverso un indice RMR (Rock Mass Rating), sommatoria dei pesi attribuiti alla resistenza a compressione monoassiale del materiale roccia, all' RQD (Rock Quality Designation), alla spaziatura delle discontinuità, alle condizioni delle stesse e alle condizioni di umidità, come riassunto nella seguente Tabella:

Parametri	Intervalli di valori							
Resistenza roccia sana	Resistenza al «Point Load test» (MPa)	> 10	4 + 10	2 + 4	1 + 2	Per questi bassi valori è preferibile la prova di compressione monoassiale		
	Resistenza a compressione monoassiale (MPa)	> 250	100 + 250	50 + 100	25 + 50	5 + 25	1 + 5	< 1
Coefficienti numerici	15	12	7	4	2	1	0	
Rock Quality Designation RQD (%)	90 + 100	75 + 90	50 + 75	25 + 50	< 25			
Coefficienti numerici	20	17	13	8	3			
Spaziatura delle discontinuità	> 2 m	0,6 + 2 m	200 + 600 mm	60 + 200 mm	< 60 mm			
Coefficienti numerici	20	15	10	8	5			
Condizione dei giunti	Superfici molto rugose. Discontinuità chiuse e non persistenti. Pareti non alterate	Superfici debolmente rugose. Apertura delle discontinuità < 1 mm. Pareti leggermente alterate	Superfici debolmente rugose. Apertura delle discontinuità < 1 mm. Pareti completamente alterate	Superfici lisce o riempimenti argillosi di potenza < 5 mm o discontinuità collegate e con apertura di 1 - 5 mm	Riempimenti di argilla molle di potenza > 5 mm o discontinuità collegate e con apertura > 5 mm, persistenti			
Coefficienti numerici	30	25	20	10	0			
Presenza di acqua	Venute d'acqua in 10 m di galleria (l/min)	Nulla	< 10	10 + 25	25 + 125	> 125		
	Rapporto tra la pressione dell'acqua nelle discontinuità e la massima sollecitazione principale	0	< 0,1	0,1 + 0,2	0,2 + 0,5	> 0,5		
Condizioni generali della roccia	Perfettamente asciutta	Umida	Bagnata	Stillicidi	Venute d'acqua			
Coefficienti numerici	15	10	7	4	0			

Tabella 21: Classificazione completa di Bieniawski.

Nel secondo si determina un indice di qualità Q attraverso la seguente formula:

$$Q = \frac{RDQ}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF}$$

dove:

- RQD recupero in carotaggio percentuale modificato, calcolato attraverso la formula

$$RQD = 114 - 8 \cdot J_v + 0.14 \cdot J_v^2$$

- J_v n° di fratture al metro cubo (Priest e Hudson, 1976)
- J_n fattore rappresentativo del numero di set di discontinuità presenti
- J_r fattore rappresentativo della rugosità dei giunti

- J_a fattore rappresentativo dell'alterazione dei giunti
- J_w fattore rappresentativo delle condizioni idriche dell'ammasso roccioso
- SRF fattore rappresentativo del campo tensionale agente

7.6 Criteri di caratterizzazione geomeccanica

Relativamente ai criteri di caratterizzazione geomeccanica per la definizione dei parametri di resistenza e deformabilità dell'ammasso roccioso si rimanda al doc. [27].

7.7 Caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso roccioso

Sulla base delle risultanze di tutte le indagini ad oggi condotte, descritte ai capitoli precedenti, all'interno dell'ammasso roccioso di fondazione della diga di Orichella, nel complesso caratterizzato da condizioni di fratturazione da debole a moderata, si individuano alcune zone di intensa fratturazione associate alla presenza di localizzati disturbi tettonici, caratterizzate da andamento subverticale e spessori, mediamente modesti, variabili da un minimo di 0.2÷0.5 m ad un massimo di circa di 1.5÷2.0 m. La distribuzione di tali zone di tettonizzazione è mostrata nella sezione di seguito riportata su cui sono indicate anche le posizioni dei sondaggi geognostici disponibili.

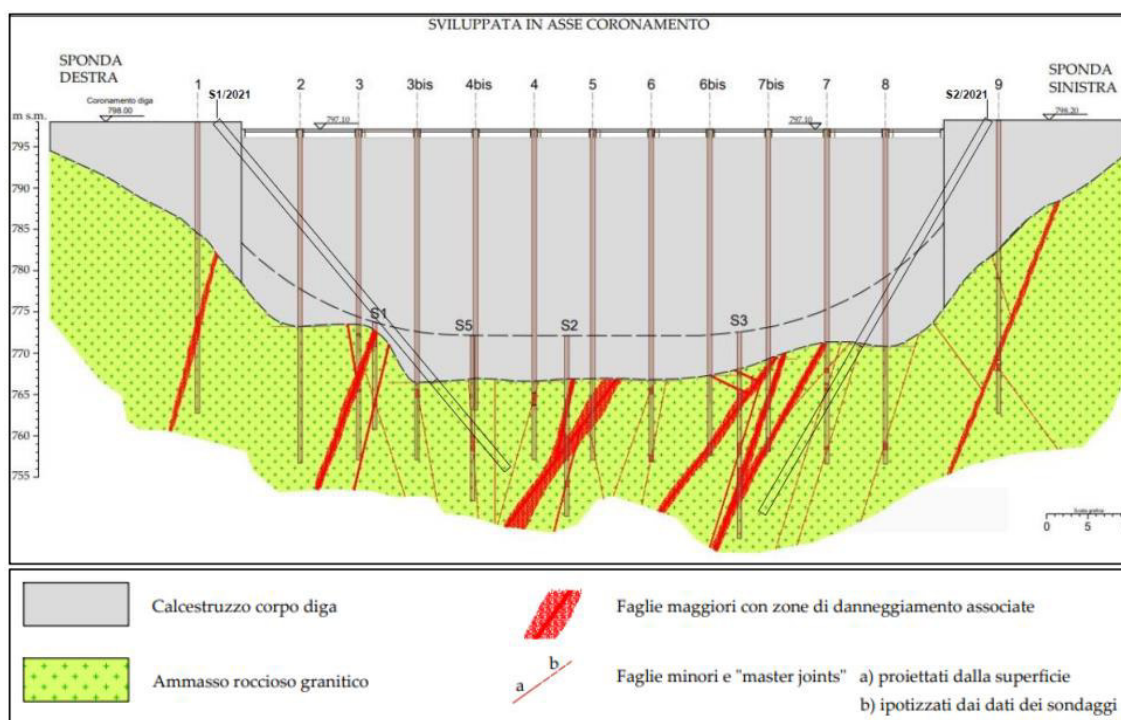


Figura 32: Sezione geostrutturale lungo asse longitudinale diga di Orichella.

La presenza delle zone di tettonizzazione ed associata intensa fratturazione dell'ammasso roccioso determina il locale decremento delle velocità di propagazione delle onde di compressione, ben evidenziata dalla tomografia sismica, come mostrato nella seguente figura.

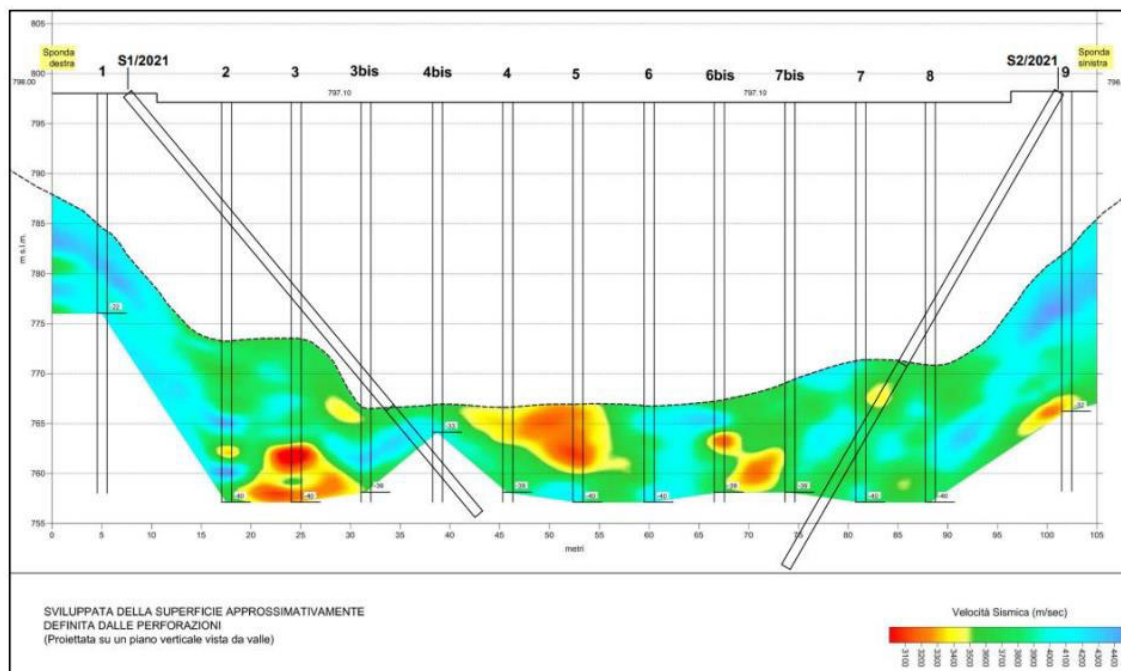


Figura 33: Profilo sismico tomografico lungo asse longitudinale diga di Orichella.

Si evidenzia che la mappa di velocità ottenuta per via tomografica, derivando da un'elaborazione statistica di numerosi valori di velocità calcolati lungo molteplici percorsi che collegano i punti di energizzazione a più punti di ricezione, restituisce valori mediati tendenzialmente inferiori rispetto a quelli ottenuti con tecniche di acquisizione ed elaborazione con carattere puntuale e tende ad enfatizzare lo spessore delle zone a ridotta velocità. Se a tale proposito si esaminano infatti i risultati dei carotaggi sonici condotti nella campagna Ismes 1986 si può infatti osservare che mentre nelle porzioni mediamente fratturate dell'ammasso si registrano valori generalmente compresi tra 4'500 e 5'000 m/s, laddove si attraversano zone di intensa fratturazione o di faglia, le velocità decadono localmente a valori generalmente compresi tra 4'000 e 4'500 m/s, come si può osservare ad esempio nel carotaggio sonico relativo al sondaggio S9 di seguito riportato.

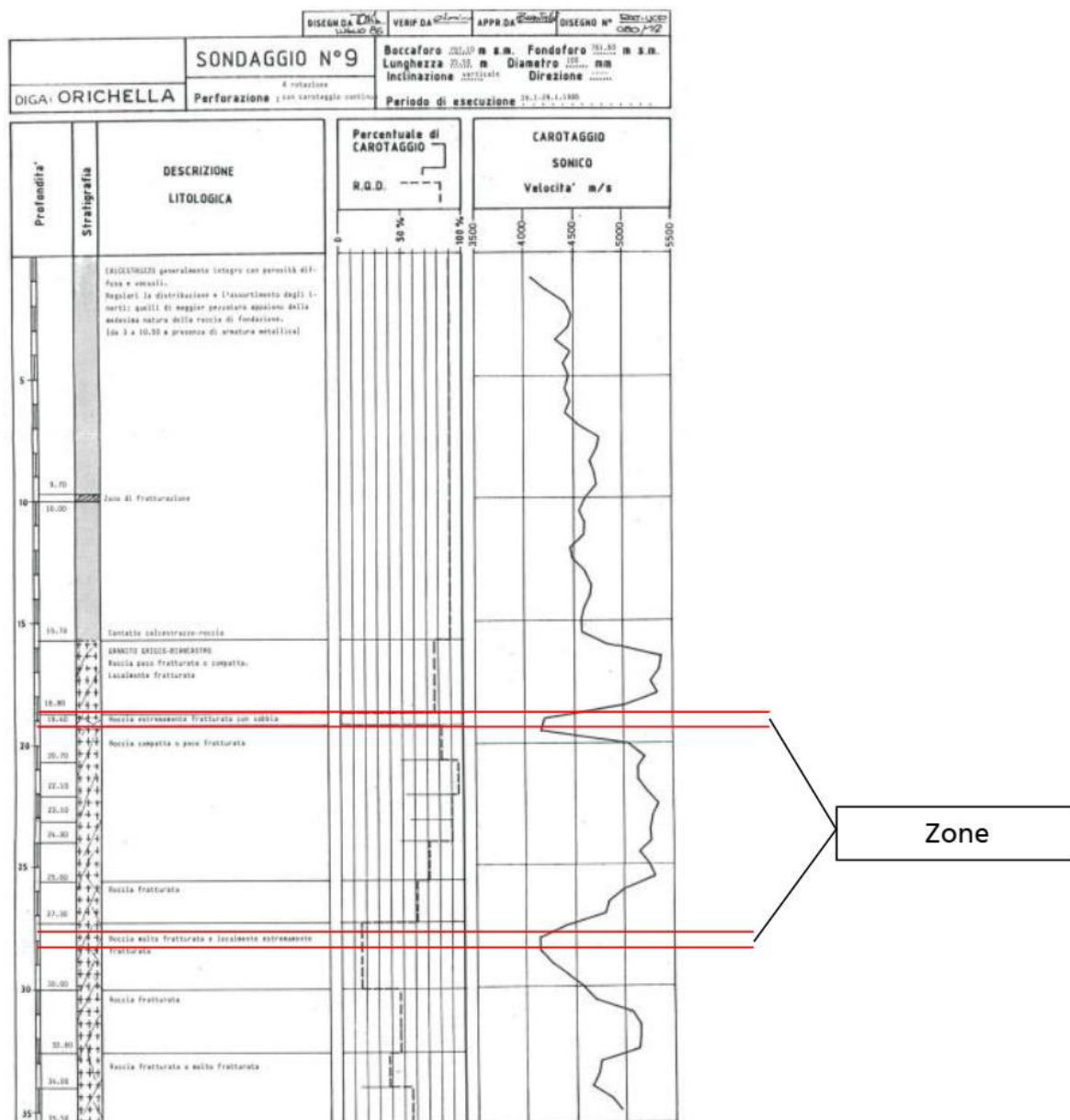


Figura 34: Carotaggio sonico S9.

Tale circostanza non si osserva invece nei più recenti carotaggi sonici condotti nel corso della campagna geognostica Geotecna 2011 che all'interno dell'ammasso roccioso mostrano valori omogenei generalmente compresi tra 4'800 e 5'200 m/s.

Le condizioni di maggior fratturazione dell'ammasso roccioso in corrispondenza del settore centrale della sezione di imposta della diga si possono osservare anche nei risultati delle tomografie elettriche, che in tali zone evidenziano significative riduzioni dei valori di resistività come mostrato nella seguente immagine.

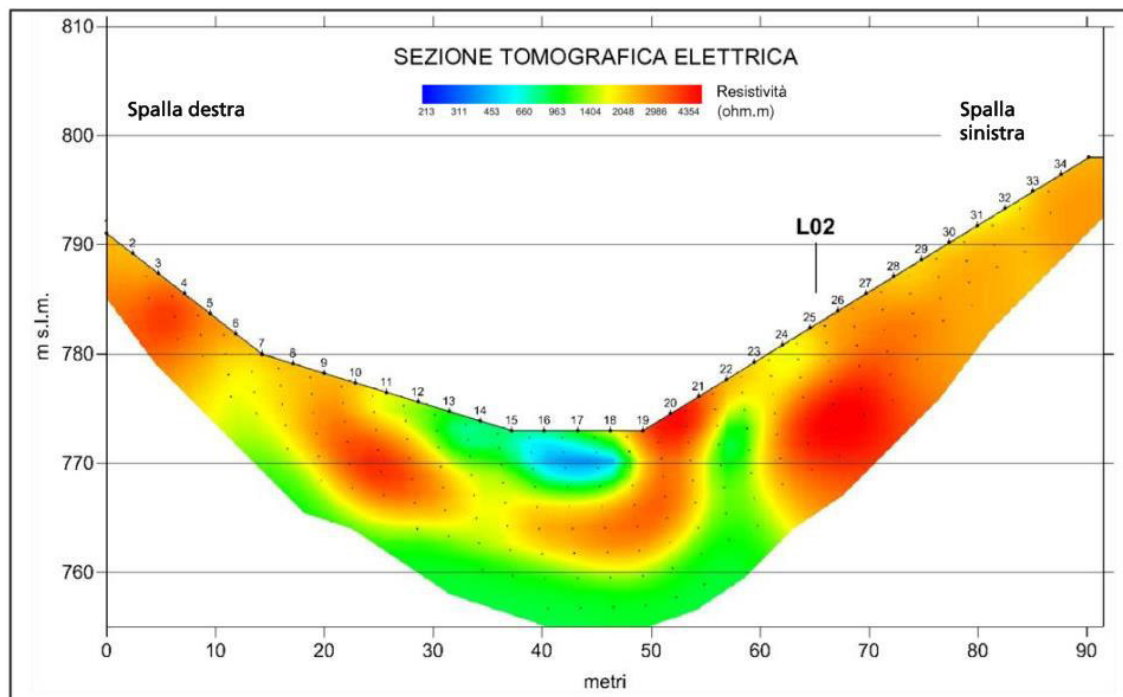


Figura 35: Sezione tomografica elettrica.

Alla luce di tutte le considerazioni sopra esposte pertanto all'interno dell'ammasso roccioso si possono individuare due condizioni tipiche:

- ammasso indisturbato, da debolmente a moderatamente fratturato;
- ammasso tettonizzato ad elevata fratturazione

Sulla base dei risultati della tomografia sismica alle condizioni di ammasso indisturbato sono associabili valori di V_P compresi tra 3'500 e 4'500 m/s, mentre le zone tettonizzate sono caratterizzate da valori compresi tra 3'000 e 3'500 m/s.

Le velocità sismiche possono essere correlate con le caratteristiche di qualità dell'ammasso roccioso attraverso la classificazione norvegese Q-system, sviluppata da Barton, Lie e Lund nel 1974 a mezzo della seguente relazione:

$$Q = 10^{(V_P - 3500) / 1000}$$

I risultati ottenuti dall'applicazione di tale relazione ai valori di V_p possono essere interpretati secondo la classificazione riportata in **Tabella 22**:

Vp (m/s)	Q	Qualità
<1500	< 0,01	Eccezionalmente Scadente
1500-2500	0,01 – 0,10	Estremamente Scadente
2500-3500	0,10 – 1,00	Molto scadente
3500-4102	1 – 4	Scadente
4102-4500	4 – 10	Discreta
4500-5102	10 – 40	Buona
5102-5500	40 – 100	Molto Buona
5500-6102	100 – 400	Estremamente Buona
>6102	400 – 1000	Eccezionalmente Buona

Tabella 22: Classi di qualità della roccia secondo la classificazione Q-System (Barton et alii, 1974). I valori della colonna V_p sono stati estrapolati da CESI.

A partire dai valori di Q è poi possibile risalire, come mostrato in **Tabella 23**, ai corrispondenti valori di GSI:

V_p [m/s]	Q <i>Barton, Lie e Lund</i>	$GSI = 9 \ln Q + 44$	$GSI = 10 \ln Q + 32$	media
4500	10,0	65	55	60
4000	3,2	54	44	49
3500	1,0	44	32	38
3000	0,3	34	20	27

Tabella 23: Correlazione V_p – GSI.

Di seguito si riportano i valori di GSI derivati dall'elaborazione dei rilievi geomeccanici condotti su affioramento con le diverse formulazioni analitiche utilizzate, in confronto con quanto stimato direttamente sul terreno:

Rilievo geomeccanico	Geological Strength Index (Hoek e Marinos., 2000)					
	$9 \ln Q + 44$	$10 \ln Q + 32$	RMR-5	Cai (2004)	Russo (2009)	stima
RG1-2014	77	69	65	71	78	70
RG1-2021	63	53	55	56	64	65
RG2-2021	57	46	58	50	62	60

Tabella 24: Rilievi geomeccanici – GSI.

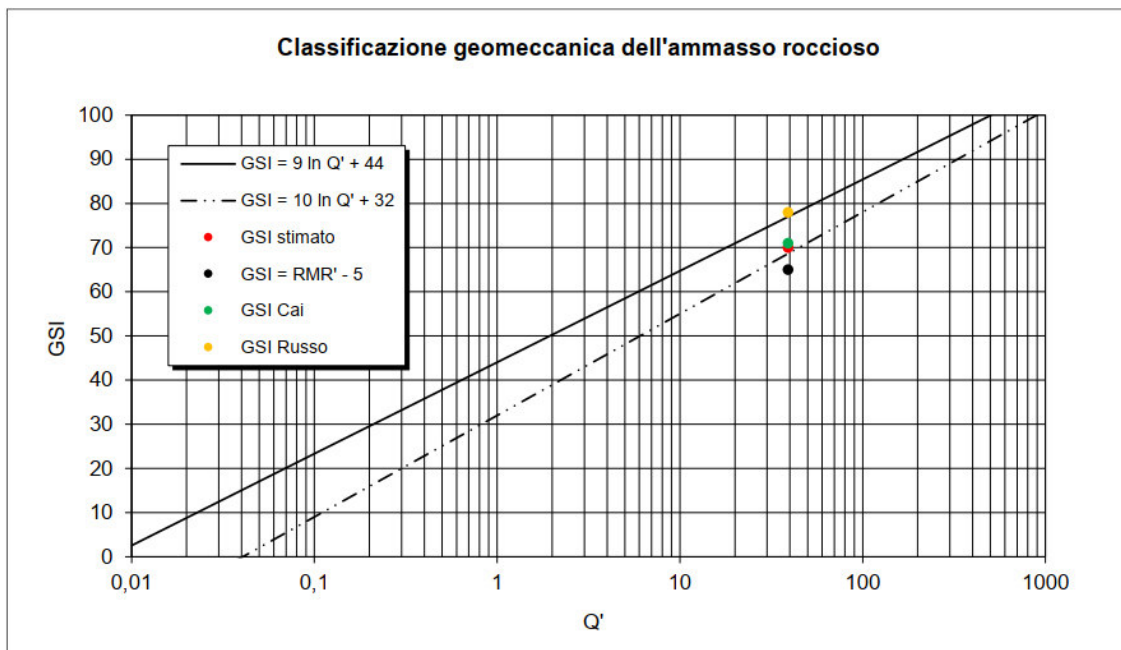


Figura 36: Rilievo RG1 - 2014.

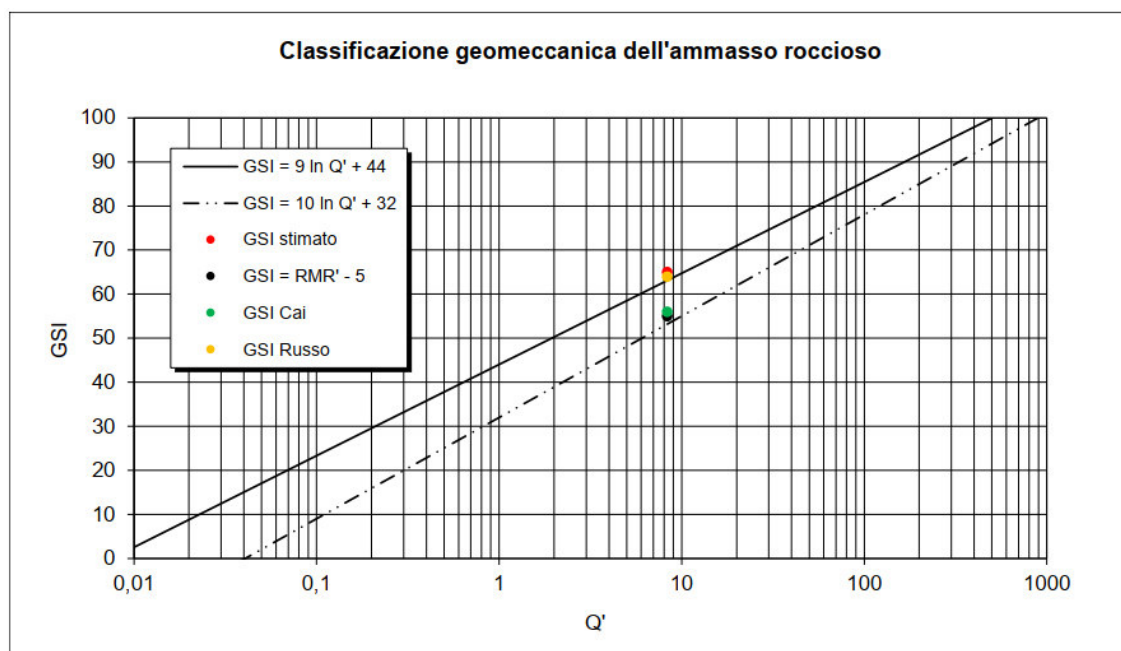


Figura 37: Rilievo RG1 - 2021.

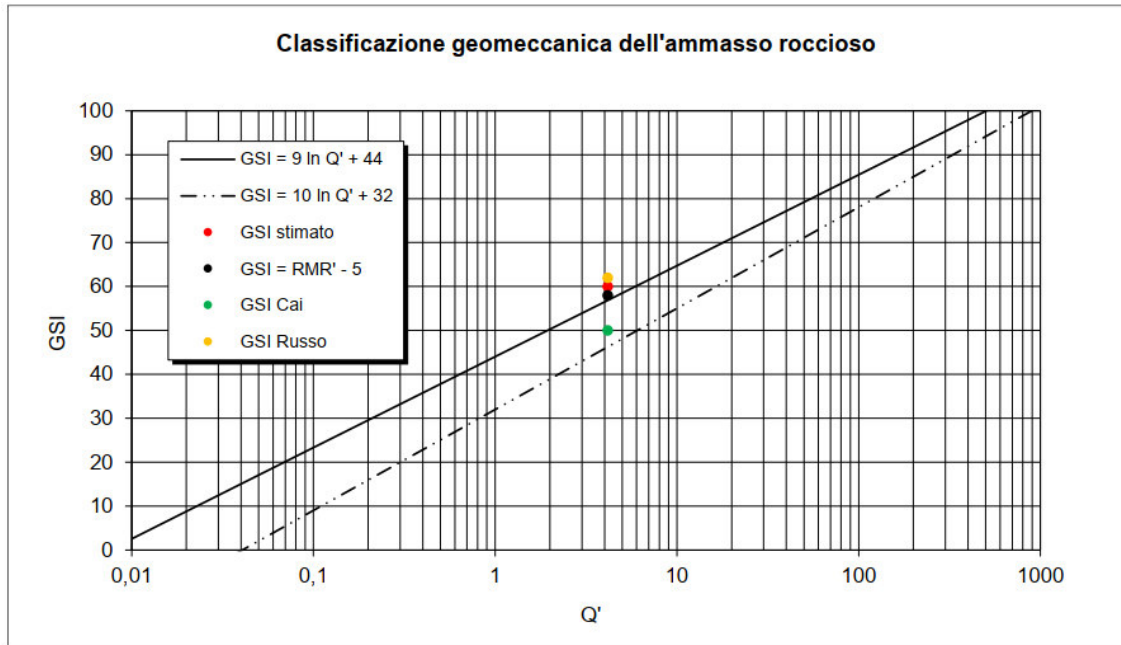


Figura 38: Rilievo RG2 - 2021.

Per quanto concerne le risultanze dei rilievi laser-scanner, nel complesso nella zona di rilievo in spalla destra i valori di GSI ottenuti come media dei valori determinati con le formulazioni analitiche di Cai e di Russo sono risultati mediamente pari a 71, con deviazione standard pari a 9, mentre in spalla sinistra si sono ottenuti valori mediamente pari a 65 con deviazione standard di 6.

La distribuzione dei valori di GSI calcolati lungo le verticali di indagine S1-2021 e S2-2021 sulla base della descrizione geomeccanica delle carote di sondaggio è mostrata nei seguenti grafici.

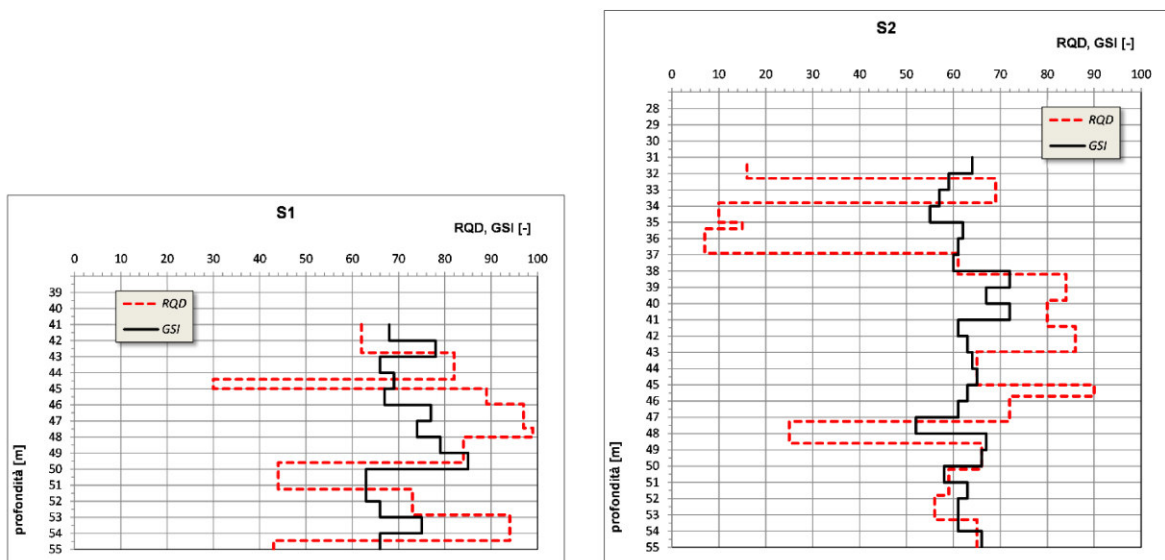


Figura 39: Sondaggi 2021 – RQD e GSI.

Nel complesso l'ammasso roccioso indisturbato può essere quindi caratterizzato da valori di GSI mediamente compresi tra 55 e 65.

Le zone tettonizzate e intensamente fratturate, di ampiezza massima pari a 1.5÷2.0 m, possono essere caratterizzate da valori di GSI compresi tra 25 e 35.

7.8 Zonazione geomeccanica

Sulla base dei risultati di tutte le indagini disponibili ed alla luce delle considerazioni di cui al capitolo precedente è possibile riconoscere lungo la sezione di imposta della diga due diverse zone geomeccaniche, definite in funzione della localizzazione e della distribuzione delle zone di tettonizzazione ed intensa fratturazione individuate, la cui localizzazione lungo la sezione di imposta della diga è mostrata nella seguente immagine.

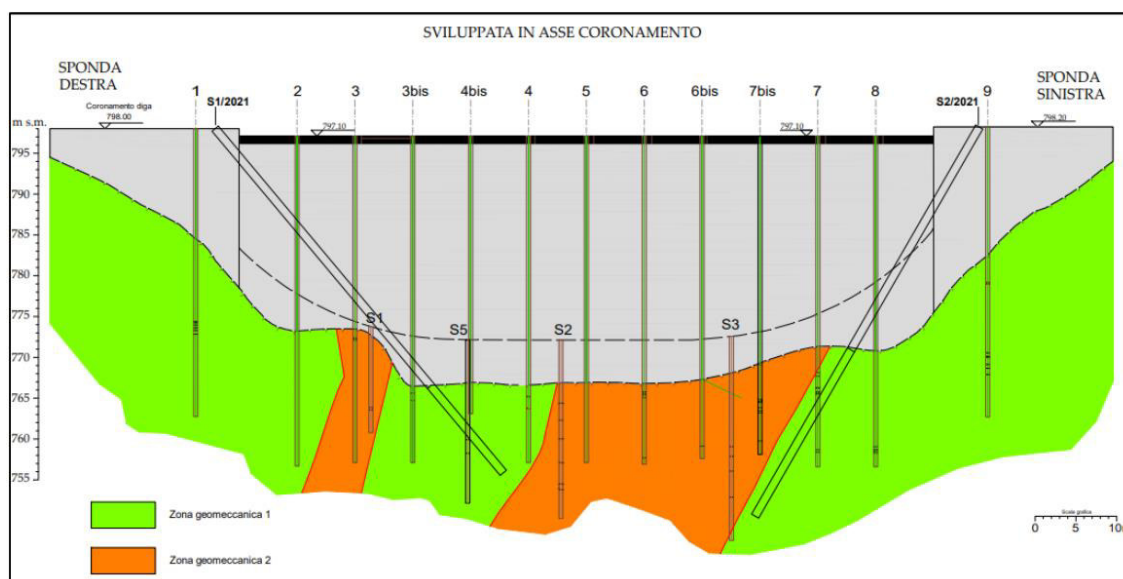


Figura 40: Sezione geomeccanica in corrispondenza della asse longitudinale della diga di Orichella.

7.8.1 Zona geomeccanica 1 (UG1)

La zona geomeccanica 1 (**UG1**) corrisponde alle condizioni di ammasso indisturbato, da debolmente a moderatamente fratturato, che caratterizza le spalle e la porzione compresa tra i sondaggi 3bis e 4bis.

7.8.1.1 Stima dei parametri di ingresso

Sulla base delle descrizioni stratigrafiche e geologiche e dei dati delle prove di laboratorio disponibili a tale tipologia di ammasso sono stati attribuiti i valori dei parametri di ingresso σ_{ci} , m_i e GSI di seguito riportati:

- σ_{ci} = 85 ± 15 MPa
- E_i = $34'000 \pm 5'000$ MPa
- m_i = 30 ± 3
- GSI = 60 ± 5

Si precisa che i valori del parametro m_i sono stati definiti sulla base della interpretazione delle prove di compressione triassiale condotte nella campagna di indagini 2021, mentre i valori di resistenza a compressione monoassiale e dei parametri di deformabilità della roccia intatta sono stati ottenuti come media dei risultati delle campagne di prove di laboratorio Ismes 1986 e Ismgeo 2021. Per tutti i parametri considerati si è assunta una distribuzione statistica normale.

7.8.1.2 Parametri geomeccanici

Mediante una simulazione statistica con metodo Montecarlo si ottiene la seguente variabilità statistica dei parametri geomeccanici d'ammasso:

Parametro		Valore medio	Deviazione standard
m_b	[-]	7.31	1.49
s	[-]	0.014	0.008
a	[-]	0.50	0.001
Angolo di resistenza al taglio	[°]	64	1.4
Coesione intercetta	[MPa]	1.11	0.24
Resistenza a compressione σ_c	[MPa]	9.45	3.20
Resistenza globale σ_{cm}	[MPa]	31.04	6.50
Resistenza a trazione	[MPa]	0.15	0.07
Modulo di deformazione [Hoek & Diederichs 2006]	[GPa]	17.68	4.52
Modulo di deformazione [Hoek et alii 2002]	[GPa]	16.89	5.09
Modulo di deformazione [Sönmez et alii 2004]	[GPa]	13.99	2.60
Modulo di deformazione [Ghamgosar et. alii 2010]	[GPa]	18.04	8.08

Tabella 25: Parametri geomeccanici della UG1.

I valori di modulo ottenuto sono risultati paragonabili ai valori misurati nelle prove dilatometriche della campagna di indagini TERRACH 2021, tutte ricadenti all'interno della zona geomeccanica 1, compresi tra 13.00 e 20.46 GPa e mediamente pari a circa a 16.00 GPa, confermando la validità delle assunzioni fatte per le porzioni di ammasso da debolmente a moderatamente fratturato.

Per ulteriori dettagli relativamente alla distribuzione caratteristica dei parametri, il riferimento è il documento [27].

7.8.2 Zona geomeccanica 2 (UG2)

La zona geomeccanica 2 (**UG2**) corrisponde a porzioni di ammasso in cui la multipla occorrenza di zone tettonizzate o intensamente fratturate determina condizioni di maggior fratturazione, con locale riduzione della velocità di propagazione delle onde di compressione V_P e della resistività elettrica e caratterizza buona parte del settore vallivo centrale.

7.8.2.1 Stima dei parametri di ingresso

Per tali zone i parametri relativi al materiale roccia sono stati posti pari a quelli della zona precedente, mentre per tener conto delle condizioni di più intensa fratturazione che caratterizza l'ammasso l'indice GSI è stato ridotto a valori compresi tra 40 e 50.

I parametri di base assunti per la caratterizzazione geomeccanica, per i quali si è considerata una distribuzione statistica normale sono di seguito mostrati:

- σ_{ci} = 85 ± 15 MPa
- E_i = $34'000 \pm 5'000$ MPa
- m_i = 30 ± 3
- GSI = 45 ± 5

Si precisa che i valori del parametro m_i sono stati definiti sulla base della interpretazione delle prove di compressione triassiale condotte nella campagna di indagini 2021, mentre i valori di resistenza a compressione monoassiale e dei parametri di deformabilità della roccia intatta sono stati ottenuti come media dei risultati delle campagne di prove di laboratorio Ismes 1986 e Ismgeo 2021. Per tutti i parametri considerati si è assunta una distribuzione statistica normale.

7.8.2.2 Parametri geomeccanici

Mediante una simulazione statistica con metodo Montecarlo si ottiene la seguente variabilità statistica dei parametri geomeccanici d'ammasso:

Parametro		Valore medio	Deviazione standard
m_b	[-]	4.25	0.88
s	[-]	0.002	0.001
a	[-]	0.51	0.003
Angolo di resistenza al taglio	[°]	61	1.74
Coesione intercetta	[MPa]	0.71	0.10
Resistenza a compressione σ_c	[MPa]	3.92	1.40
Resistenza globale σ_{cm}	[MPa]	22.76	4.79
Resistenza a trazione	[MPa]	0.05	0.02
Modulo di deformazione [Hoek & Diederichs 2006]	[GPa]	7.41	2.82
Modulo di deformazione [Hoek et alii 2002]	[GPa]	7.06	2.16
Modulo di deformazione [Sönmez et alii 2004]	[GPa]	9.83	1.90
Modulo di deformazione [Ghamgosar et. alii 2010]	[GPa]	4.87	2.22

Tabella 26: Parametri geomeccanici della UG2.

I valori di modulo ottenuti per la zona 2 sono risultati paragonabili ai valori misurati nelle prove dilatometriche condotte nella campagna di indagini Ismes 1986 all'interno della perforazione di sondaggio S3, ricadente all'interno della zona geomeccanica 2, compresi tra 5.10 e 11.34 GPa e mediamente pari a circa a 7.60 GPa.

Per ulteriori dettagli relativamente alla distribuzione caratteristica dei parametri, il riferimento è il documento [27].

7.8.3 Zone di faglia (UG3)

Le zone di faglia (**UG3**), sono zone in cui la massima ampiezza osservata nelle perforazioni di sondaggio ed in affioramento è pari a 2.0 m, generalmente limitata a 0.5 m. Nel doc. [27] si evidenzia

che in considerazione del loro modesto spessore e del loro assetto giaciturale l'effetto delle zone di faglia sulla risposta deformativa media d'ammasso sotto il corpo diga può essere considerata a tutti gli effetti trascurabile.

7.8.3.1 Stima dei parametri di ingresso

I parametri di base assunti per la caratterizzazione geomeccanica, per i quali si è considerata una distribuzione statistica normale sono di seguito mostrati:

- σ_{ci} = 55 ± 10 MPa
- E_i = $23'000 \pm 2'000$ MPa
- m_i = 30 ± 5 -
- GSI = 30 ± 5 -

Si precisa che i valori di resistenza a compressione monoassiale e di modulo di elasticità della roccia intatta sono stati assunti pari al valore medio diminuito della deviazione standard per tenere conto del decadimento dei parametri nelle zone di faglia. Il parametro GSI è stato stimato sulla base del grafico di valutazione proposta da Cai (2004) e dei valori di velocità di propagazione delle onde di compressione V_p .

7.8.3.2 Parametri geomeccanici

Come per gli altri casi, eseguendo una simulazione statistica con metodo Montecarlo si ottiene la seguente variabilità statistica dei parametri geomeccanici d'ammasso.

Parametro		Valore medio	Deviazione standard
m_b	[-]	2.50	0.52
s	[-]	0.0005	0.0003
a	[-]	0.52	0.01
Angolo di resistenza al taglio	[°]	54	2.3
Coesione intercetta	[MPa]	0.44	0.05
Resistenza a compressione σ_c	[MPa]	0.99	0.39
Resistenza globale σ_{cm}	[MPa]	10.67	2.39
Resistenza a trazione	[MPa]	0.01	0.004
Modulo di deformazione [Hoek & Diederichs 2006]	[GPa]	1.99	0.69
Modulo di deformazione [Hoek et alii 2002]	[GPa]	2.43	0.75
Modulo di deformazione [Sönmez et alii 2004]	[GPa]	4.55	0.75
Modulo di deformazione [Ghamgosar et. alii 2010]	[GPa]	1.34	0.61

Tabella 27: Parametri geomeccanici della UG3.

Per ulteriori dettagli relativamente alla distribuzione caratteristica dei parametri, il riferimento è il documento [27].

8. CAMPAGNA DI RILIEVO GEOMECCANICO LOMBARDI

8.1 Premessa

Tra il 21 e il 23 febbraio 2023 sono stati eseguiti una serie di rilievi geomeccanici per l'aggiornamento del quadro conoscitivo delle caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso presente nella porzione di versante a valle della Diga di Orichella.

Al fine di avere un quadro più completo si è deciso di suddividere il versante a valle della diga in 4 stazioni strutturali - geomeccaniche: S1, S2, S3 ed S4, suddivise in sottostazioni o stop (es. S1.1, S1.2 etc.) come visibile nella Figura 41.

Le stazioni strutturali sono state distribuite in modo da avere la copertura maggiore possibile dell'area, in relazione sia alla presenza di affioramenti rocciosi sia alla possibilità di raggiungerli in sicurezza e poter svolgere i rilievi geologico strutturali e geomeccanici.



Figura 41: Localizzazione delle Stazioni Strutturali – Geomeccaniche.

Nella seguente tabella sono riportate le coordinate GPS dei singoli stop dove sono state effettuate le misure:

Stazione	Latitudine	Longitudine
S1.1	39.1927882	16.7280300
S1.2	39.1927056	16.7281839
S1.3	39.1927223	16.7283566
S1.4	39.1926918	16.7284905
S2.1	39.1926150	16.7280840
S2.2	39.1925567	16.7279757
S2.3	39.1925019	16.7282285
S2.4	39.1926492	16.7281631
S3	39.1923655	16.7283140
S4.1	39.1919952	16.7282614
S4.2	39.1919340	16.7282607
S4.3	39.1919341	16.7281929
S4.4	39.1919504	16.7280220

Figura 42: Coordinate GPS delle singole sottostazioni di misura. Sistema di riferimento WGS84.

Rimandando alla Relazione Geologica per l'inquadramento geologico generale, l'area dove sono stati realizzati i rilievi è costituita da rocce cristalline di origine ignea intrusiva appartenenti all'unità dei "Graniti calabri", di età Ercinica.

8.2 Metodologia di rilievo

In totale sono state eseguite 13 sottostazioni di misura o stop per le quali sono state realizzate delle stese di rilievo areali di 1 m² circa di superficie. Per ognuna di queste stese areali, sono stati rilevati diversi parametri seguendo le raccomandazioni: "*Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses*" proposte dall'I.S.R.M. (1978, 1985, 1993). Tali raccomandazioni sono universalmente considerate come linee guida per i rilievi geologico strutturali e geomeccanici. Tali linee guida consentono ancora oggi di descrivere ed interpretare in modo razionale e quantitativo quello che in natura appare disordinato e casuale permettendo di effettuare ciò che sinteticamente è denominato "rilievo geostrutturale".

Per ogni stop si sono rilevati i seguenti parametri:

- Orientazione nello spazio (giacitura - immersione/inclinazione),
- Spaziatura (cm),

- Persistenza (espressa in % rispetto alla stessa areale),
- Tipo di terminazione delle discontinuità (x: termina oltre la stessa areale di rilievo, d: termina in una discontinuità, r: termina in roccia),
- Rugosità a piccola scala, espressa attraverso il parametro JRC (Joint Roughness Coefficient) valutato tramite confronto con profili di scabrezza, e classe di ampiezza,
- Resistenza a compressione delle pareti delle discontinuità JCS (Joint Coefficient Strength) mediante sclerometro da roccia effettuando un minimo di tre misure per discontinuità,
- Apertura (mm),
- Alterazione delle superfici, espressa a mezzo del termine Ja di Barton e secondo le classi ISRM ($w_2 \div w_5$),
- Presenza, tipo e spessore del riempimento.

L'unica eccezione è per la sottostazione S2.3, che verrà descritta nel paragrafo 8.14.7.

Nel paragrafo seguente vengono riportate le raccomandazioni seguite per i singoli parametri misurati.

8.3 Raccomandazioni I.S.R.M.

8.3.1 Orientazione (giacitura)

Metodo della bussola e clinometro:

- La giacitura di una discontinuità nello spazio è data mediante l'inclinazione della linea di maggior pendenza misurata rispetto all'orizzontale e la direzione dell'immersione misurata in senso orario rispetto al Nord. Esempio: direzione di immersione/inclinazione (025°/45°).
- L'orientazione delle discontinuità relative ad una struttura ingegneristica influenza in modo determinante la possibilità di condizioni di instabilità o lo sviluppo di deformazioni notevoli. L'importanza dell'orientazione aumenta quando sono presenti altre condizioni favorevoli alla deformazione, ad esempio, basse resistenze di taglio o un sufficiente numero di sistemi di discontinuità o giunti tali da consentire uno scivolamento.
- L'orientazione relativa delle discontinuità determina la forma dei singoli blocchi, strati o altre forme, che costituiscono la massa di roccia.

Procedura:

- La massima inclinazione del piano medio della discontinuità è misurata con il clinometro e dovrebbe essere espressa in gradi con numeri di due cifre (da 00° a 90°).
- L'azimut dell'immersione (direzione di immersione) è misurato in gradi contati in senso orario a partire dal Nord, ed espresso con un numero di tre cifre, es. 010° o 105° (da 000° a 360°).

- La direzione e l'immersione devono essere registrate in questo ordine, con numeri di 3 cifre e di 2 cifre separati da una barra, es. 010°/05°. La coppia di numeri rappresenta il vettore immersione (**Figura 43**).

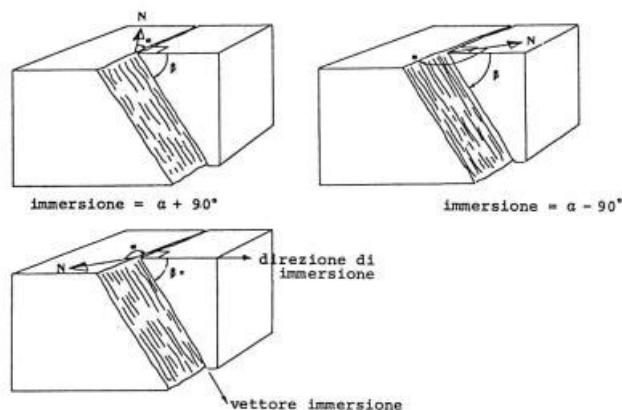


Figura 43: Schemi indicanti: direzione (α), inclinazione (β) ed immersione ($\alpha \pm 90^\circ$) I.S.M.R. (1993).

Per la rappresentazione dei dati di orientazione delle discontinuità, sono stati sviluppati diversi metodi di proiezione stereografica, per rappresentare univocamente in due dimensioni i dati tridimensionali.

In questo ambito sarà illustrato un solo tipo di proiezione: quella equalarea, secondo questo metodo la distribuzione spaziale dei dati è accuratamente rappresentata su un reticolo di Schmidt-Lambert. Nel caso di proiezione equiangolare, le relazioni angolari tra le strutture sono mantenute riportando i dati su un reticolo di Wulff.

Un piano di discontinuità (a/B) può essere rappresentato univocamente con un cerchio meridiano o un polo su un emisfero di riferimento, quando il centro della sfera giace sul piano di discontinuità (**Figura 44**). Per gli scopi ingeneristici è utilizzato l'emisfero di riferimento inferiore. Si ottiene quindi una rappresentazione bidimensionale proiettando il dato su un reticolo equalarea. Nella Figura 44 il polo P della discontinuità K è il punto di intersezione della normale al piano con l'emisfero inferiore.

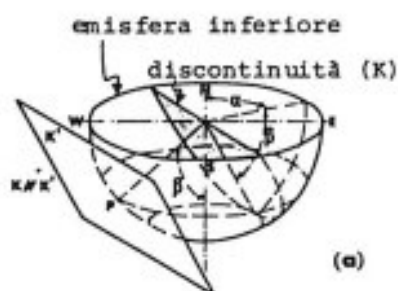


Figura 44: Metodo di rappresentazione di una discontinuità K con un polo P e con un cerchio meridiano su uno stereogramma polare equalarea (I.S.R.M., 1993).

8.4 Spaziatura

La spaziatura di discontinuità adiacenti condiziona in modo sostanziale le dimensioni di singoli blocchi di roccia integra. Sistemi di discontinuità assai ravvicinate tendono a dare condizioni di bassa coesione nella massa, mentre quelli che hanno una larga spaziatura tendono a produrre condizioni 'interdipendenza tra i blocchi. Questi effetti dipendono dalla persistenza delle singole discontinuità. In casi eccezionali una spaziatura stretta può modificare la modalità di rottura di una massa rocciosa da quella di traslazione a quella circolare o perfino a quella di flusso (ad es. una zona di scorrimento tipo «cubetti di zucchero» nella quarzite). Con una spaziatura eccezionalmente stretta l'orientazione ha poca importanza, poiché la rottura può aver luogo con rotazione o rotolamento di piccoli frammenti rocciosi. Come nel caso dell'orientazione, l'importanza della spaziatura aumenta quando sono presenti altre condizioni per la deformazione: ad es. bassa resistenza a taglio ed un sufficiente numero di discontinuità o sistemi di fessure tali da causare uno scorrimento. La spaziatura di discontinuità isolate e di sistemi di discontinuità ha una grande influenza sulla permeabilità della massa rocciosa e le caratteristiche di filtrazione. In genere la conducibilità idraulica di un dato sistema sarà inversamente proporzionale alla spaziatura, se sono comparabili le aperture dei singoli giunti.

Le distribuzioni delle spaziature per ogni sistema di discontinuità possono essere presentate mediante istogrammi, e in base ai valori di spaziatura ottenuti, i diversi set di discontinuità possono essere così classificati:

- Spaziatura estremamente stretta <20 mm;
- Spaziatura molto stretta compresa tra 20 mm e 60 mm;
- Spaziatura stretta compresa tra 60 mm e 200 mm;
- Spaziatura moderata compresa tra 200 mm e 600 mm;
- Spaziatura larga compresa tra 600 mm e 2000 mm;
- Spaziatura molto larga compresa tra 2000 mm e 6000 mm;
- Spaziatura estremamente larga >6000 mm.

8.5 Persistenza

La persistenza rappresenta l'estensione areale o la dimensione di una discontinuità entro un piano. Può essere approssimativamente quantificata osservando le lunghezze delle tracce di discontinuità sulla superficie esposta. Questo è uno dei parametri più importanti che riguardano le masse rocciose, ma è anche uno dei più difficili da quantificare. Le discontinuità di un particolare sistema possono essere spesso più estese di quelle di un altro sistema.

I sistemi minori, quindi, tenderanno a terminare contro le prime oppure nella roccia stessa. Nel caso di pendii di roccia e fondazioni di dighe è della massima importanza cercare di stabilire il grado di persistenza di quelle discontinuità che sono orientate in modo sfavorevole per la stabilità. Il grado con

il quale le discontinuità continuano all'interno di blocchi di roccia adiacenti, senza estinguersi nella roccia o contro altre discontinuità, determina il grado di possibilità con il quale la rottura della roccia intatta verrebbe coinvolta in un eventuale cedimento della struttura. Forse in modo più appropriato, la persistenza definisce il grado di possibilità con cui si verificherebbe uno scivolamento tra discontinuità adiacenti allo svilupparsi di una superficie di cedimento. La persistenza inoltre è della massima importanza per lo sviluppo di rotture di trazione dietro la sommità di un pendio. Spesso le superfici esposte sono piccole rispetto all'area o alla lunghezza di discontinuità persi-stenti, cosicché la persistenza reale può solamente essere ipotizzata. Meno frequentemente è possibile rilevare la lunghezza dell'immersione e della direzione delle discontinuità esposte e quindi valutare la loro persistenza su un certo piano di una formazione rocciosa utilizzando una teoria probabilistica. Comunque, le difficoltà e incertezze connesse alle misurazioni in sito saranno sempre considerevoli per la maggior parte delle rocce esposte prese in esame.

Una comoda procedura di rappresentazione delle lunghezze delle discontinuità è quella di riportare il tipo di terminazione come suggerito dal seguente schema. Le discontinuità che si estendono al di fuori della roccia esposta (x), dovrebbero venire distinte da quelle che terminano nella roccia nell'esposizione (r) e da quelle che terminano contro altre discontinuità nell'esposizione (d). Un sistema di discontinuità che presenta sistematicamente una terminazione del tipo «x» è chiaramente più persistente di un gruppo sub-persistente con terminazioni predominanti del tipo «d». Discontinuità non persistenti presenteranno prevalentemente terminazioni del tipo «r».

Sulla base del valore modale delle lunghezze delle tracce misurate, ogni sistema di discontinuità può essere descritto seguendo lo schema seguente:

- Persistenza molto bassa < 1 m;
- Persistenza bassa: da 1 m a 3 m;
- Persistenza media: da 3 m a 10 m;
- Persistenza alta: da 10 m a 20 m;
- Persistenza molto alta: >20 m.

8.6 Rugosità

L'irregolarità della superficie di una discontinuità è una componente potenzialmente importante per la sua resistenza al taglio, specialmente nel caso di strutture interconnesse e senza spostamenti previi (ad es. fratture senza riempimento). L'importanza della rugosità della superficie diminuisce con l'aumentare dell'apertura, o dello spessore del riempimento, o della misura in cui sono avvenuti spostamenti previi. b) In termini generali, la rugosità di una discontinuità può essere caratterizzata da un'«ondulazione» (forma in grande scala che, se i lembi della discontinuità sono interconnessi e ben a contatto, provoca la «dilatazione» durante lo scorrimento trasversale, poiché le ondulazioni sono troppo ampie per essere tranciate) e da una «rugosità » vera e propria (forma in piccola scala che

tende ad essere rotta durante lo scorrimento trasversale a meno che i lembi della discontinuità non possiedano un'alta resistenza e/o il livello di tensione normale sia basso, cosicché la dilatanza può ancora manifestarsi su queste strutture in piccola scala). c) In pratica l'ondulazione influisce sulla direzione iniziale dello scorrimento a taglio relativo al piano medio di discontinuità, mentre la rugosità influisce sulla resistenza al taglio che potrebbe essere facilmente determinata in laboratorio o con una prova di taglio diretto «in situ» (Figura 45).

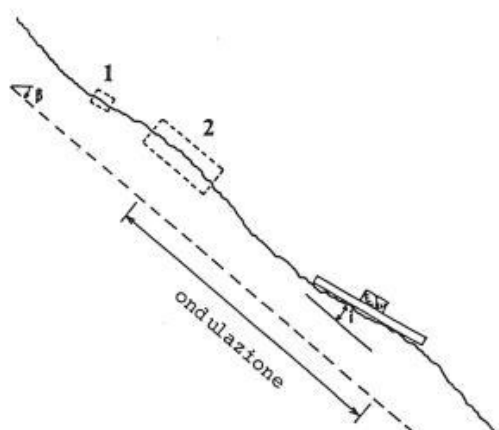


Figura 45: Le rugosità in diversa scala delle discontinuità sono determinate con prove su scala differente (1: prova di taglio in laboratorio, 2: prove di taglio in situ). L'ondulazione può essere caratterizzata con l'angolo "I" I.S.M.R. (1993).

In caso di limiti di tempo che possono impedire l'uso di tecniche più complesse, riportate nelle raccomandazioni I.S.R.M., la descrizione della rugosità sarà limitata a termini descrittivi, che dovrebbero basarsi su due scale di osservazione: scala piccola (diversi centimetri), scala intermedia (diversi metri).

Le classi di rugosità sono le seguenti:

- I: Rugosa (o irregolare), segmentata;
- II: Liscia segmentata;
- III: Levigata, segmentata;
- IV: Rugosa (o irregolare), ondulata;
- V: Liscia, ondulata;
- VI: Levigata, ondulata;
- VII: Rugosa (o irregolare), piana;
- VIII: Liscia, piana;
- IX: Levigata, piana.

La rugosità a piccola scala, inoltre, è stata espressa attraverso l'indice JRC (Joint Roughness Coefficient) valutato tramite confronto con profili di scabrezza riportati in Figura 47.

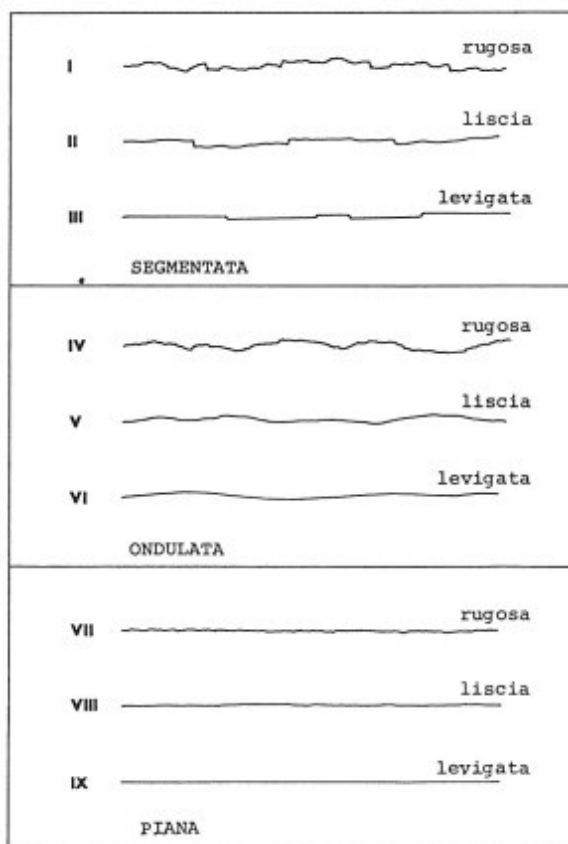


Figura 46: Tipici profili di rugosità e relative nomenclature suggerite.

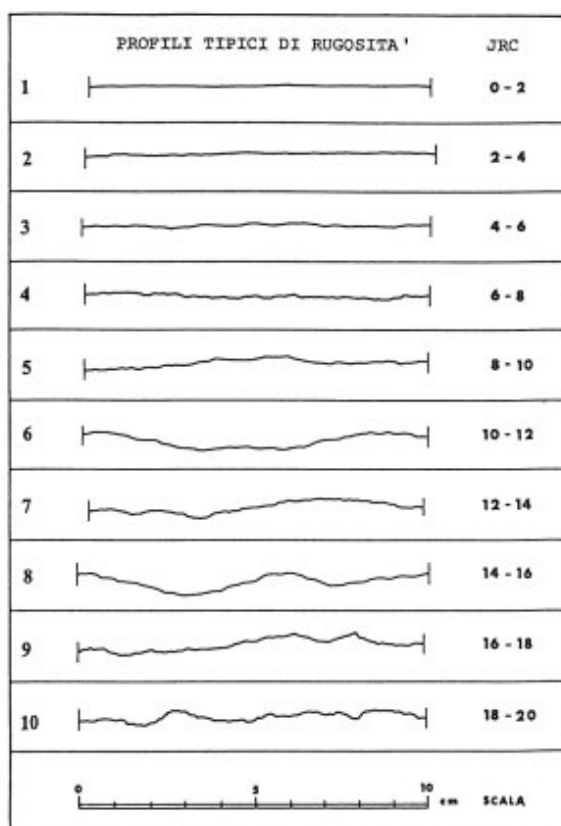


Figura 47: Profili di rugosità e relativo indice JRC.

8.7 Resistenza a compressione delle pareti delle discontinuità

La resistenza a compressione della roccia costituente le pareti di una discontinuità è una componente molto importante della sua resistenza a taglio e della deformabilità specialmente se le superfici sono direttamente a contatto come nel caso delle fratture non riempite. Limitati spostamenti trasversali sulle singole fratture, causati da sollecitazioni di taglio all'interno della massa rocciosa, danno spesso origine ad aree di contatto delle rugosità molto ridotte; su di esse la tensione normale approssima o supera la resistenza a compressione del materiale costituente le pareti rocciose; da ciò la rottura delle asperità. Le masse rocciose sono frequentemente soggette all'azione degli agenti atmosferici vicino alla superficie e, talvolta, sono alterate per effetto di processi idrotermali. Questi tipi di alterazione interessano più le superfici di discontinuità che l'interno dei blocchi di roccia. Ciò fa sì che la resistenza sulla superficie sia minore di quella misurata sulla roccia integra che si trova all'interno del blocco, per esempio ottenuta mediante carotaggio. Quindi, la descrizione dello stato di alterazione rocciosa è un elemento essenziale dello studio della resistenza delle pareti delle discontinuità. Due sono i principali effetti dell'azione di agenti atmosferici: uno dovuto essenzialmente alla «disgregazione meccanica», l'altro alla «decomposizione chimica», compresi i processi di dissoluzione. Generalmente questi agiscono contemporaneamente ma, a seconda del regime climatico, l'uno o l'altro può prevalere. L'alterazione meccanica ha come effetti l'ampliamento delle discontinuità presenti, la formazione di nuove discontinuità per il fratturarsi delle rocce, l'apertura di fratture intergranulari e la rottura o lo

sfaldamento dei singoli individui mineralogici. Le alterazioni chimiche si manifestano con una decolorazione della roccia e conducono ad un'eventuale decomposizione dei minerali silicatici in minerali argillosi; alcuni minerali, come il quarzo, resistono a questa azione conservandosi inalterati. La dissoluzione è un aspetto dell'alterazione chimica, particolarmente importante nel caso di rocce carbonatiche e saline. d) La resistenza a compressione uniassiale apparente può essere valutata sia con la prova del martello di Schmidt, sia attraverso i saggi di scalfitura col martello da geologo poiché questi ultimi sono stati abbastanza tarati sulla base di una vasta raccolta di prove sperimentali. Le coperture di minerali influenzeranno la resistenza al taglio delle discontinuità in misura notevole, se le superfici sono piane e lisce. Il tipo di copertura dovrà essere descritto quando è possibile. Quando vi siano dubbi, si dovranno prelevare campioni per analisi successive. La procedura mediante prova col martello di Schmidt è consigliata per ottenere una valutazione della resistenza superficiale per successivi calcoli di resistenza al taglio, quando si utilizza il coefficiente di rugosità della superficie (JRC), descritto nel paragrafo 8.6.

Il martello di Schmidt è applicato in direzione perpendicolare alla superficie della discontinuità interessata. La superficie deve essere liberata da particelle sciolte, almeno al di sotto del martello. Se l'impulso della massa battente del martello è in grado di smuovere la superficie provata, la risposta risultante sarà falsata verso il basso. Questo tipo di risultato può essere normalmente riconosciuto poiché accompagnato da un rumore della roccia «a tamburo». Questi risultati dovranno essere scartati. Per le ragioni sopra menzionate, questa prova non è applicabile a masse rocciose sciolte contenenti discontinuità molto ravvicinate. Ogni superficie interessata deve essere saggiata varie volte per avere una serie di risultati rappresentativi. Ad ogni impatto il martello va riposizionato. Le letture più basse di ogni gruppo devono essere scartate e si calcola il valore medio.

Tali valori uniti al valore di densità media della roccia permettono di calcolare il valore di resistenza a compressione monoassiale della roccia in MPa.

Nelle prove mediante martello di Schmidt (tarato per prove in roccia) non è sempre possibile effettuare misurazioni utilizzando il martello in maniera perpendicolare alla discontinuità, per questo serve la tabella di correzione e grafico per correggere l'orientazione del martello (fornito dal costruttore) e del grafico per convertire la risposta di rimbalzo dello strumento in un valore di resistenza uniassiale (MPa) come ad esempio quello riportato in Figura 48.

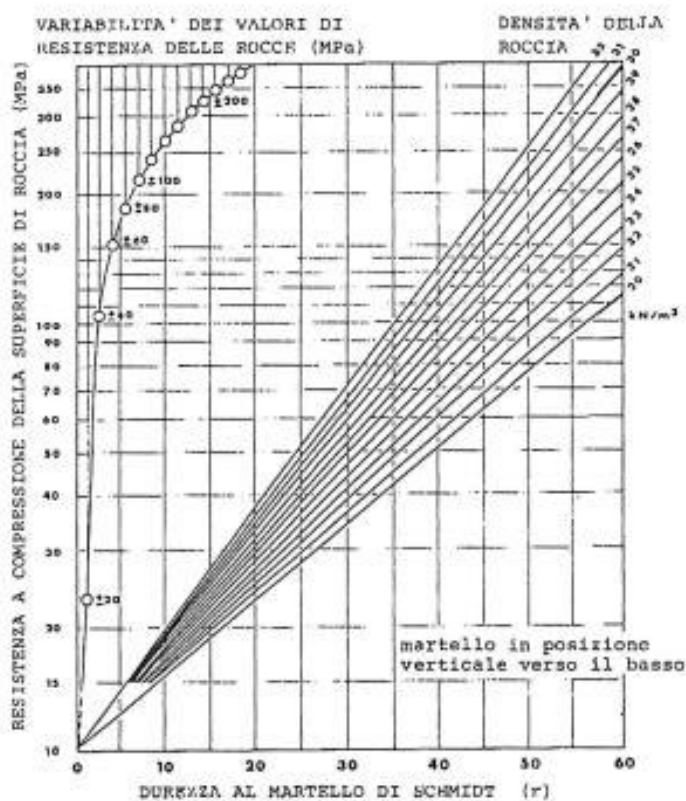


Figura 48: Carta di correlazione per il Martello di Schmidt, tra la densità della roccia, la resistenza a compressione e il valore di rimbalzo.

8.8 Apertura

L'apertura è la distanza perpendicolare che separa le pareti di una discontinuità aperta il cui spazio è riempito da aria o acqua. L'apertura è pertanto distinta dall'ampiezza di una discontinuità riempita (Figura 49). Le discontinuità che sono state riempite (ad es. con argilla) appartengono anch'esse a questa categoria se il materiale di riempimento è stato localmente dilavato. Larghe aperture possono risultare da dislocamenti di taglio su discontinuità aventi apprezzabile rugosità e ondulazione, da movimenti per trazione, da dilavamento e da dissoluzione. Discontinuità molto inclinate o verticali, che si sono aperte per trazione in seguito a processi di erosione valliva o per il ritiro di ghiacciai, possono avere aperture molto larghe. In molte masse rocciose sotterranee le aperture sono piccole e probabilmente sono meno di mezzo millimetro, se confrontate ai 20, 100 o persino migliaia di millimetri di larghezza di alcune discontinuità prodottesi per dilavamento o per trazione. Se le discontinuità sono eccezionalmente lisce e piane, non sarà molto importante ai fini della resistenza al taglio distinguere che l'ampiezza dell'apertura sia di 0, 1 o 1 mm. Tuttavia, come risultato indiretto della conducibilità idraulica, anche le discontinuità con l'apertura più sottile possono essere significative per le variazioni della tensione efficace normale e pertanto anche della resistenza a taglio. Sfortunatamente non si può fare affidamento sulla osservazione visiva per piccole aperture, con la possibile eccezione di fori di sonda e gallerie fresate, poiché le aperture visibili sono limitate dal fatto di avere aperture disturbate sia per l'uso di esplosivo che per gli effetti di alterazione superficiale. L'influenza delle aperture può

essere ben valutata con prove di permeabilità all'acqua (questo è l'oggetto di uno specifico documento della ISRM). Le aperture sono rilevate dal punto di vista sia dell'«allentamento» e sia conducibilità della massa rocciosa.

Sulla base dei risultati dell'apertura una discontinuità può essere classificata come: discontinuità chiusa, discontinuità semi-aperta e discontinuità aperta come riportato in Figura 50.

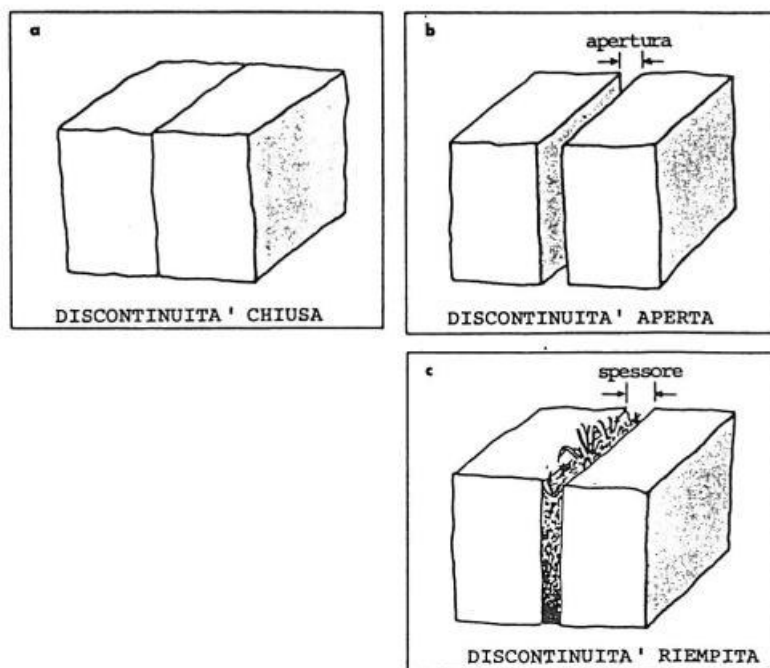


Figura 49: Disegni illustrativi della definizione suggerita di apertura di una discontinuità aperta e di spessore di una discontinuità riempita.

Apertura		Descrizione
<0,1 mm	molto stretta	} discontinuità «chiusa»
0,1-0,25 mm	stretta	
0,25-2,5 mm	parzialmente aperta	
0,5-2,5 mm	aperta	} discontinuità «semi-aperte»
2,5-10 mm	moderatamente larga	
>10 mm	larga	
1-10 cm	molto larga	} discontinuità «aperte»
10-100 cm	estremamente larga	
> 1 m	cavernosa	

Figura 50: Descrizione di una discontinuità in base all'apertura (I.S.R.M., 1993).

8.9 Alterazione

Il grado di alterazione del materiale roccioso, comprendente pure le pareti di singole discontinuità o di un particolare sistema (ad es. quello più sfavorevolmente orientato ai fini della stabilità), dovrebbe essere descritto secondo lo schema della relativa Figura 51.

Denominazione	Descrizione	Grado
Fresca	Non vi sono segni visibili di alterazione del materiale roccioso; tuttalpiù una leggera decolorazione sulla superficie delle maggiori discontinuità.	I
Leggermente alterata	La decolorazione indica un'alterazione del materiale roccioso e delle superfici di discontinuità. Tutto il materiale roccioso può essere decolorato e talvolta può essere esternamente meno resistente della roccia fresca all'interno.	II
Moderatamente alterata	Meno della metà del materiale roccioso è decomposto e/o disgregato come un terreno. Roccia fresca o decolorata è presente o come uno scheletro continuo o all'interno di singoli blocchi.	III
Fortemente alterata	Più della metà del materiale roccioso è decomposto e/o disgregato come un terreno. Roccia fresca o decolorata è presente o come uno scheletro discontinuo o all'interno di singoli blocchi.	IV
Completamente alterata	Tutto il materiale roccioso è decomposto e/o disgregato come un terreno. La struttura massiva originaria è ancora largamente intatta.	V
Suolo residuale	Tutto il materiale roccioso è diventato un terreno. Le strutture della massa e dei materiali rocciosi sono distrutte. Vi è un forte cambiamento di volume ma il terreno non ha subito trasporti significativi.	VI

Figura 51: Grado di alterazione della roccia, il grado I, II etc. che corrisponde alla sigla w1, w2 etc. (I.S.M.R., 1993).

8.10 Riempimento

Riempimento è il termine indicante il materiale che separa le pareti rocciose adiacenti delle discontinuità: per esempio, calcite, clorite, argilla, limo, detrito di faglia, breccia ecc. La distanza perpendicolare tra le pareti di roccia adiacenti è detta «ampiezza» della discontinuità con riempimento, termine diverso da «apertura», che si usa per le discontinuità aperte e vuote. A causa della enorme varietà di situazioni, le discontinuità con riempimento mostrano un'ampia gamma di comportamenti fisici, in particolare per quanto riguarda la loro resistenza a taglio, deformabilità e permeabilità. I comportamenti a lungo e breve termine possono essere completamente differenti cosicché è facile essere ingannati da condizioni favorevoli a breve termine. L'ampia gamma di comportamenti fisici dipende da molti fattori di cui i seguenti sono probabilmente i più importanti:

- I) Mineralogia dei materiali di riempimento,
- II) Classificazione e granulometria delle particelle,
- III) Rapporto di sovra-consolidazione,
- IV) Contenuto d'acqua e permeabilità,
- V) Precedenti spostamenti trasversali,
- VI) Rugosità delle pareti,

VII) Ampiezza,

VIII) Fratturazione o frantumazione delle pareti rocciose.

8.11 Calcolo volume medio del blocco

Il conteggio del volume medio del blocco (J_v) è stato introdotto da Palmstrom nel 1974 (Palmstrom, 2005). Essendo una misura tridimensionale per la densità dei giunti, il calcolo del valore di J_v si applica meglio in contesti dove i giunti sono ben definiti da dei set ricorrenti. Il valore di J_v è definito come il numero di giunti che intersecano un volume di 1 m³.

Dove i giunti sono ben suddivisibili in set:

$$J_v = 1/S_1 + 1/S_2 + 1/S_3 + \dots + 1/S_n$$

Dove S_1 , S_2 ed S_3 sono i valori di spaziatura media tra i diversi set di giunti.

8.12 Calcolo dell'indice di Rock Quality Designation (RQD)

Per il calcolo dell'indice di Rock Mass Designation (RQD) è stata utilizzata la correlazione introdotta da Palmstrom nel 1974, tramite la quale tale parametro viene messo in relazione il volume medio del blocco (J_v) con la seguente formula:

$$RQD = 115 - 3.3J_v$$

Dove $RQD=0$ per valori di $J_v > 35$ e $RQD=100$ per valori di $J_v < 4.5$.

8.13 Criteri di classificazione tecnica dell'ammasso roccioso

La caratterizzazione dell'ammasso roccioso, oggetto dei rilievi, è stata eseguita tramite due differenti classificazioni geomeccaniche.

La prima classificazione geomeccanica utilizzata è la classificazione di Bieniawski (1989). Tale classificazione si basa sulla definizione di sei parametri:

A1 = resistenza a compressione uniassiale;

A2 = Rock Quality Designation Index (Indice RQD);

A3 = spaziatura delle discontinuità;

A4 = condizioni delle discontinuità;

A5 = condizioni idrauliche;

A6 = orientazione delle discontinuità.

Sulla base dei valori di questi sei parametri, e tramite l'utilizzo della tabella in **Figura 52** per l'assegnazione del valore ad ogni singola classe, si possono ricavare:

RMR di base o $RMR_b = A1 + A2 + A3 + A4 + A5$

RMR corretto o $RMR = (A1 + A2 + A3 + A4 + A5) + A6$

A. CLASSIFICATION PARAMETERS AND THEIR RATINGS									
Parameter			Range of values						
1	Strength of intact rock material	Point-load strength index	>10 MPa	4-10 MPa	2-4 MPa	1-2 MPa	For this low range - uniaxial compressive test is preferred		
		Uniaxial comp. strength	>250 MPa	100-250 MPa	50-100 MPa	25-50 MPa	5-25 MPa	1-5 MPa	< 1 MPa
	Rating	15	12	7	4	2	1	0	
2	Drill core Quality <i>RQD</i>		90%-100%	75%-90%	50%-75%	25%-50%	< 25%		
	Rating		20	17	13	8	3		
3	Spacing of discontinuities		> 2 m	0.6-2 . m	200-600 mm	60-200 mm	< 60 mm		
	Rating		20	15	10	8	5		
4	Condition of discontinuities (See E)		Very rough surfaces Not continuous No separation Unweathered wall rock	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Slightly weathered walls	Slightly rough surfaces Separation < 1 mm Highly weathered walls	Slickensided surfaces or Gouge < 5 mm thick or Separation 1-5 mm Continuous	Soft gouge >5 mm thick or Separation > 5 mm Continuous		
	Rating		30	25	20	10	0		
5	Ground water	Inflow per 10 m tunnel length (l/m)	None	< 10	10-25	25-125	> 125		
		(Joint water press/ (Major principal σ)	0	< 0.1	0.1-0.2	0.2-0.5	> 0.5		
	General conditions		Completely dry	Damp	Wet	Dripping	Flowing		
	Rating		15	10	7	4	0		

Figura 52: Rock Mass Rating (Bieniawski, 1989).

Per gli scopi di questo lavoro, verrà utilizzato il parametro RMR_b . Per completezza però il parametro $A6$ per il calcolo dell' RMR è definito sulla base delle orientazioni delle discontinuità in rapporto alla direzione di scavo e alla tipologia (galleria o fondazioni). Per quanto riguarda i versanti, i valori di $A6$ proposti da Bieniawski risultano essere troppo conservativi e quindi non utilizzati.

La seconda classificazione geomeccanica utilizzata è quella del Geological Strength Index (GSI, Hoek, Kaiser e Bawden, 1995, Hoek & Marinos, 2000). La classificazione GSI (**Figura 53**, Hoek et al., 1998) è stata introdotta per rappresentare le caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso a prescindere dalle condizioni strettamente legate al contesto di analisi (condizioni di umidità, stato tensionale, orientazione delle discontinuità nei confronti dell'opera). Il valore di GSI può essere ricavato sia mediante l'uso della **Figura 53**, sia analiticamente. Il valore di GSI analiticamente può essere ricavato direttamente dagli indici RMR secondo diverse equazioni. Quella utilizzata è la seguente:

$$GSI = RMR_b - 5 \text{ (Hoek \& Marinos, 2000)}$$


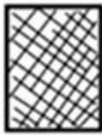




GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS		SURFACE CONDITIONS				
		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE—intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90				
	BLOCKY—well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80	70			
	VERY BLOCKY—interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		60			
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY—folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40		
	DISINTEGRATED—poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				20	
	LAMINATED/SHEARED—Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes					10

Figura 53: Tabella per la determinazione del Geological Strength Index (GSI), Hoek et al., 1998.

8.14 Stazioni di Misura

8.14.1 Stop S1.1

Lo stop S1.1 (**Figura 54**) è situato in sponda sinistra, l'ammasso roccioso presenta una granulometria media e l'affioramento nella sua interezza ha una superficie di circa 5 metri quadrati, la giacitura media del pendio nell'area di rilievo è 180/45.

L'ammasso roccioso si presenta debolmente alterato, asciutto, e mediamente fratturato. L'orientazione delle famiglie di fratture (**Tabella 28**) suddivide i blocchi in forma prismatica. Le superfici di discontinuità si presentano debolmente alterate, le discontinuità si presentano da chiuse ad un massimo di apertura di 2mm.

Le fratture aperte sono riempite da sabbia composta dello stesso materiale delle pareti. Le superfici di discontinuità si presentano con superfici da ondulate a scalinate, e da lisce a rugose.

Per lo stop S1.1 i valori di J_v e RQD, calcolati tramite le formule di Palmstrom (1974), sono riportati nella **Tabella 29**, sono quindi stati calcolati i valori di RMRb (Bieniawski, 1989) e GSI (Hoek et al., 1998). Nella **Tabella 30** sono stati riportati i singoli valori per il calcolo dell'RMR base, il valore calcolato dell'RMR base e il valore di GSI.

In **Figura 55** sono riportate le giaciture delle discontinuità rilevate, mediante il Reticolo di Schmidt.

Caratterizzazione delle famiglie di fratture											
Fam.	Giacit.	Spaziatura		Persistenza		Apertura		JRC		JCS	
		media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st
[-]	[°/°]	[cm]	[cm]	[%]	[%]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[MPa]	[MPa]
1	210/24	36	4,65	100	0	0	0	8-10	0	96	1,41
2	90/40	41	7,19	70	28,24	2	0	8-10	0	82	8,48
3	360/70	48	4	90	0	2	0	8-10	0	119	0
4	10/60	42	3,46	100	0	2	0	4-6	0	76	0
5	190/35	42	2,82	50	0	0	0	8-10	0	103	5,65

Tabella 28: Caratteristiche delle principali famiglie di discontinuità individuate nello Stop S1.1.

Jv	RQD
Giunti/m3	[%]
12,1	75,2

Tabella 29: Valori di J_v e RQD calcolati.

STOP	A1	A2	A3	A4	A5	RMRb	GSI
S1.1	12	17	10	13	15	67	62

Tabella 30: Singoli parametri per il calcolo dell'RMRb, valore calcolato dell'RMRb e valore di GSI.



Figura 54: Stesa areale Stop 1.1.

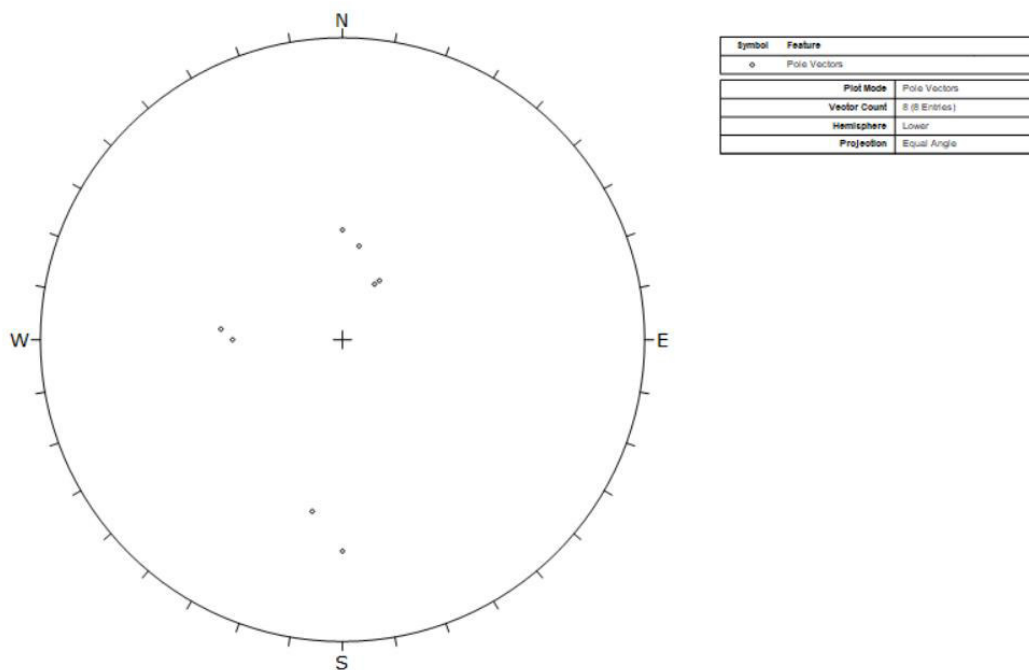


Figura 55: Giaciture delle discontinuità Stop 1.1.

8.14.2 Stazione S1.2

Lo stop S1.2 (**Figura 55**) è situato in sponda sinistra, l'ammasso roccioso presenta una granulometria da media a fine e l'affioramento nella sua interezza ha una superficie di circa 4 metri quadrati, la giacitura media del pendio nell'area di rilievo è 160/40.

L'ammasso roccioso si presenta debolmente alterato, asciutto, e mediamente fratturato. L'orientazione delle famiglie di fratture (**Tabella 31**) suddivide i blocchi in forma prismatica. Le superfici di discontinuità si presentano debolmente alterate, le discontinuità si presentano da chiuse ad un massimo di apertura di 2mm.

Le fratture aperte sono riempite da sabbia composta dello stesso materiale delle pareti. Le superfici di discontinuità si presentano con superfici scalinate, e rugose.

Per lo stop S1.2 i valori di Jv e RQD, calcolati tramite le formule di Palmstron (1974), sono riportati nella **Tabella 32**, sono quindi stati calcolati i valori di RMRb (Bieniawski, 1989) e GSI (Hoek et al., 1998). Nella **Tabella 33** sono stati riportati i singoli valori per il calcolo dell'RMR base, il valore calcolato dell'RMR base e il valore di GSI.

In **Figura 57** sono riportate le giaciture delle discontinuità rilevate, mediante il Reticolo di Schmidt.

Caratterizzazione delle famiglie di fratture											
Fam.	Giacit.	Spaziatura		Persistenza		Apertura		JRC		JCS	
		media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st
[-]	[°/°]	[cm]	[cm]	[%]	[%]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[MPa]	[MPa]
1	160/20	31,25	1,25	70	23,094	1	0	8-10	0	81,5	4,12
2	350/70	30	0	100	0	1	0	8-10	0	62	0
3	110/80	17,5	3,53	60	56	1	0	8-10	0	61,5	16,2
4	310/20	35	0	30	0	1	0	8-10	0	66	0

Tabella 31: Caratteristiche delle principali famiglie di discontinuità individuate nello Stop S1.2.

Jv	RQD
Giunti/m3	[%]
15,1	65,2

Tabella 32: Valori di Jv e RQD calcolati.

STOP	A1	A2	A3	A4	A5	RMRb	GSI
S1.2	12	13	10	14	15	64	59

Tabella 33: Singoli parametri per il calcolo dell'RMRb, valore calcolato dell'RMRb e valore di GSI.



Figura 56: Stesa areale Stop 1.2.

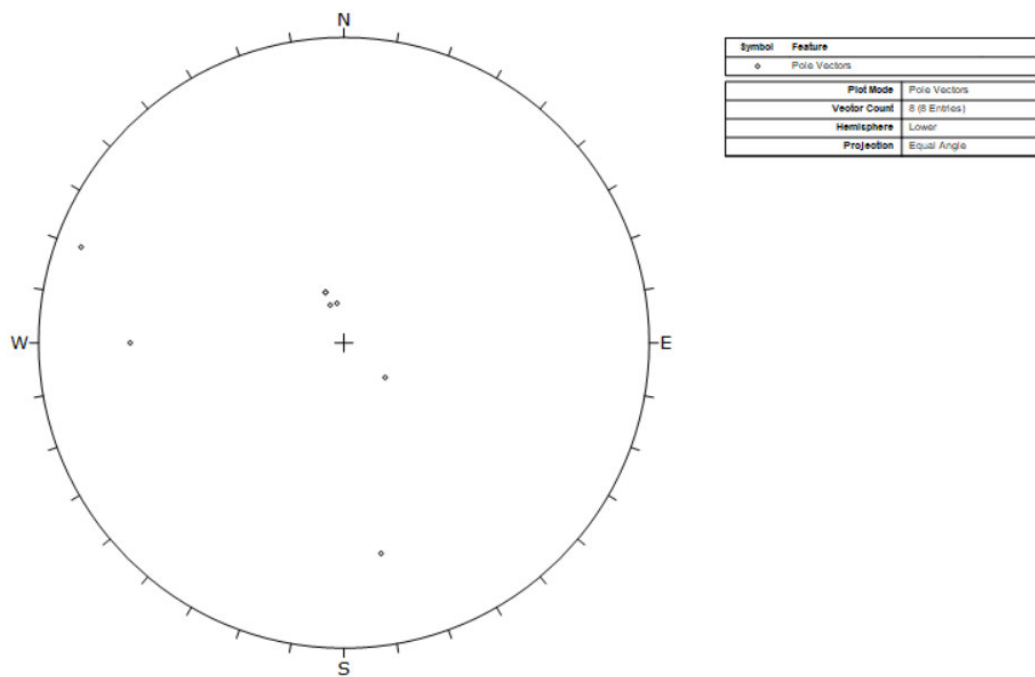


Figura 57: Giaciture delle discontinuità Stop 1.2.

8.14.3 Stazione S1.3

Lo stop S1.3 (**Figura 58**) è situato in sponda sinistra, l'ammasso roccioso presenta una granulometria da media a fine e l'affioramento nella sua interezza ha una superficie di circa 2 metri quadrati, la giacitura media del pendio nell'area di rilievo è 180/45.

L'ammasso roccioso si presenta debolmente alterato, asciutto, e mediamente fratturato. L'orientazione delle famiglie di fratture (**Tabella 34**) suddivide i blocchi in forma prismatica. Le superfici di discontinuità si presentano debolmente alterate, le discontinuità si presentano con aperture dai 2mm fino ad un massimo di 4 mm.

Le fratture aperte sono riempite da sabbia composta dello stesso materiale delle pareti. Le superfici di discontinuità si presentano con superfici da scalinate ad ondulate, e debolmente rugose.

Per lo stop S1.3 i valori di Jv e RQD, calcolati tramite le formule di Palmstron (1974), sono riportati nella **Tabella 35**, sono stati quindi calcolati i valori di RMRb (Bieniawski, 1989) e GSI (Hoek et al., 1998). Nella **Tabella 36** sono stati riportati i singoli valori per il calcolo dell'RMR base, il valore calcolato dell'RMR base e il valore di GSI.

In **Figura 59** sono riportate le giaciture delle discontinuità rilevate, mediante il Reticolo di Schmidt.

Caratterizzazione delle famiglie di fratture											
Fam.	Giacit.	Spaziatura		Persistenza		Apertura		JRC		JCS	
[-]	[°/°]	media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st
		[cm]	[cm]	[%]	[%]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[MPa]	[MPa]
1	90/55	50	0	90	0	4	0	6-8	0	36	0
2	270/60	31	1,41	90	0	2,5	0,7	6-8	0	41,5	20,5
3	180/75	25	5,65	100	0	3	0	6-8	0	80	17
4	20/60	15,5	0,7	100	0	2,5	0,7	10-12	0	64	1,41

Tabella 34: Caratteristiche delle principali famiglie di discontinuità individuate nello Stop S1.3.

Jv	RQD
Giunti/m3	[%]
15,7	63,3

Tabella 35: Valori di Jv e RQD calcolati.

STOP	A1	A2	A3	A4	A5	RMRb	GSI
S1.3	12	13	10	11	15	61	56

Tabella 36: Singoli parametri per il calcolo dell'RMRb, valore calcolato dell'RMRb e valore di GSI.



Figura 58: Stesa areale Stop S1.3.

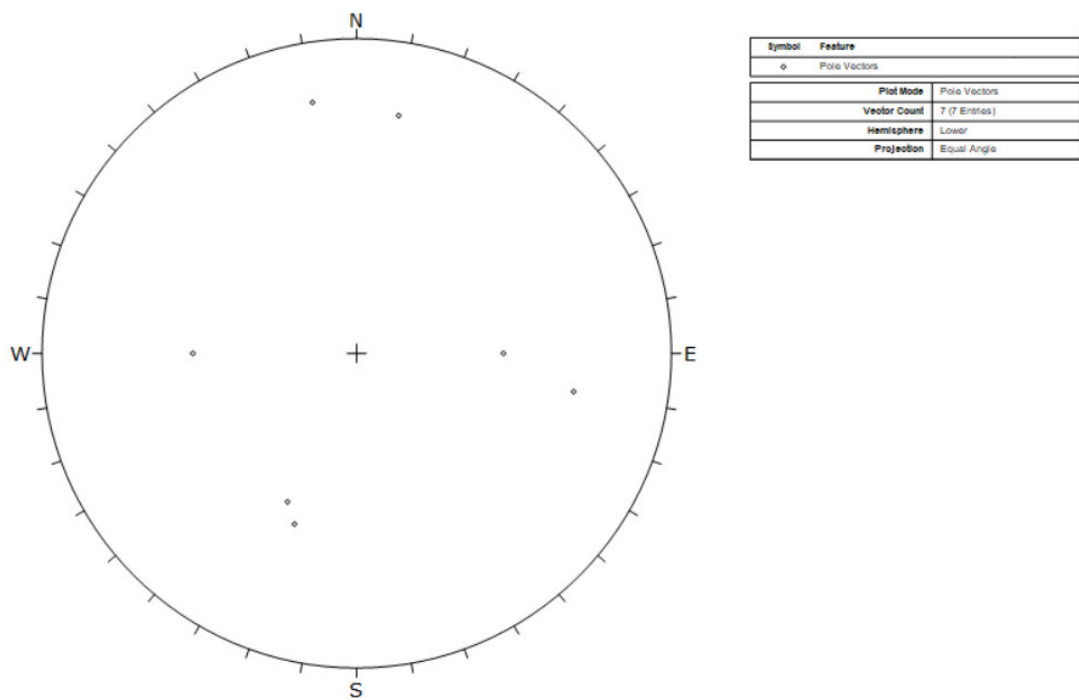


Figura 59: Giaciture delle discontinuità Stop S1.3.

8.14.4 Stazione S1.4

Lo stop S1.4 (**Figura 60**) è situato in sponda sinistra, l'ammasso roccioso presenta una granulometria fine e l'affioramento nella sua interezza ha una superficie di circa 2 metri quadrati, la giacitura media del pendio nell'area di rilievo è 180/45.

L'ammasso roccioso si presenta debolmente alterato, asciutto, e mediamente fratturato. L'orientazione delle famiglie di fratture (**Tabella 37**) suddivide i blocchi in forma prismatica. Le superfici di discontinuità si presentano debolmente alterate, le discontinuità si presentano con aperture da 1mm fino ad un massimo di 4 mm.

Le fratture aperte sono riempite da sabbia composta dello stesso materiale delle pareti. Le superfici di discontinuità si presentano con superfici scalinate e rugose.

Per lo stop S1.4 i valori di Jv e RQD, calcolati tramite le formule di Palmstron (1974), sono riportati nella **Tabella 38**, sono stati quindi calcolati i valori di RMRb (Bieniawski, 1989) e GSI (Hoek et al., 1998). Nella **Tabella 39** sono stati riportati i singoli valori per il calcolo dell'RMR base, il valore calcolato dell'RMR base e il valore di GSI.

In **Figura 61** sono riportate le giaciture delle discontinuità rilevate, mediante il Reticolo di Schmidt.

Caratterizzazione delle famiglie di fratture											
Fam.	Giacit.	Spaziatura		Persistenza		Apertura		JRC		JCS	
		media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st
[-]	[°/°]	[cm]	[cm]	[%]	[%]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[MPa]	[MPa]
1	270/80	31,5	0,7	100	0	2,5	2,12	6-8	0	45,5	0,7
2	160/35	52,5	0,7	90	14,14	1	0	8-10	1,41	69,5	9,19
3	120/80	52,5	2,12	20	0	1	0	6-8	0	74,5	2,12

Tabella 37: Caratteristiche delle principali famiglie di discontinuità individuate nello stop S1.4.

Jv	RQD
Giunti/m3	[%]
7,0	92,0

Tabella 38: Valori di Jv e RQD calcolati.

STOP	A1	A2	A3	A4	A5	RMRb	GSI
S1.4	12	20	10	14	15	71	66

Tabella 39: Singoli parametri per il calcolo dell'RMRb, valore calcolato dell'RMRb e valore di GSI.



Figura 60: Stesa areale Stop S1.4.

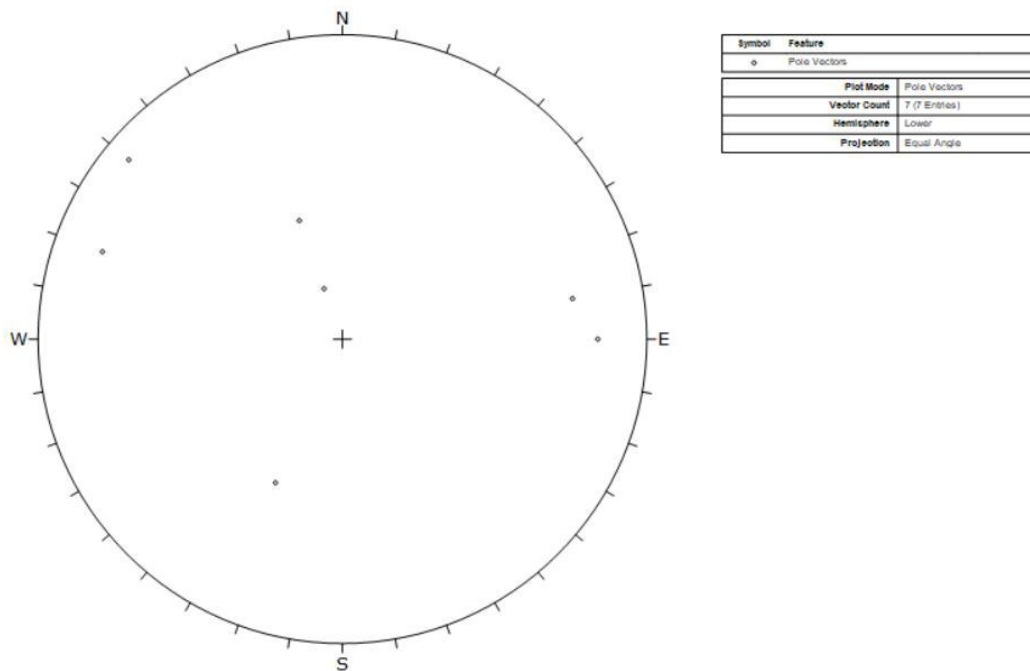


Figura 61: Giaciture delle discontinuità Stop S1.4.

8.14.5 Stazione S2.1

Lo stop S2.1 (**Figura 62**) è situato in sponda sinistra, l'ammasso roccioso presenta una granulometria media e l'affioramento nella sua interezza ha una superficie di circa 2 metri quadrati, la giacitura media del pendio nell'area di rilievo è 200/45.

L'ammasso roccioso si presenta debolmente alterato, asciutto, e mediamente fratturato. L'orientazione delle famiglie di fratture (**Tabella 40**) suddivide i blocchi in forma prismatica. Le superfici di discontinuità si presentano debolmente alterate, le discontinuità si presentano da chiuse ad una apertura di 2mm.

Le fratture aperte sono riempite da sabbia composta dello stesso materiale delle pareti. Le superfici di discontinuità si presentano con superfici ondulate, da lisce a rugose.

Per lo stop S2.1 i valori di Jv e RQD, calcolati tramite le formule di Palmstron (1974), sono riportati nella **Tabella 41**, sono stati quindi calcolati i valori di RMRb (Bieniawski, 1989) e GSI (Hoek et al., 1998). Nella **Tabella 42** sono stati riportati i singoli valori per il calcolo dell'RMR base, il valore calcolato dell'RMR base e il valore di GSI.

In **Figura 63** sono riportate le giaciture delle discontinuità rilevate, mediante il Reticolo di Schmidt.

Caratterizzazione delle famiglie di fratture											
Fam.	Giacit.	Spaziatura		Persistenza		Apertura		JRC		JCS	
[-]	[°/°]	media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st
		[cm]	[cm]	[%]	[%]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[MPa]	[MPa]
1	320/70	13,5	2,12	100	0	2	0	8-10	0	51	4,24
2	130/80	14,25	1,25	100	0	1,75	0,5	8-10	0	59	9,38
3	75/20	100	0	100	0	0	0	6-8	0	72,5	2,12
4	160/15	100	0	100	0	0	0	8-10	0	74	0
5	200/80	41,3	5,5	100	0	1,33	0,57	8-10	0	122	5

Tabella 40: Caratteristiche delle principali famiglie di discontinuità individuate nello Stop S2.1.

Jv	RQD
Giunti/m3	[%]
18,8	52,8

Tabella 41: Valori di Jv e RQD calcolati.

STOP	A1	A2	A3	A4	A5	RMRb	GSI
S2.1	12	13	10	12	15	62	57

Tabella 42: Singoli parametri per il calcolo dell'RMRb, valore calcolato dell'RMRb e valore di GSI.



Figura 62: Stesa areale Stop S2.1.

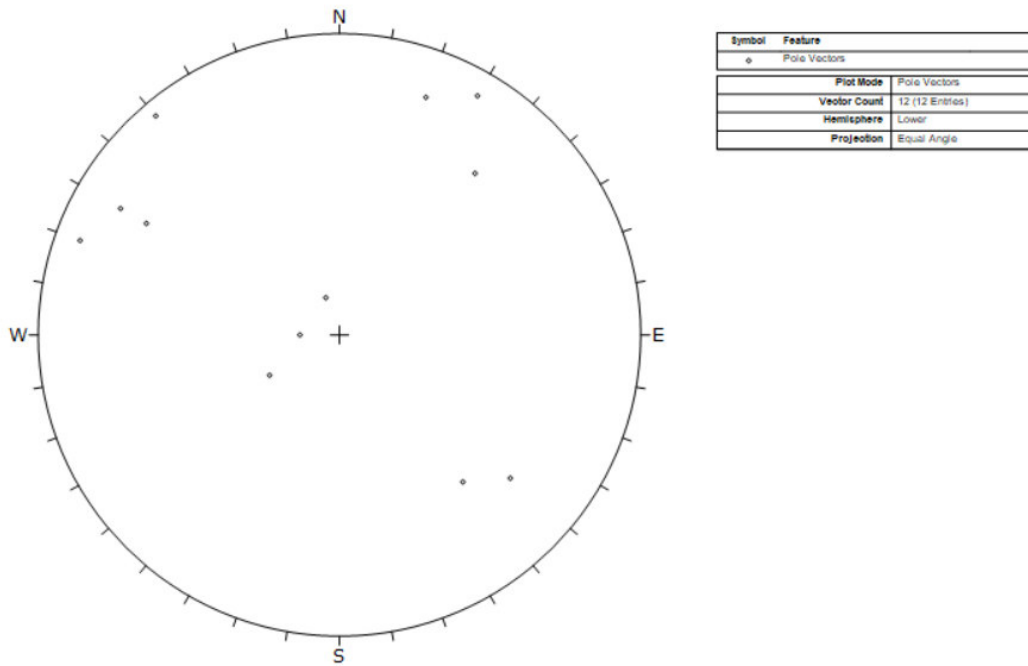


Figura 63: Giaciture delle discontinuità Stop S2.1.

8.14.6 Stazione S2.2

Lo stop S2.2 (**Figura 64**) è situato in sponda sinistra, l'ammasso roccioso presenta una granulometria media e l'affioramento nella sua interezza ha una superficie di circa 10 metri quadrati, la giacitura media del pendio nell'area di rilievo è 200/45.

L'ammasso roccioso si presenta debolmente alterato, asciutto, e mediamente fratturato. L'orientazione delle famiglie di fratture (**Tabella 43**) suddivide i blocchi in forma prismatica. Le superfici di discontinuità si presentano debolmente alterate, le discontinuità si presentano con aperture variabili da 1 fino ad un massimo di 30mm.

Da questo affioramento è visibile, come i sistemi di fratturazione isolino dei blocchi di forma prismatica che potrebbero dare origine a fenomeni di instabilità, in particolare, a fenomeni di crollo o ribaltamento.

Le fratture aperte sono riempite da sabbia composta dello stesso materiale delle pareti. Le superfici di discontinuità si presentano con superfici ondulate, da lisce a rugose.

Per lo stop S2.2 i valori di Jv e RQD, calcolati tramite le formule di Palmstron (1974), sono riportati nella **Tabella 44**, sono stati quindi calcolati i valori di RMRb (Bieniawski, 1989) e GSI (Hoek et al., 1998). Nella **Tabella 45** sono stati riportati i singoli valori per il calcolo dell'RMR base, il valore calcolato dell'RMR base e il valore di GSI.

In **Figura 65** sono riportate le giaciture delle discontinuità rilevate, mediante il Reticolo di Schmidt.

Caratterizzazione delle famiglie di fratture											
Fam.	Giacit.	Spaziatura		Persistenza		Apertura		JRC		JCS	
		media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st
[-]	[°/°]	[cm]	[cm]	[%]	[%]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[MPa]	[MPa]
1	180/70	78,6	3,21	100	0	1	0	4-6	0	192,6	23,8
2	300/45	37,5	10,6	100	0	4	1,41	8-10	0	107,5	16,26
3	130/60	100	0	100	0	5	0	10-12	0	106	0
4	45/80	66,5	2,12	100	0	1	0	6-8	0	109	2,82
5	240/15	60	0	100	0	1	0	6-8	0	79	0
6	90/65	29,5	2,12	80	0	27,5	3,53	10-12	0	87	7,07

Tabella 43: Caratteristiche delle principali famiglie di discontinuità individuate nello Stop S2.2.

Jv	RQD
Giunti/m3	[%]
11,5	77,1

Tabella 44: Valori di Jv e RQD calcolati.

STOP	A1	A2	A3	A4	A5	RMRb	GSI
S2.2	12	17	15	8	15	67	62

Tabella 45: Singoli parametri per il calcolo dell'RMRb, valore calcolato dell'RMRb e valore di GSI.



Figura 64: Stesa areale Stop S2.2.

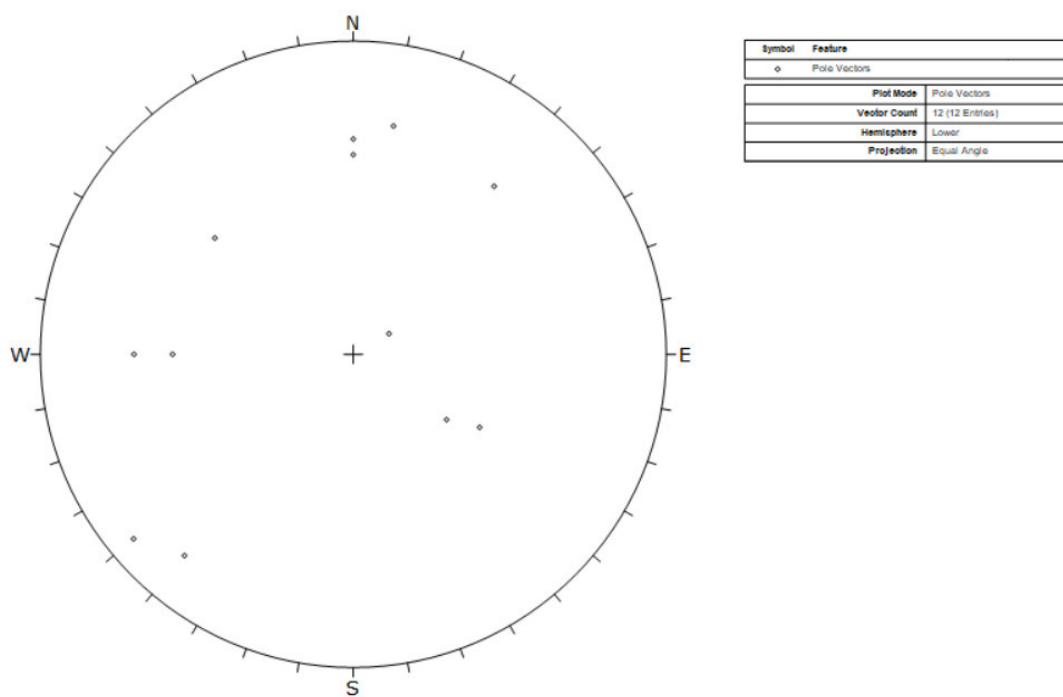


Figura 65: Giaciture delle discontinuità Stop S2.2.

8.14.7 Stazione S2.3

Lo stop S2.3 (**Figura 66**) è situato in sponda sinistra, l'ammasso roccioso presenta una granulometria media e l'affioramento nella sua interezza ha una superficie di circa 10 metri quadrati, la giacitura media del pendio nell'area di rilievo è 200/45.

Data la sua posizione lungo il versante, e l'impossibilità di raggiungerlo in sicurezza, le misure sono state fatte da distante e quindi sono meno solide. Inoltre, non è stato possibile effettuare alcune delle misurazioni realizzate per gli altri Stop.

Da questo affioramento è però visibile, come i sistemi di fratturazione isolino dei blocchi di forma prismatica che potrebbero dare origine a fenomeni di instabilità, in particolare, a fenomeni di scivolamento planare.

In **Figura 67** sono riportate le giaciture delle discontinuità rilevate, mediante il Reticolo di Schmidt.



Figura 66: Stop S2.3.

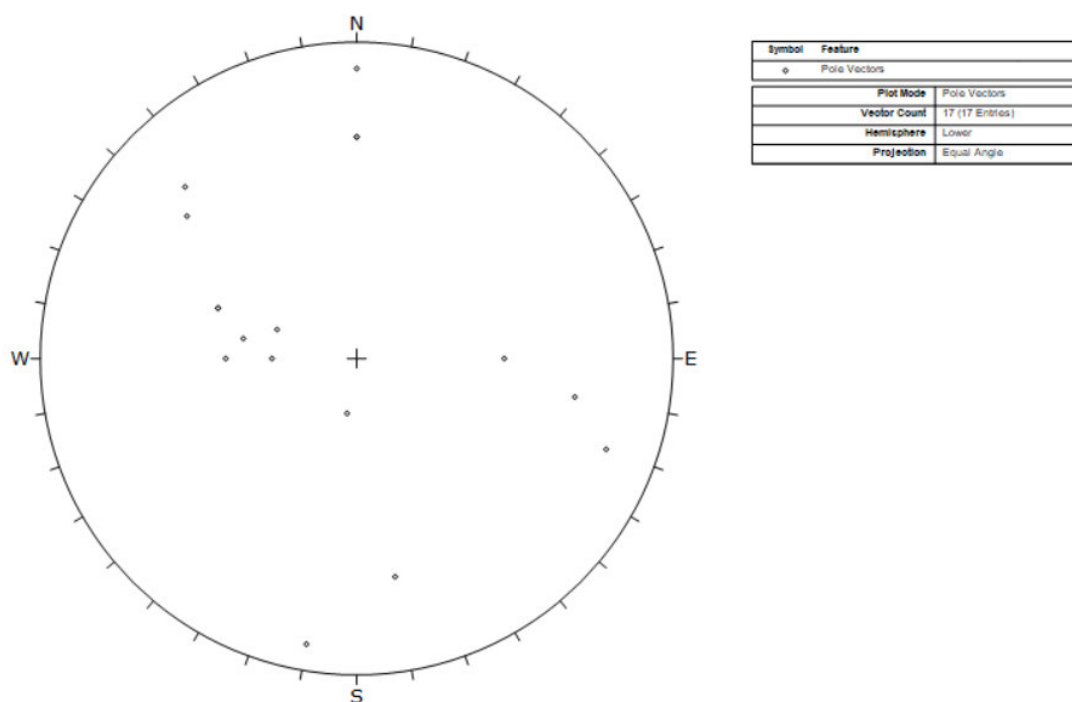


Figura 67: Giaciture delle discontinuità Stop S2.3.

8.14.8 Stazione S2.4

Lo stop S2.2 (**Figura 68**) è situato in sponda sinistra, l'ammasso roccioso presenta una granulometria media e l'affioramento nella sua interezza ha una superficie di circa 3 metri quadrati, la giacitura media del pendio nell'area di rilievo è 220/35.

L'ammasso roccioso si presenta debolmente alterato, asciutto, e mediamente fratturato. L'orientazione delle famiglie di fratture (**Tabella 46**) suddivide i blocchi in forma prismatica. Le superfici di discontinuità si presentano debolmente alterate, le discontinuità si presentano con aperture variabili da 2 fino ad un massimo di 10mm.

Le fratture aperte sono riempite da sabbia composta dello stesso materiale delle pareti. Le superfici di discontinuità si presentano con superfici da scalinate ad ondulate, da lisce a rugose.

Si evidenzia come, appena al di sopra dello Stop S2.4., l'ammasso roccioso si presenti molto alterato a quasi disgregato, come visibile in Figura 68. Solo in questa porzione di ammasso si sono riscontrate tali caratteristiche.

Per lo stop S2.4 i valori di J_v e RQD, calcolati tramite le formule di Palmstron (1974), sono riportati nella **Tabella 47**, sono stati quindi calcolati i valori di RMRb (Bieniawski, 1989) e GSI (Hoek et al., 1998). Nella **Tabella 48** sono stati riportati i singoli valori per il calcolo dell'RMR base, il valore calcolato dell'RMR base e il valore di GSI.

In **Figura 69** sono riportate le giaciture delle discontinuità rilevate, mediante il Reticolo di Schmidt.

Caratterizzazione delle famiglie di fratture											
Fam.	Giacit.	Spaziatura		Persistenza		Apertura		JRC		JCS	
		media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st
[-]	[°/°]	[cm]	[cm]	[%]	[%]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[MPa]	[MPa]
1	130/80	35,5	20,5	25	7,07	6	5,65	6-8	0	115,5	61,52
2	300/60	21	1,41	100	0	2,5	0,7	6-8	0	53	1,41
3	230/70	15,5	0,7	22,5	3,53	1,5	0,7	8-10	0	97,5	61,5
4	20/40	20,5	0,7	100	0	1,5	0,7	10-12	0	77,5	10,6
5	120/80	50	0	30	0	2	0	6-8	0	72	0

Tabella 46: Caratteristiche delle principali famiglie di discontinuità individuate nello Stop S2.4.

Jv	RQD
Giunti/m3	[%]
20,9	46,0

Tabella 47: Valori di Jv e RQD calcolati.

STOP	A1	A2	A3	A4	A5	RMRb	GSI
S2.4	12	8	10	12	15	57	52

Tabella 48: Singoli parametri per il calcolo dell'RMRb, valore calcolato dell'RMRb e valore di GSI.



Figura 68: Stesa areale Stop S2.4.

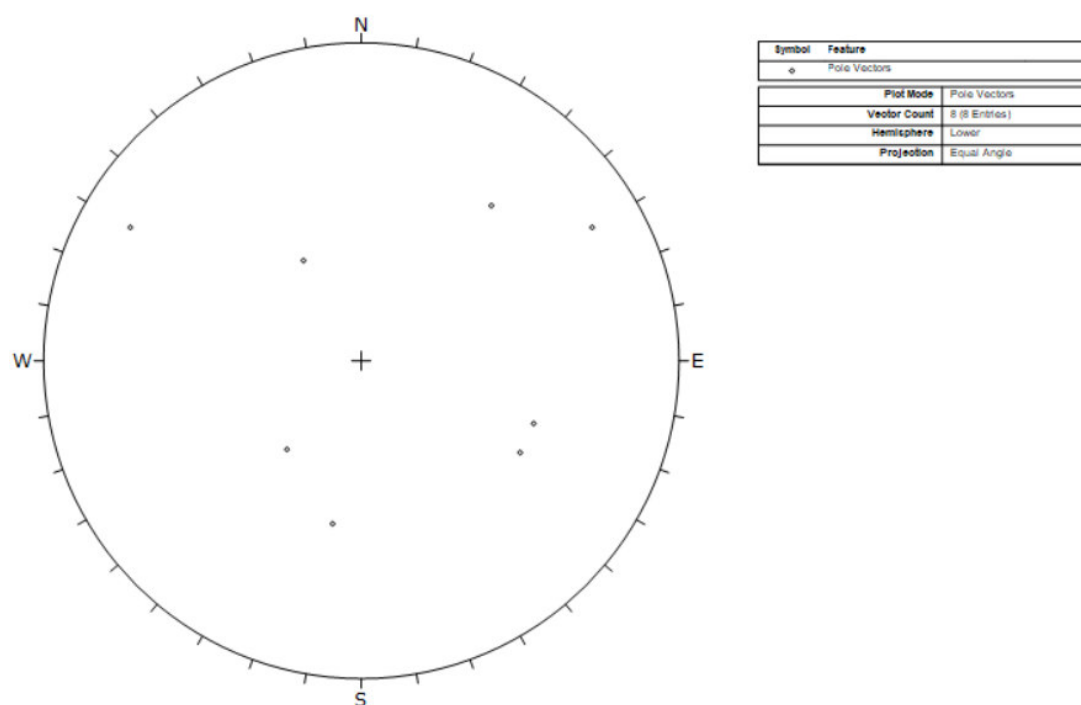


Figura 69: Giaciture delle discontinuità Stop S2.4.

8.14.9 Stazione S3

Lo stop S3 (Figura 70) è situato nella porzione quasi alla base della valle, quasi in corrispondenza del centro dell'imposta della diga. L'ammasso roccioso presenta una granulometria media e l'affioramento nella sua interezza ha una superficie di circa 3 metri quadrati, la giacitura media del pendio nell'area di rilievo è 200-220/45.

Questo affioramento presenta oltre alle fratture, anche un set di vene estensionali, riempite di quarzo, con crescita dei cristalli perpendicolari alle pareti della vena e un'apertura di circa 1-1,5 cm. Nella **Tabella 49** le caratteristiche di tali vene sono riportate nella famiglia 5.

Nell'ottica di determinazione generale delle famiglie di discontinuità, le vene, non verranno prese in considerazione, in quanto non sono state riscontrate in nessun altro Stop e quindi non significative in ottica generale.

L'ammasso roccioso si presenta debolmente alterato, asciutto, e mediamente fratturato. L'orientazione delle famiglie di fratture (**Tabella 49**) suddivide i blocchi in forma prismatica. Le superfici di discontinuità si presentano debolmente alterate, le discontinuità si presentano con aperture variabili da 1 fino ad un massimo di 10 mm.

Le fratture aperte sono riempite da sabbia composta dello stesso materiale delle pareti. Le superfici di discontinuità si presentano con superfici ondulate, da lisce a rugose.

Per lo stop S3 i valori di Jv e RQD, calcolati tramite le formule di Palmstron (1974), sono riportati nella **Tabella 50**, sono stati quindi calcolati i valori di RMRb (Bieniawski, 1989) e GSI (Hoek et al., 1998).

Nella **Tabella 51** sono stati riportati i singoli valori per il calcolo dell'RMR base, il valore calcolato dell'RMR base e il valore di GSI.

In **Figura 71** sono riportate le giaciture delle discontinuità rilevate, mediante il Reticolo di Schmidt.

Caratterizzazione delle famiglie di fratture											
Fam.	Giacit.	Spaziatura		Persistenza		apertura		JRC		JCS	
		media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st
[-]	[°/°]	[cm]	[cm]	[%]	[%]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[MPa]	[MPa]
1	160/65	11	1,41	50	0	6,5	4,94	6-8	0	188,5	14,84
2	300/45	29	1	80	0	1,66	0,57	8-10	0	101,33	19,5
3	180/70	100	0	100	0	1,5	0,7	10-12	0	124,5	6,36
4	130/45	80	0	80	0	2	0	6-8	0	120	0
5	125/45	12,5	3,53	100	0	12,5	3,53	10-12	0	68	1,41

Tabella 49: Caratteristiche delle principali famiglie di discontinuità individuate nello Stop S3.

Jv	RQD
Giunti/m3	[%]
22,8	39,8

Tabella 50: Valori di Jv e RQD calcolati.

STOP	A1	A2	A3	A4	A5	RMRb	GSI
S3	12	8	10	9	15	54	49

Tabella 51: Singoli parametri per il calcolo dell'RMRb, valore calcolato dell'RMRb e valore di GSI.



Figura 70: Stesa areale S3.

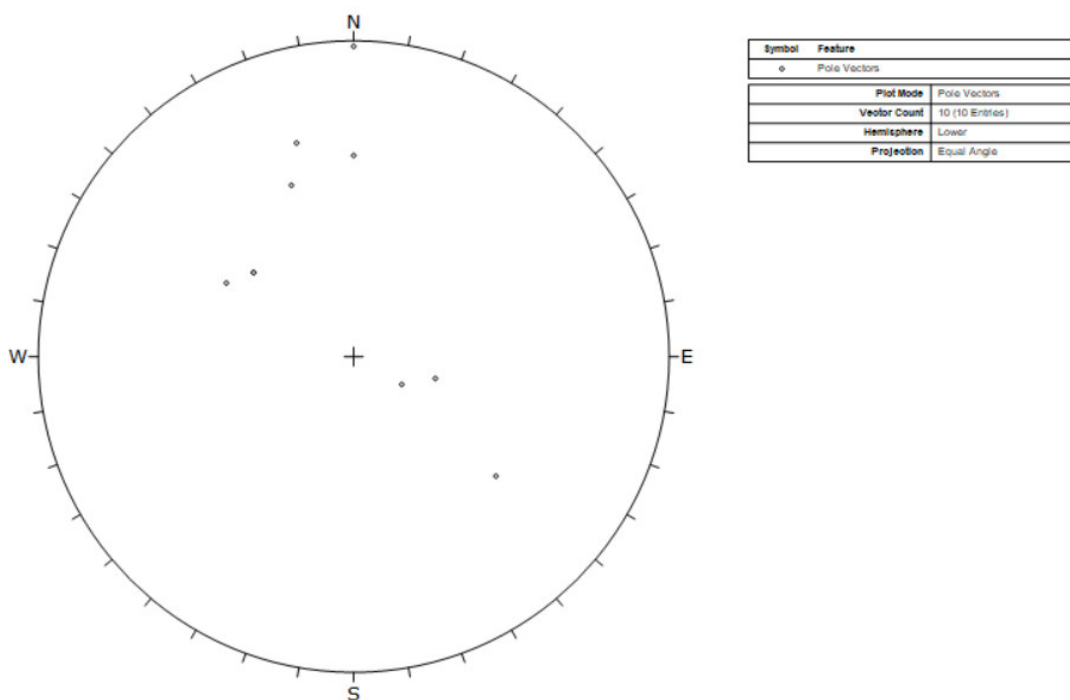


Figura 71: Giaciture delle discontinuità Stop S3.

8.14.10 Stazione S4.1

Lo stop S4.1 (**Figura 72**) è situato in sponda destra, l'ammasso roccioso presenta una granulometria media e l'affioramento nella sua interezza ha una superficie di circa 10 metri quadrati, la giacitura media del pendio nell'area di rilievo è 30/80.

Questo affioramento è localizzato tra le arcate del muro sopra le scalette che permettono di raggiungere la base della diga, presenti in sponda destra. Questo affioramento è caratterizzato da una zona di fratturazione preferenziale caratterizzata da poca deformazione della roccia incassante e del riempimento. Lo spessore di tale zona va da un massimo di 30-35 cm fino a ridursi a 5-10 cm, per una lunghezza totale di circa 10 metri. La zona di danneggiamento è costituita da breccie della roccia incassante e da riempimento fine completamente disgregato. Non sono presenti indicatori cinematici quali striature o "chatter-marks"; l'unico indicatore, minimo, di movimento, è rappresentato dalla forma dei clasti all'interno della breccia, che sembrerebbero indicare uno spostamento complesso, con movimento principale sinistro.

L'ammasso roccioso si presenta debolmente alterato, prevalentemente asciutto anche se, come visibile in **Figura 72**, le pareti delle discontinuità verticali siano bagnate. L'ammasso roccioso generalmente è mediamente fratturato. L'orientazione delle famiglie di fratture (**Tabella 52**) suddivide i blocchi in forma prismatica. Le superfici di discontinuità si presentano debolmente alterate, le discontinuità si presentano con aperture variabili da 1 fino ad un massimo di 10mm.

Le fratture aperte sono riempite da sabbia composta dello stesso materiale delle pareti. Le superfici di discontinuità si presentano con superfici da scalinate ad ondulate, da lisce a rugose.

Per lo stop S4.1 i valori di Jv e RQD, calcolati tramite le formule di Palmstron (1974), sono riportati nella **Tabella 53**, sono stati quindi calcolati i valori di RMRb (Bieniawski, 1989) e GSI (Hoek et al., 1998). Nella **Tabella 54** sono stati riportati i singoli valori per il calcolo dell'RMR base, il valore calcolato dell'RMR base e il valore di GSI.

In **Figura 73** sono riportate le giaciture delle discontinuità rilevate, mediante il Reticolo di Schmidt.

Caratterizzazione delle famiglie di fratture											
Fam.	Giacit.	Spaziatura		Persistenza		apertura		JRC		JCS	
		media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st
[-]	[°/°]	[cm]	[cm]	[%]	[%]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[MPa]	[MPa]
1	200/85	11,5	0,7	100	0	1	0	8-10	0	124,5	6,36
2	22/45	20,5	0,7	100	0	2	0	6-8	0	210	14,14
3	340/70	30,5	0,7	80	0	1	0	4-6	0	117,5	27,57
4	65/40	28,5	0,7	90	14,14	2	1,41	4-6	0	123,5	44,54
5	230/70	30	0	100	0	10	0	8-10	0	36	5,65

Tabella 52: Caratteristiche delle principali famiglie di discontinuità individuate nello Stop S4.1.

Jv	RQD
Giunti/m3	[%]
23,7	36,8

Tabella 53: Valori di Jv e RQD calcolati.

STOP	A1	A2	A3	A4	A5	RMRb	GSI
S4.1	12	8	10	11	10	51	46

Tabella 54: Singoli parametri per il calcolo dell'RMRb, valore calcolato dell'RMRb e valore di GSI.



Figura 72: Stesa areale Stop 4.1.

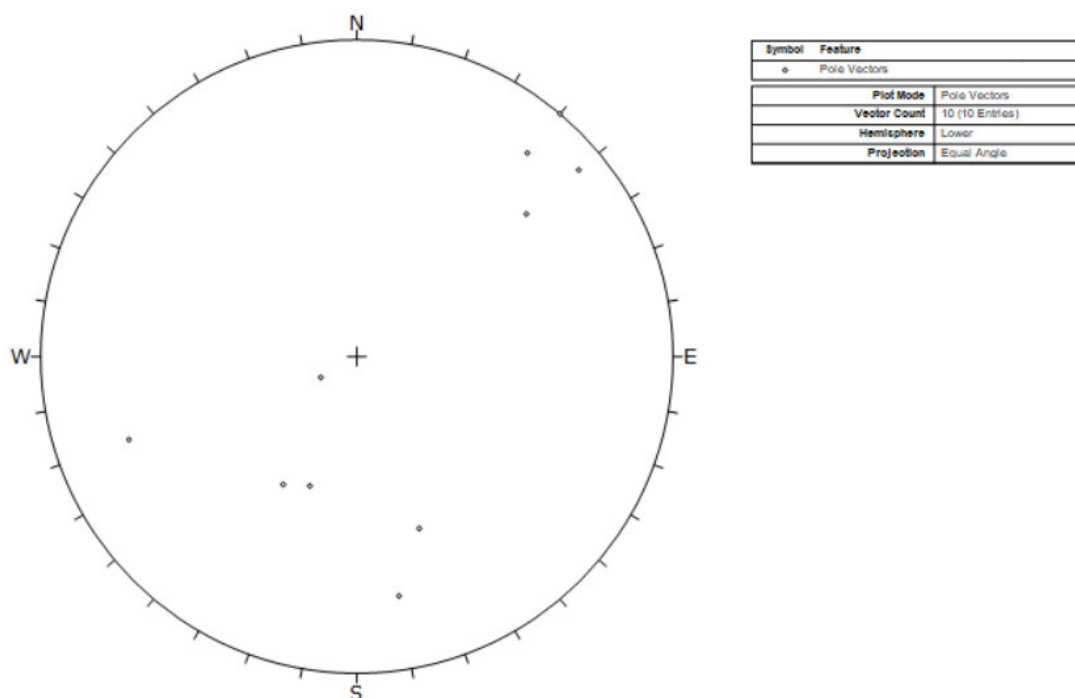


Figura 73: Giaciture delle discontinuità Stop S4.1.

8.14.11 Stazione S4.2

Lo stop S4.2 (**Figura 74**) è situato in sponda destra, l'ammasso roccioso presenta una granulometria media e l'affioramento nella sua interezza ha una superficie di circa 15 metri quadrati, la giacitura media del pendio nell'area di rilievo è 10/80.

Adiacente all'area dello Stop è presente una vena aplitico-pegmatitico di spessore massimo di circa 25-30 cm.

L'ammasso roccioso si presenta debolmente alterato, asciutto, e mediamente fratturato. L'orientazione delle famiglie di fratture (**Tabella 55**) suddivide i blocchi in forma prismatica. Le superfici di discontinuità si presentano debolmente alterate, le discontinuità si presentano da chiuse ad aperte con aperture variabili fino a 2 mm.

Le fratture aperte sono riempite da sabbia composta dello stesso materiale delle pareti. Le superfici di discontinuità si presentano con superfici da scalinate ad ondulate, da lisce a rugose.

Per lo stop S4.2 i valori di J_v e RQD, calcolati tramite le formule di Palmstron (1974), sono riportati nella **Tabella 56**, sono stati quindi calcolati i valori di RMRb (Bieniawski, 1989) e GSI (Hoek et al., 1998). Nella **Tabella 57** sono stati riportati i singoli valori per il calcolo dell'RMR base, il valore calcolato dell'RMR base e il valore di GSI.

In **Figura 75** sono riportate le giaciture delle discontinuità rilevate, mediante il Reticolo di Schmidt.

Caratterizzazione delle famiglie di fratture											
Fam.	Giacit.	Spaziatura		Persistenza		apertura		JRC		JCS	
		media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st
[-]	[°/°]	[cm]	[cm]	[%]	[%]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[MPa]	[MPa]
1	160/60	19,66	15,88	100	0	1,5	0,7	2-4	0	149	27,51
2	345/50	29,5	0,7	50	0	0	0	2-4	0	152	1,41
3	45/70	38,75	2,629956	50	0	0,25	0,5	6-8	2,82	135	88

Tabella 55: Caratteristiche delle principali famiglie di discontinuità individuate nello Stop S4.2.

Jv	RQD
Giunti/m3	[%]
11,1	78,5

Tabella 56: Valori di Jv e RQD calcolati.

STOP	A1	A2	A3	A4	A5	RMRb	GSI
S4.2	12	17	10	16	15	70	65

Tabella 57: Singoli parametri per il calcolo dell'RMRb, valore calcolato dell'RMRb e valore di GSI.



Figura 74: Stesa areale Stop S4.2.

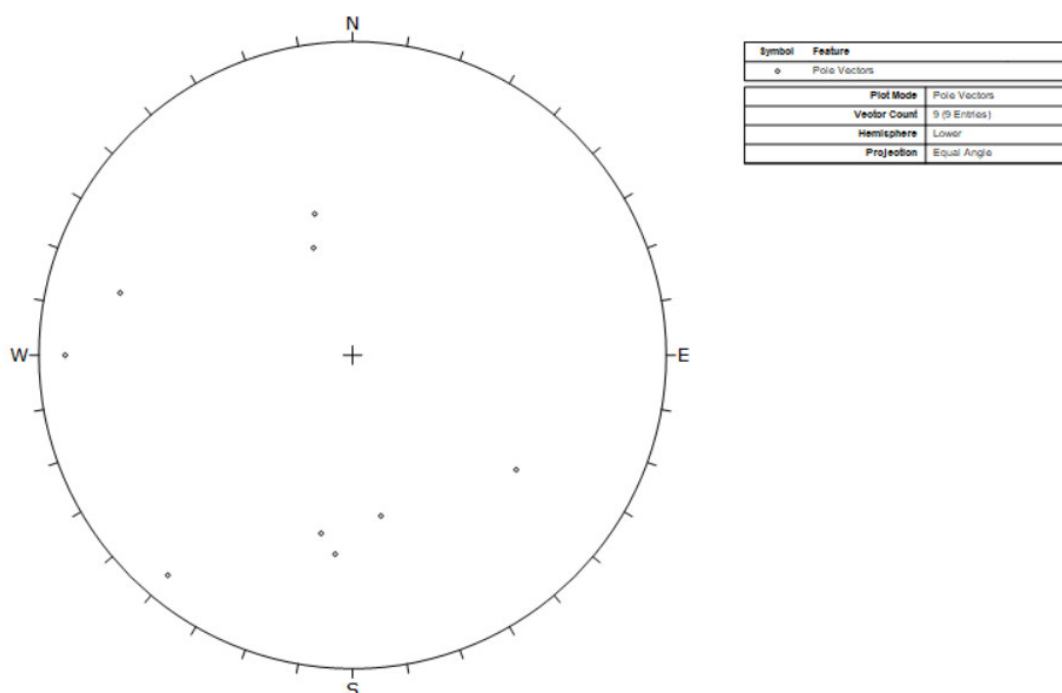


Figura 75: Giaciture delle discontinuità Stop S4.2.

8.14.12 Stazione S4.3

Lo stop S4.3 (**Figura 76**) è situato in sponda destra, l'ammasso roccioso presenta una granulometria media e l'affioramento nella sua interezza ha una superficie di circa 2 metri quadrati, la giacitura media del pendio nell'area di rilievo è 350/80.

L'ammasso roccioso si presenta debolmente alterato, asciutto, e mediamente fratturato. L'orientazione delle famiglie di fratture (**Tabella 58**) suddivide i blocchi in forma prismatica. Le superfici di discontinuità si presentano debolmente alterate, le discontinuità si presentano da chiuse ad aperte con aperture variabili fino a 2 mm.

Le fratture aperte sono riempite da sabbia composta dello stesso materiale delle pareti. Le superfici di discontinuità si presentano con superfici da scalinate ad ondulate, da lisce a rugose.

Per lo stop S4.3 i valori di J_v e RQD, calcolati tramite le formule di Palmstron (1974), sono riportati nella **Tabella 59**, sono stati quindi calcolati i valori di RMRb (Bieniawski, 1989) e GSI (Hoek et al., 1998). Nella **Tabella 60** sono stati riportati i singoli valori per il calcolo dell'RMR base, il valore calcolato dell'RMR base e il valore di GSI.

In **Figura 77** sono riportate le giaciture delle discontinuità rilevate, mediante il Reticolo di Schmidt.

Caratterizzazione delle famiglie di fratture											
Fam.	Giacit.	Spaziatura		Persistenza		apertura		JRC		JCS	
		media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st
[-]	[°/°]	[cm]	[cm]	[%]	[%]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[MPa]	[MPa]
1	340/70	29	1,41	70	0	0	0	4-6	0	151	0
2	30/75	48,5	0,7	100	0	0	0	4-6	0	101,5	13,43
3	285/70	20,5	0,7	100	0	1,5	0,7	8-10	0	179	4,24
4	170/35	49,5	0,7	80	0	1	0	10-12	0	78	4,24

Tabella 58: Caratteristiche delle principali famiglie di discontinuità individuate nello Stop S4.3.

Jv	RQD
Giunti/m3	[%]
12,4	74,1

Tabella 59: Valori di Jv e RQD calcolati.

STOP	A1	A2	A3	A4	A5	RMRb	GSI
S4.3	12	13	10	21	15	71	66

Tabella 60: Singoli parametri per il calcolo dell'RMRb, valore calcolato dell'RMRb e valore di GSI.



Figura 76: Stesa areale S4.3.

Caratterizzazione delle famiglie di fratture											
Fam.	Giacit.	Spaziatura		Persistenza		apertura		JRC		JCS	
		media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st	media	dev.st
[-]	[°/°]	[cm]	[cm]	[%]	[%]	[mm]	[mm]	[-]	[-]	[MPa]	[MPa]
1	340/80	100	0	100	0	35	21,21	6-8	0	103	0
2	175/40	29,5	0,7	20	0	2	0	8-10	0	52	0
3	100/70	30,33	0,57	76,66	23,09	3,66	0,57	8-10	0	63	0
4	280/79	100	0	100	0	50	0	8-10	0	52	0
5	215/84	100	0	100	0	32,5	3,53	2-4	0	56,5	6,36

Tabella 61: Caratteristiche delle principali famiglie di discontinuità individuate nello Stop S4.4.

Jv	RQD
Giunti/m3	[%]
9,7	83,0

Tabella 62: Valori di Jv e RQD calcolati.

STOP	A1	A2	A3	A4	A5	RMRb	GSI
S4.4	12	17	15	9	15	68	63

Tabella 63: Singoli parametri per il calcolo dell'RMRb, valore calcolato dell'RMRb e valore di GSI.



Figura 78: Stesa areale Stop S4.4.

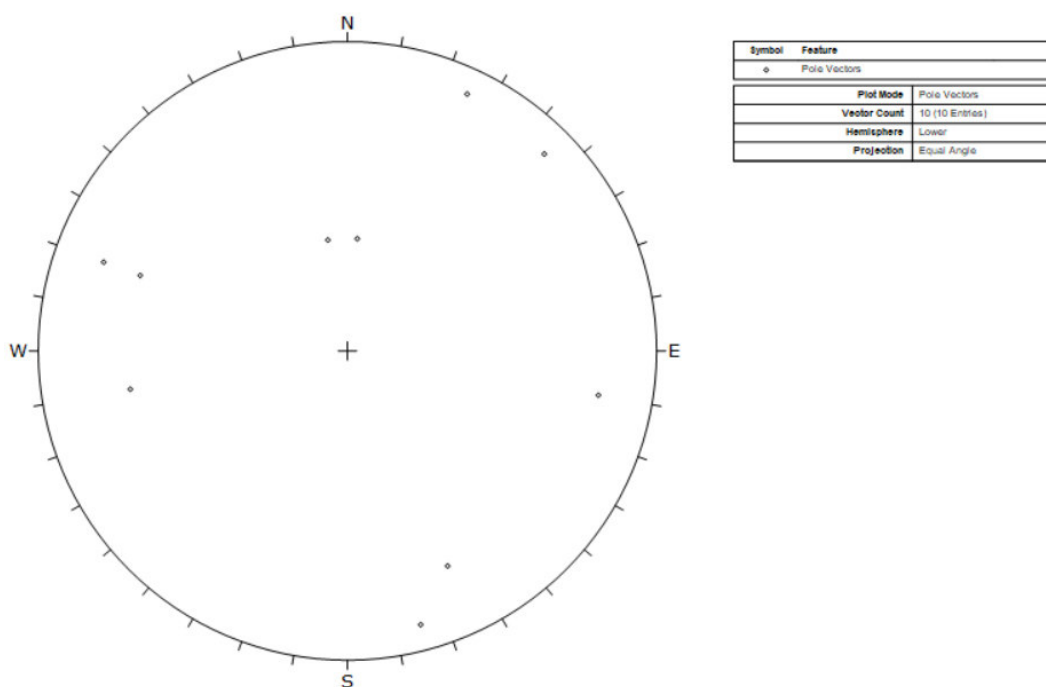


Figura 79: Giaciture delle discontinuità Stop S4.4.

8.15 Analisi Statistica delle discontinuità

Al fine di valutare in maniera più quantitativa le caratteristiche delle discontinuità, è stato sviluppato uno studio statistico per ogni parametro rilevato in particolare: spaziatura, persistenza, JRC, resistenza a compressione monoassiale, apertura e riempimento.

Dal punto di vista statistico vengono di seguito riportate, per ogni elemento rilevato i grafici di distribuzione in rapporto al conteggio.

Tali grafici sono stati realizzati sulla base di tutti i dati rilevati nell'area di Orichella, quindi dall'unione dei dati dei 13 Stop, per un totale di 107 misure di ogni elemento.

Come visibile in **Figura 80**, la spaziatura più frequente per l'area è quella che varia dai 20 ai 30 cm, con un conteggio pari a 30; la seconda più frequente è quella che varia dai 10 ai 20 cm con un conteggio pari a 24.

Sulla base delle raccomandazioni dell'I.S.R.M. del 1993, la classe di spaziatura più frequente viene classificata come spaziatura moderata.

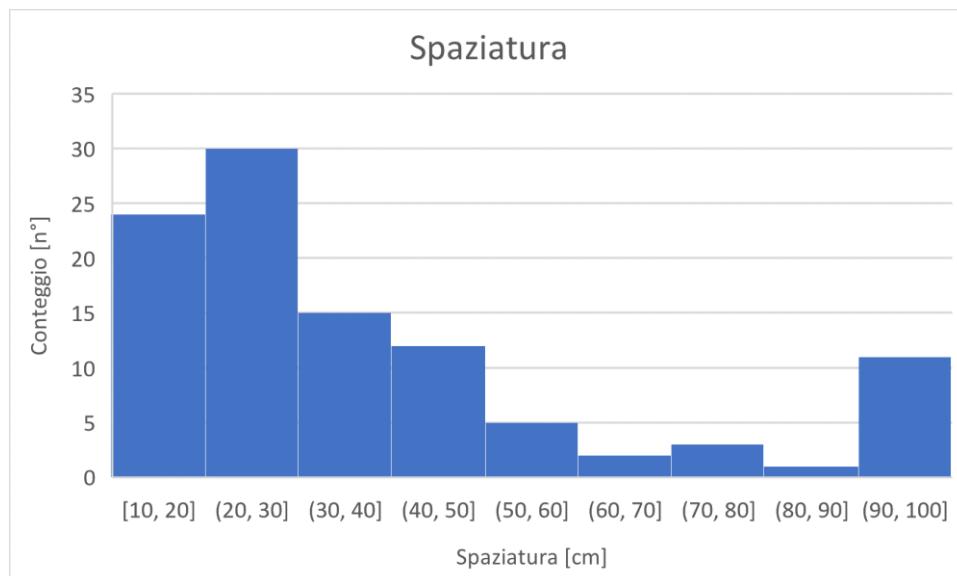


Figura 80: Distribuzione statistica della spaziatura delle discontinuità.

Come visibile in Figura 81, il valore di persistenza più frequente per l'area è quello che varia dal 82% al 100%, con un conteggio pari a 64 il che indica che quasi la metà delle discontinuità rilevate attraversava l'intera stesa areale di 1m².

In generale si può quindi dire che le discontinuità nell'area oggetto di studio siano effettivamente persistenti.

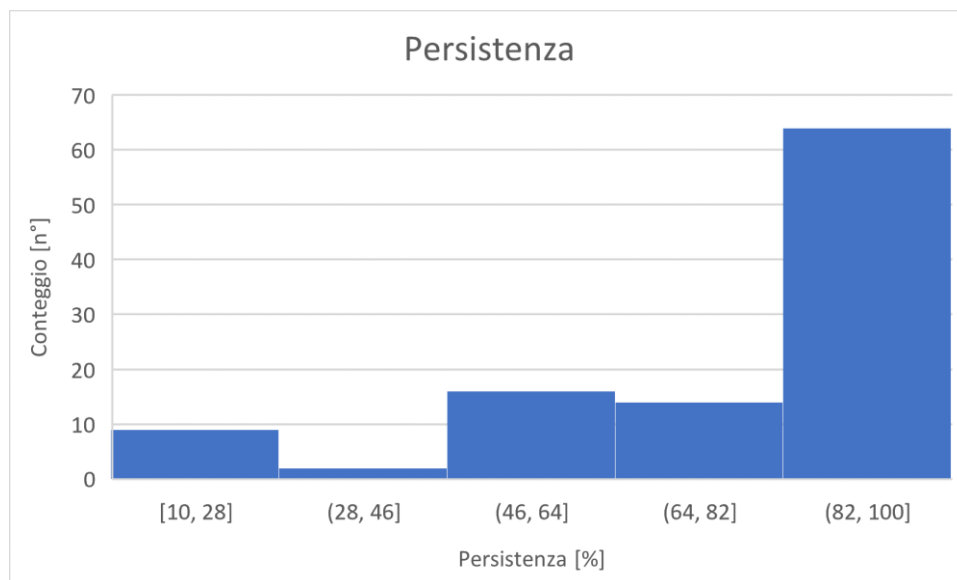


Figura 81: Distribuzione statistica della persistenza delle discontinuità.

Come visibile in **Figura 82**, il valore di rugosità più frequente per l'area è quello che varia tra 8 e 10, con un conteggio pari a 41. Il secondo valore più frequente è quello che varia tra 6 e 8 con un conteggio pari a 39.

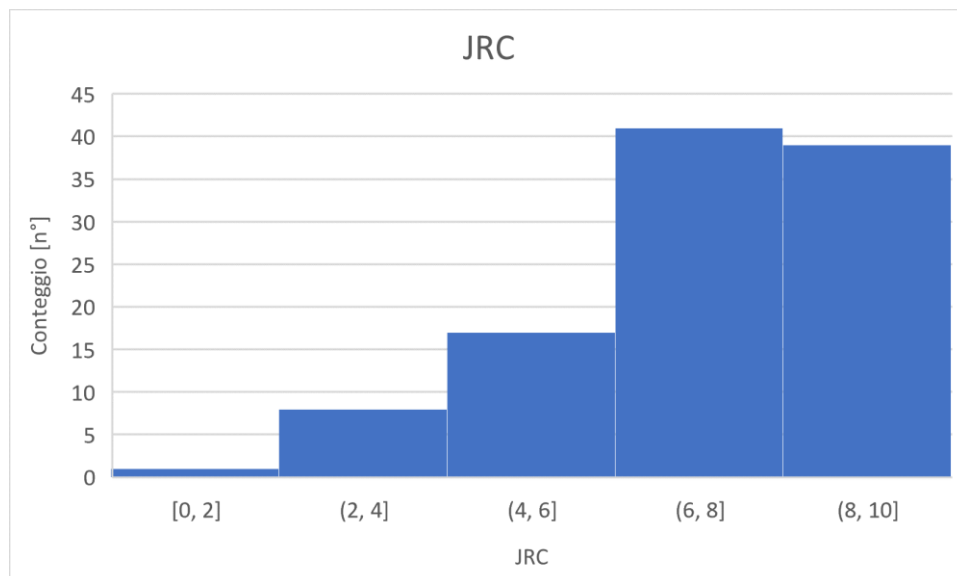


Figura 82: Distribuzione statistica della rugosità delle discontinuità.

Come visibile in **Figura 83**, il valore di resistenza a compressione monoassiale più frequente per l'area è quello che ricade nella classe da 46 a 66 MPa con un conteggio di 23.

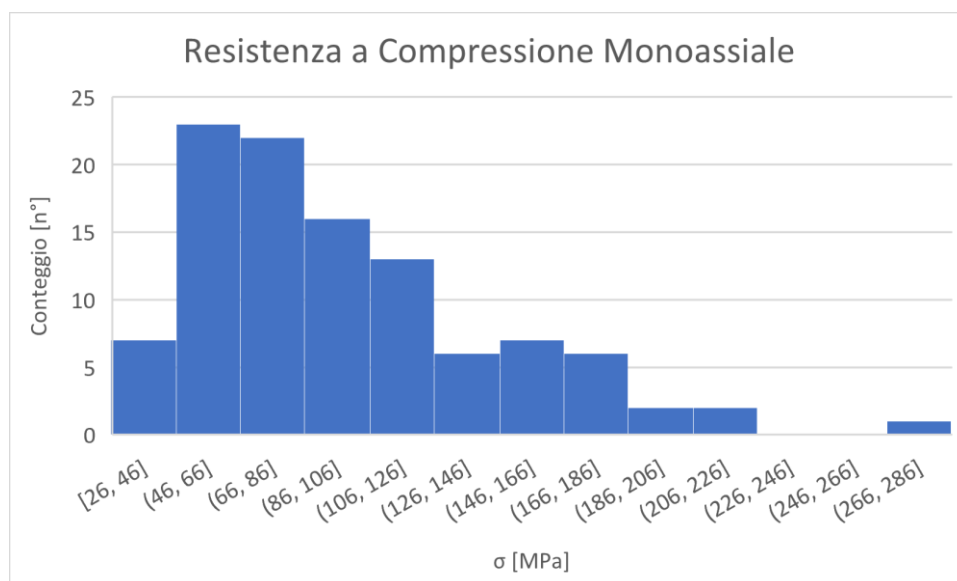


Figura 83: Distribuzione statistica della resistenza a compressione monoassiale.

Come visibile in **Figura 84**, il valore di apertura più frequente per l'area è quello che ricade nella classe da 0 a 2mm con un conteggio di 81.

Facendo riferimento a quanto riportato nelle raccomandazioni dell'I.S.R.M. del 1993 la classe di apertura più frequente delle discontinuità ricade nelle classi di discontinuità da chiuse a semi-aperte.

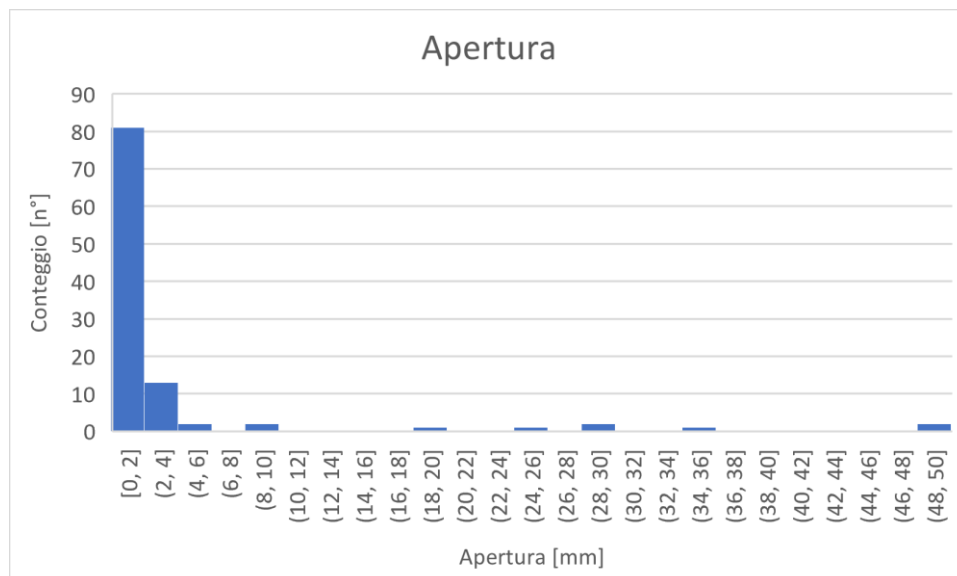


Figura 84: Distribuzione statistica della apertura delle discontinuità.

Come visibile in **Figura 85**, il valore di riempimento più frequente per l'area è quello che ricade nella classe da 0 a 2 mm con un conteggio di 84.

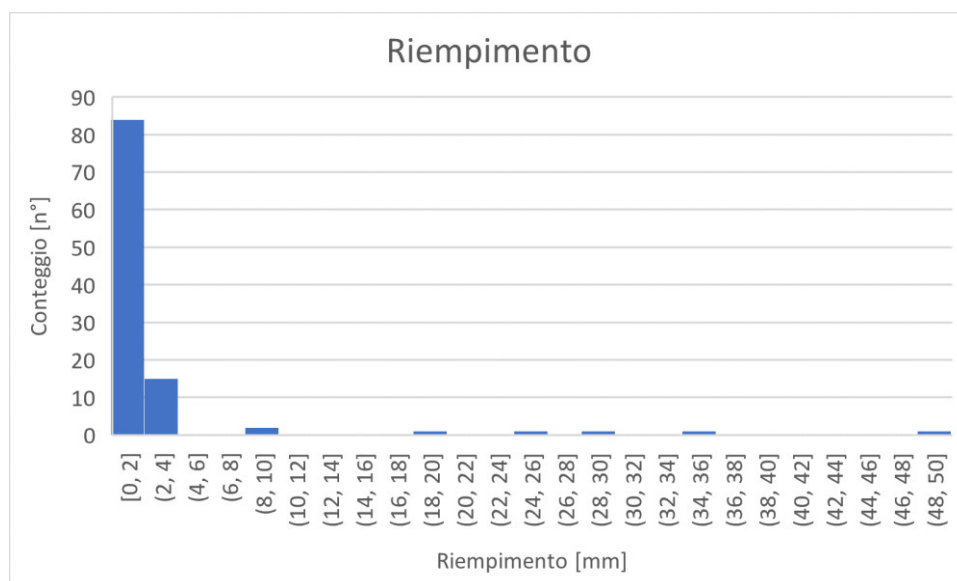


Figura 85: Distribuzione statistica del riempimento delle discontinuità.

Dai dati riportati in **Figura 84** e in **Figura 85** si evince che generalmente le discontinuità se presentano apertura, presentano un riempimento pari all'apertura. Solo poche discontinuità, in particolare quelle con apertura maggiore, presentano delle porzioni senza riempimento.

8.16 Famiglie di discontinuità

Dal punto di vista strutturale l'elaborazione stereografica di tutti i dati giacaturali rilevati durante i rilievi geologico-strutturali e geomeccanici nei 13 stop (**Figura 41**), ha evidenziato la presenza di 5 famiglie

di discontinuità come visibile in **Figura 86**. Sulla base dell'analisi dell'elaborazione stereografica e sulla base delle osservazioni eseguite durante i rilievi, queste 6 famiglie possono essere classificate in 4 set principali come di seguito riportato:

- Un sistema K1 (**Figura 86**) di discontinuità a bassa inclinazione con immersione verso sud-sudest;
- Un sistema K2 (**Figura 86**) di discontinuità a bassa-media inclinazione con immersione est-sudest;
- Un sistema di discontinuità coniugate K3-K3' (**Figura 86**) ad alta inclinazione con immersione nord-ovest (K3') e sud-est (K3);
- Un sistema di discontinuità coniugate K4-K4' (**Figura 86**) ad alta inclinazione con immersione nord (K4') e sud (K4).

La seguente immagine riporta i poli delle giaciture delle singole discontinuità, e le diverse famiglie di discontinuità.

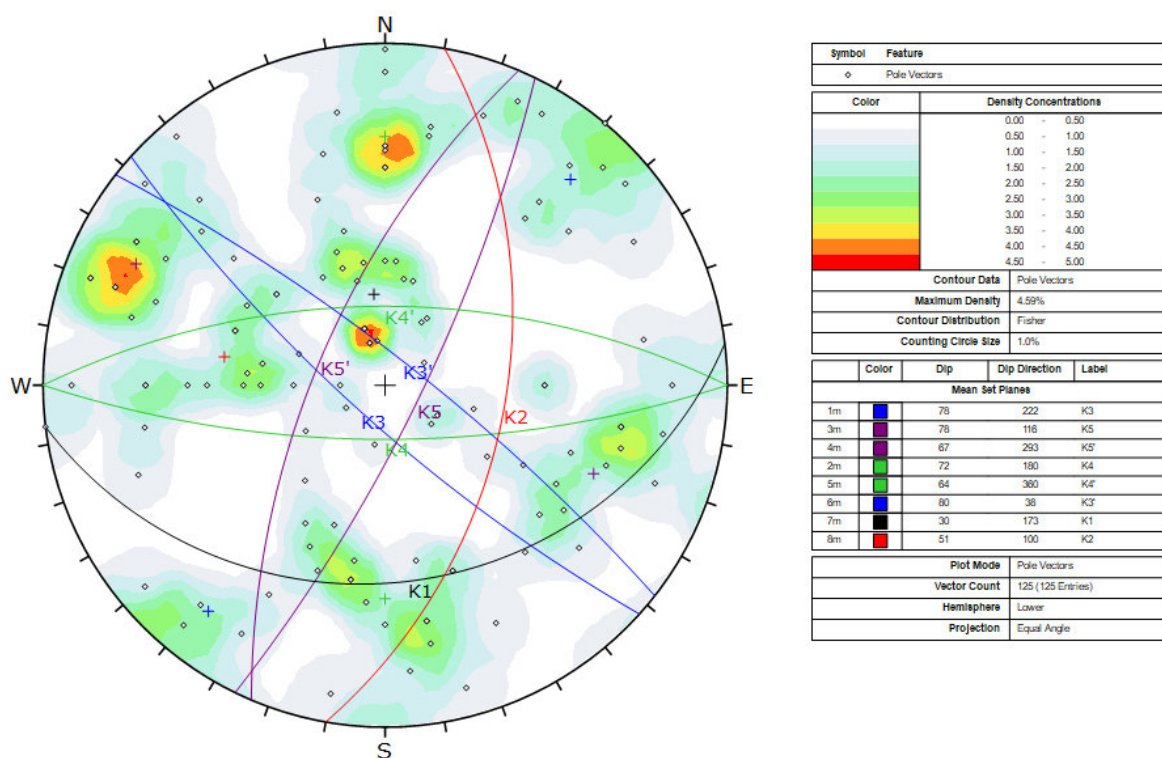


Figura 86: Stereogramma con le famiglie di discontinuità individuate dai rilievi Lombardi 2023

Dai rilievi geomeccanici effettuati si evince come sia confermata la presenza di 5 famiglie di discontinuità, di cui 3 coniugate tra loro, come precedentemente riportato nel paragrafo

8.17 Parametrizzazione dell'ammasso roccioso

Sulla base della suddivisione utilizzata nel paragrafo 7.8 le zone geomeccaniche sono state individuate n. 2 zone geomeccaniche (UG1 e UG2), in aggiunta ad una zona di faglia (UG3).

Osservando la posizione dei rilievi geomeccanici, vedi **Figura 41**, ed i risultati di caratterizzazione dell'ammasso roccioso, riportati in **Tabella 64** qui sotto.

Riassunto caratterizzazione ammasso roccioso			
STOP	RQD	RMRb	GSI
S1.1	75,2	67	62
S1.2	65,2	64	59
S1.3	63,3	61	56
S1.4	92	71	66
S2.1	52,8	62	57
S2.2	77,1	67	62
S2.4	46	57	52
S3	39,8	54	49
S4.1	36,8	51	46
S4.2	78,5	70	65
S4.3	74,1	71	66
S4.4	83	68	63

Tabella 64: sintesi della caratterizzazione dell'ammasso roccioso desunto dai rilievi Lombardi 2023

Dalla **Tabella 64** è possibile evincere come tutti i rilievi ubicati in prossimità delle spalle della diga abbiano i valori di GSI migliori. In particolare, le aree con i rilievi da S1.1. a S1.4, unitamente all'area della spalla opposta dove sono stati effettuati i rilievi da S4.2 a S4.4 con valori di GSI che si attestano intorno a 62-66. Inoltre, è possibile notare come la spalla destra dove sono ubicati i rilievi S1.1 a S1.4 abbiamo dei valori leggermente inferiori rispetto alla spalla sinistra ove i valori di GSI sono più costanti e raggiungono il valore massimo di 66.

I valori di GSI più bassi sono stati rilevati, invece, nella parte di fondo valle corrispondente al rilievo S3; mentre per il rilievo S4.1 il valore di GSI è influenzato dalla presenza di una zona di intensa fratturazione che può essere attribuito alla zona di faglia UG3 nel modello geomeccanico generale.

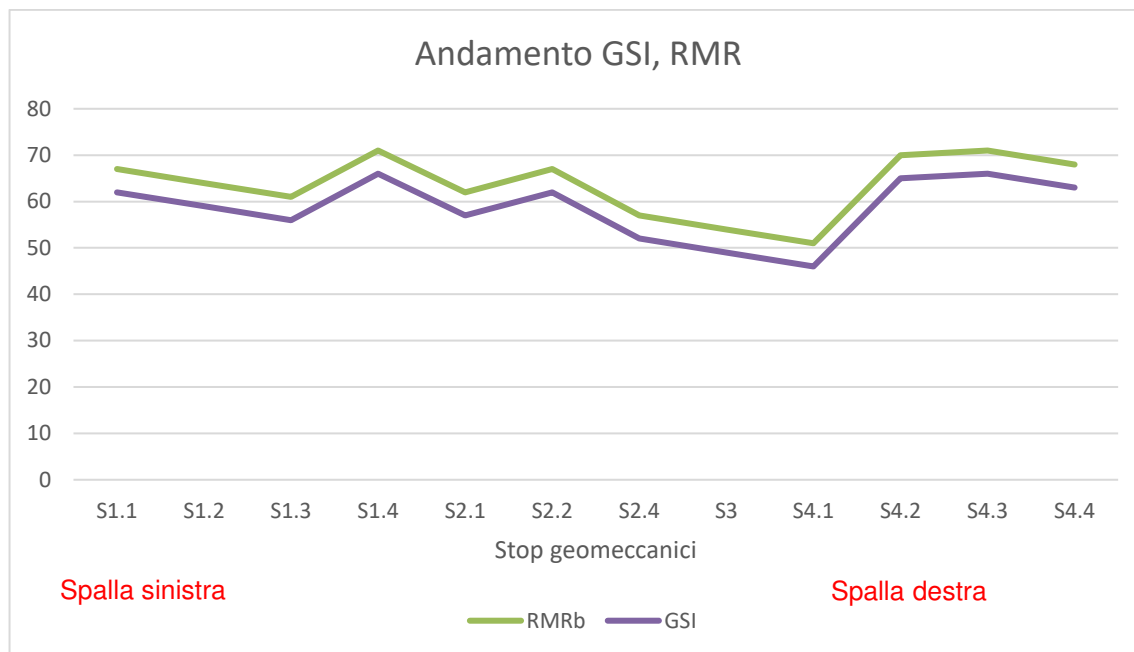


Figura 87: andamento longitudinale dei valori di GSI e RMR.

Dalla **Figura 87** si evince come i valori calcolati di GSI partendo dalla spalla sinistra alla spalla destra e posti idealmente longitudinalmente al corpo diga, permettono di mettere in forma grafica l'andamento longitudinale della qualità dell'ammasso roccioso (RMR e GSI).

Oltre alle osservazioni precedenti il grafico mette in evidenza come sulla spalla destra i valori di GSI risultano più costanti e ben definiti con un passaggio deciso tra il fondo valle e la zona si spalla. Mentre in prossimità della spalla destra i valori di GSI hanno un andamento più altalenante, che conferma la presenza di una piccola faglia o zona di fratturazione intensa già cartografata nei rilievi geologico geomorfologici di dettaglio riportati sulla carta geologico-geomorfologica con codice 2019.0800.007-GC-GEN-DW-202, ed ubicata tra i rilievi S1.4 e il rilievo S2.1.

I rilievi geomeccanici e l'andamento dei parametri di qualità dell'ammasso roccioso confermano, in linea di massima, il modello geomeccanico proposto nel documento [22] del 2022.

8.18 Valutazione dei cinematismi di crollo

Sulla base delle famiglie di discontinuità rilevate è stato possibile stimare la stabilità attraverso l'esecuzione dei test di Markland (1972), con i quali è possibile valutare quali cinematismi possano generare delle instabilità e se queste possano verificarsi effettivamente.

Al fine di una migliore valutazione si è provveduto ad effettuare i test di Markland considerando le giaciture media degli affioramenti di roccia sulla spalla destra e sulla spalla sinistra. Per tale motivo si sono considerate le seguenti giaciture medie

- Spalla destra: 10/70
- Spalla sinistra: 180/70

Sulla base di queste due giaciture medie sono stati effettuati i test di Markland (1972) per i potenziali cinematismi di crollo:

- Scivolamento planare
- Scivolamento a cuneo
- Ribaltamento

Al fine di valutare i potenziali meccanismi di crollo è stato considerato cautelativamente un valore di angolo d'attrito della roccia pari a 30°. Tale angolo d'attrito verrà utilizzato per l'esecuzione dei test di Markland (1972).

8.18.1 Scivolamento planare

Nella **Figura 88** e **Figura 89** è stato valutato lo scivolamento planare sulla spalla sinistra e sulla spalla destra rispettivamente.

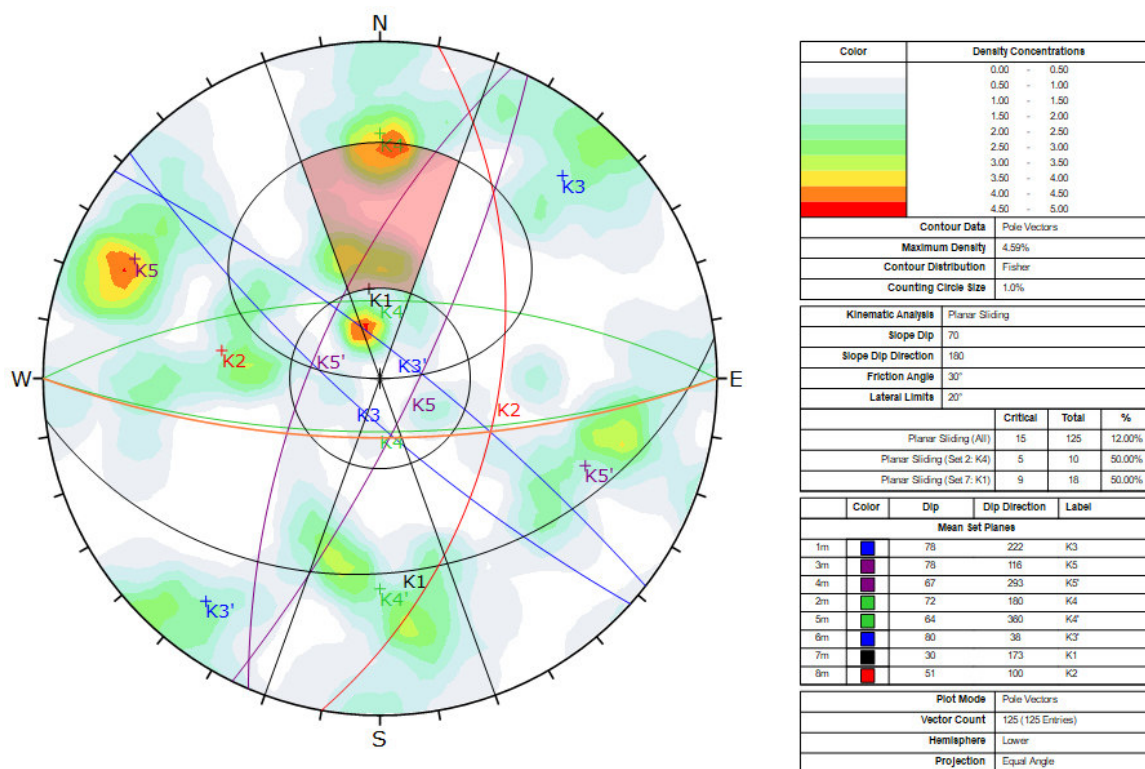


Figura 88: Verifica dello scivolamento planare per la spalla sinistra.

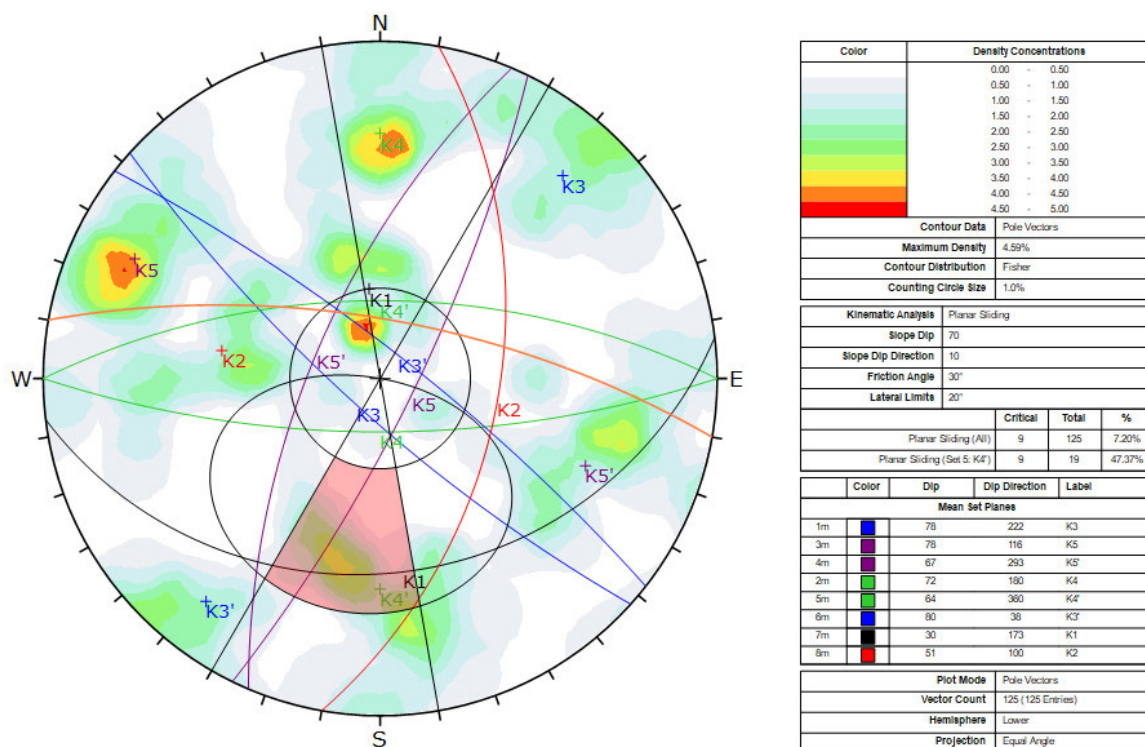


Figura 89: Verifica dello scivolamento planare per la spalla destra.

Dalle **Figura 88** e **Figura 89** si evince come gli scivolamenti planari della spalla sinistra denota la possibilità di avere scivolamenti planari che si impostano sulla famiglia di fratture K4. Mentre sulla spalla destra, **Figura 89**, sono possibili dei fenomeni di scivolamento planare impostati sulla famiglia di fratture K4'.

8.18.2 Scivolamento a cuneo

Nella **Figura 90** e **Figura 91** è stato valutato lo scivolamento a cuneo sulla spalla sinistra e sulla spalla destra rispettivamente.

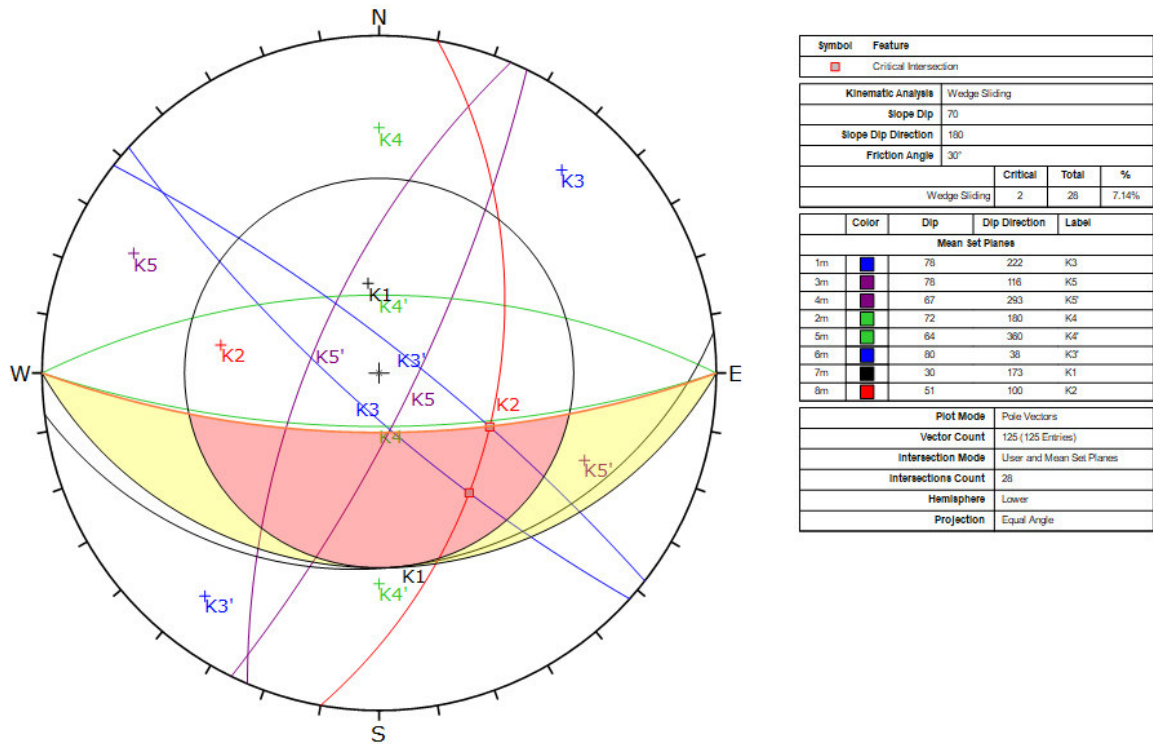


Figura 90: Verifica dello scivolamento a cuneo della spalla sinistra.

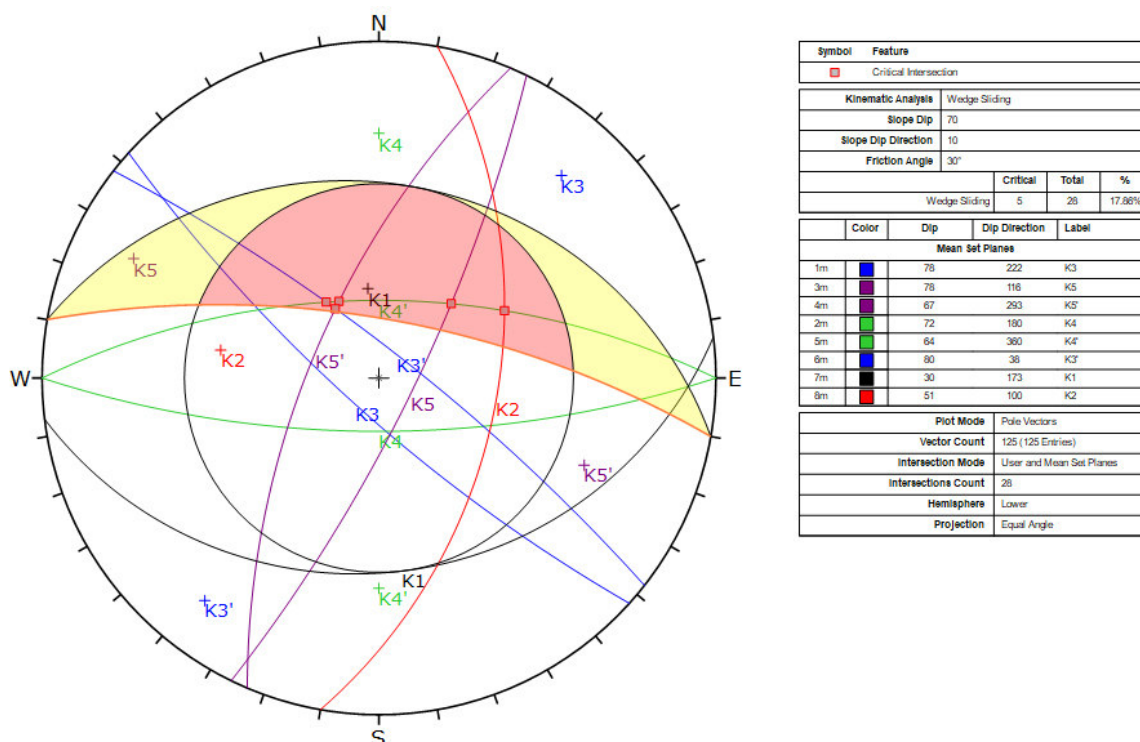


Figura 91: Verifica dello scivolamento a cuneo della spalla destra.

Dall'osservazione delle **Figura 90** si evince come sulla spalla sinistra della diga si possano formare dei cunei potenzialmente instabili impostati sulle famiglie K2 e K3 (punti rossi d'intersezione), mentre sulla spalla destra i cunei potenzialmente instabili sono impostati sulle K4' e K5', K3' e K4', K5 e K4', K4' e K2 (punti rossi d'intersezione); a differenza dei rilievi precedenti è possibile vedere come la famiglia K4 e K4' siano determinanti per la formazione di cunei potenzialmente instabili in quanto incrociano tutte le altre famiglie creando una serie di cunei di roccia potenzialmente instabili su base geometrica.

8.18.3 Ribaltamento (toppling)

Nella seguenti figure è stato valutato il ribaltamento o toppling sulla spalla sinistra e sulla spalla destra rispettivamente.

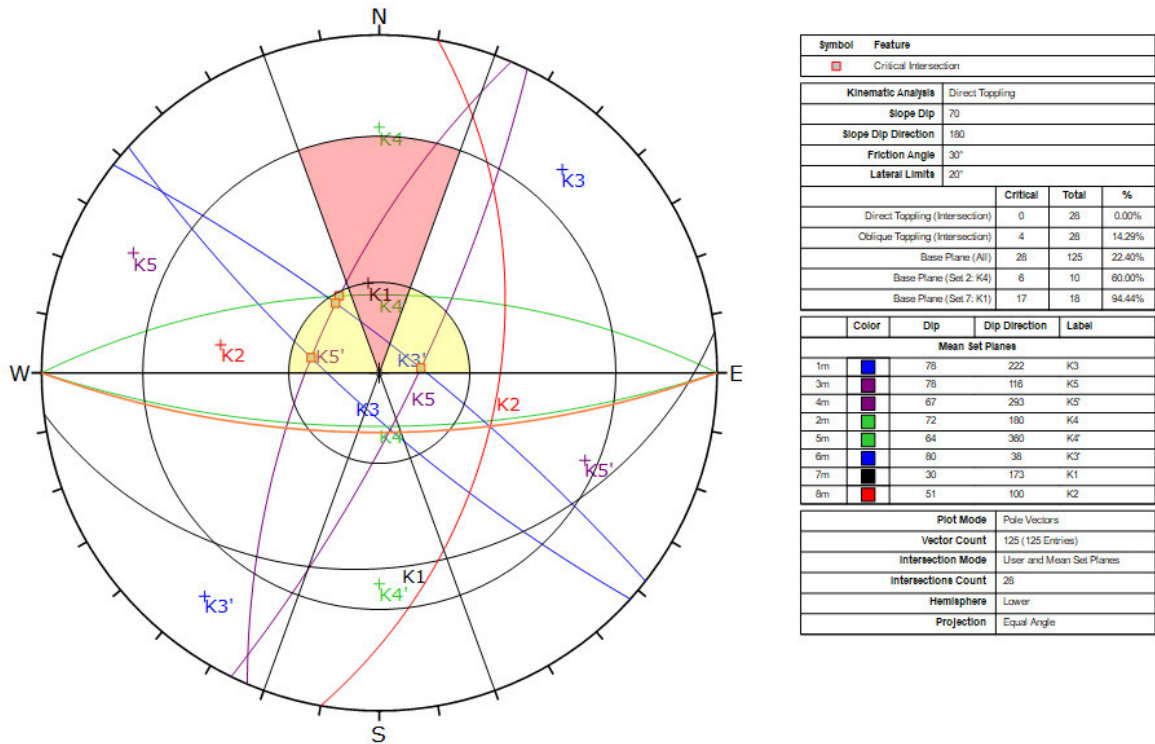


Figura 92: Verifica di ribaltamento della spalla sinistra.

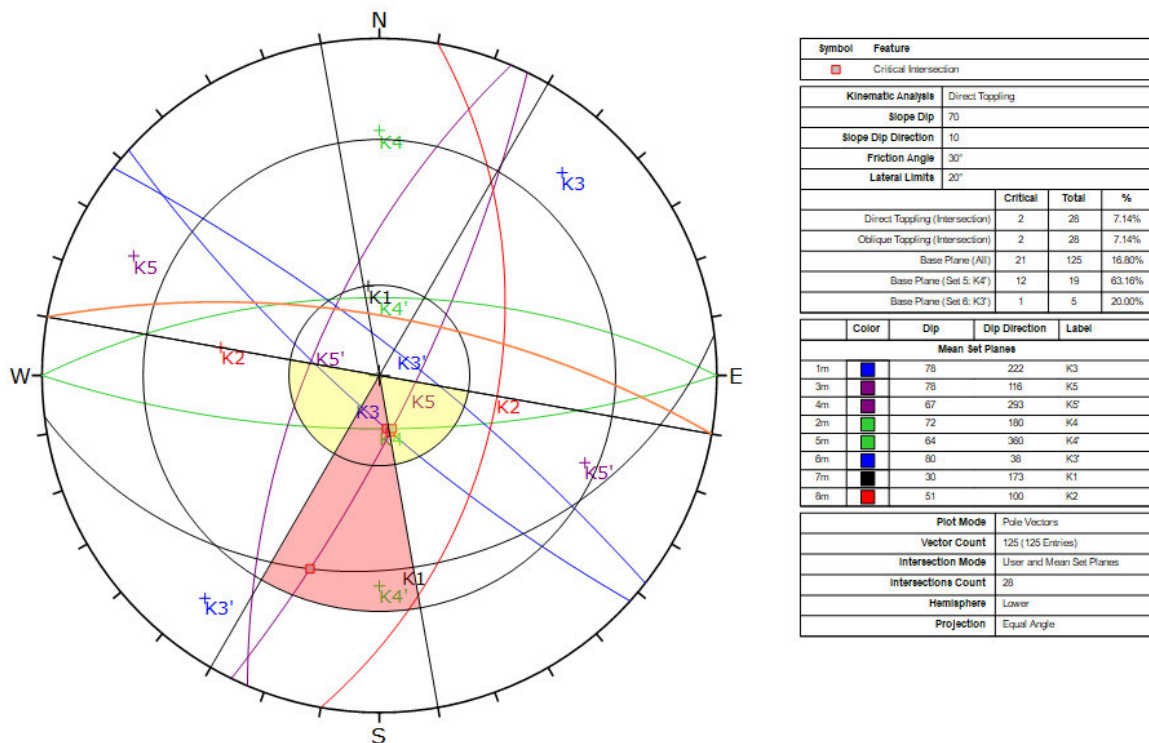


Figura 93: Verifica a ribaltamento spalla destra.

Nella verifica a ribaltamento riportate nelle **Figura 92** e **Figura 93** si evince come vi sia la possibilità di avere dei ribaltamenti obliqui che interessano le dove il piano di ribaltamento coinvolge la famiglia di fratture K1 principalmente ed in seconda battuta il piano base impostate sulla famiglia di fratture K4.

Per quanto riguarda la spalla destra, **Figura 93**, i fenomeni di ribaltamento si possono impostare sulla famiglia di fratture K4'; ed in seconda opzione, si potranno avere fenomeni di toppling impostati sulla famiglia di fratture K3'.

Dalle verifiche dei cinematismi di crollo in generale si evince come ci possano essere fenomeni di crollo a cuneo su entrambe le spalle destra e sinistra, e fenomeni di ribaltamento soprattutto sulla spalla destra, mentre sulla spalla sinistra è possibile avere dei fenomeni di toppling obliquo. I fenomeni di scivolamento planare sono possibili principalmente sulla spalla destra ed impostati sulla famiglia di fratture K4'.