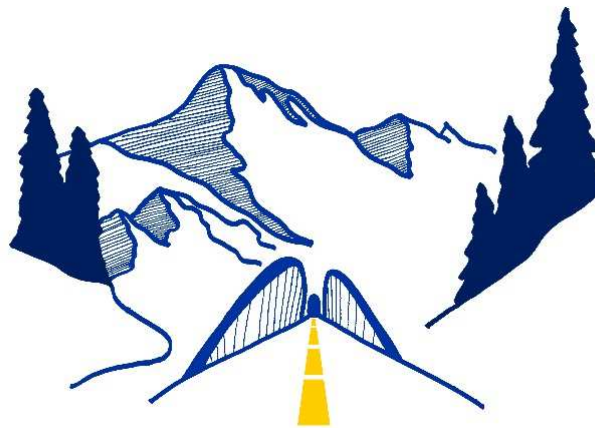


**S.S. 42 "DEL TONALE E DELLA MENDOLA"
VARIANTE EST DI EDOLO**

PROGETTO DEFINITIVO



VISTO: IL RESPONSABILE
DEL PROCEDIMENTO

Ing. Giancarlo Luongo

RESPONSABILE
DELL'INTEGRAZIONE DELLE
PRESTAZIONI SPECIALISTICHE

Ing. Alessandro RODINO

PROGETTISTA SPECIALISTA

Dott. Giulio ZAPPA

IL COORDINATORE DELLA
SICUREZZA IN FASE DI
PROGETTAZIONE

Dott. Domenico TRIMBOLI

**GEOLOGIA E GEOTECNICA
RELAZIONE GEOLOGICA GEOMORFOLOGICA IDROGEOLOGICA**

CODICE PROGETTO

PROGETTO LIV. PROG. N. PROG.

COM I 2 1 D 1 8 1 0

NOME FILE
T00GE00GEORE03_A

CODICE ELAB T 0 0 G E 0 0 G E O R E 0 3

REVISIONE

SCALA:

B

-

| | | | | | |
|------|--|-------------|-------------|------------|-----------|
| C | | | | | |
| B | REVISIONE A SEGUITO ISTRUTTORIA ANAS E PER RICHIESTA MODIFICA TRACCIATO | Agosto 2021 | P. Vendrame | G. Zappa | A. Nardi |
| A | EMISSIONE | Maggio 2021 | P. Vendrame | G. Zappa | A. Nardi |
| REV. | DESCRIZIONE | DATA | REDATTO | VERIFICATO | APPROVATO |

| INDICE | pag. |
|--|-------------|
| 1. PREMESSA | 1 |
| 2. INTRODUZIONE | 2 |
| 2.1 Finalità dello studio..... | 2 |
| 2.2 Metodologia e mezzi d'indagine..... | 2 |
| 2.3 Contenuti..... | 2 |
| 2.4 Riferimenti normativi e limiti delle indagini | 3 |
| 3. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO | 3 |
| 4. REGIME VINCOLISTICO..... | 4 |
| 4.1 Vincolo idrogeologico | 4 |
| 4.2 Piano di Assetto Idrogeologico (PAI)..... | 5 |
| 4.2.1 Rischio idraulico e idrogeologico..... | 5 |
| 4.2.2 Analisi territoriale di pericolosità..... | 7 |
| 4.2.3 Piano di Gestione del Rischio Alluvioni del Distretto Idrografico del Po | 12 |
| 4.3 Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (PTCP) – Provincia di Brescia .. | 16 |
| 4.4 Piano di Governo del Territorio – Comune di Edolo..... | 19 |
| 4.4.1 Pericolosità sismica locale..... | 19 |
| 4.4.2 Carta della fattibilità geologica..... | 21 |
| 5. INQUADRAMENTO SISMICO | 27 |
| 5.1 Generalità..... | 27 |
| 5.2 Sismicità storica, recente, e contesto geodinamico..... | 28 |
| 5.3 Sorgenti sismogenetiche e faglie capaci | 31 |
| 5.4 Classificazione sismica dell'area | 33 |
| 5.4.1 Sismicità di base dell'area | 33 |
| 5.4.2 Pericolosità sismica | 33 |
| 5.4.3 Definizione della risposta sismica locale..... | 37 |
| 6. ASSETTO GEOLOGICO REGIONALE | 41 |
| 6.1 Inquadramento geologico..... | 41 |
| 6.2 Inquadramento tettonico | 43 |
| 6.2.1 Triassico superiore-cretacico inferiore | 44 |
| 6.2.2 Triassico superiore-cretacico inferiore | 44 |
| 6.2.3 Cretacico superiore-neogene | 46 |

| | | |
|--------|--|-----|
| 6.2.4 | L'assetto strutturale attuale..... | 47 |
| 7. | ASSETTO GEOLOGICO DELL'AREA DI INTERVENTO | 49 |
| 8. | GEOMORFOLOGIA | 55 |
| 9. | IDROGEOLOGIA..... | 61 |
| 10. | INDAGINI GEOGNOSTICHE..... | 63 |
| 10.1 | Indagini in fase di progetto preliminare..... | 63 |
| 10.2 | Indagini in fase di progetto definitivo..... | 64 |
| 11. | GEOMECCANICA DEGLI AMMASSI ROCCIOSI..... | 67 |
| 11.1 | Indagini per la caratterizzazione geomeccanica degli ammassi rocciosi..... | 67 |
| 11.1.1 | Rilievi geostrutturali..... | 67 |
| 11.1.2 | Stazione R.S.1 | 69 |
| 11.1.3 | Stazione R.S.2 | 73 |
| 11.1.4 | Stazione R.S.3 | 76 |
| 11.2 | Sondaggi geognostici | 79 |
| 11.2.1 | Stratigrafia e condizioni di fratturazione..... | 79 |
| 11.2.2 | Litofacies | 90 |
| 11.3 | Indagini in foro | 91 |
| 11.3.1 | Log ottici, acustici e sonici..... | 91 |
| 11.3.2 | Prove dilatometriche DRT..... | 94 |
| 11.3.3 | Prove Lugeon..... | 96 |
| 11.4 | Prove di laboratorio sulla matrice lapidea | 96 |
| 11.5 | Classificazione geomeccanica degli ammassi rocciosi..... | 101 |
| 12. | CARATTERISTICHE GEOLOGICHE LUNGO IL TRACCIATO DELLE OPERE... | 104 |
| 12.1.1 | Imbocco Sud..... | 104 |
| 12.1.2 | Galleria | 106 |
| 12.1.3 | Imbocco Nord..... | 110 |
| 13. | INDAGINI INTEGRATIVE..... | 114 |
| 13.1 | Imbocco sud..... | 114 |
| 13.2 | Imbocco nord | 115 |
| 14. | CONCLUSIONI..... | 116 |

1. PREMESSA

ANAS ha affidato al Raggruppamento Temporaneo di Imprese (Techint S.p.A. – CESI S.p.A. - IGEAS Engineering S.r.l.) la *progettazione definitiva ed esecutiva dell'intervento S.S. 42, Variante del tratto Berzo Demo-Edolo e Variante Est di Edolo.*

L'opera è geograficamente collocata nell'Alta Valle Camonica, ed interessa in particolare il settore sud-occidentale del Comune di Edolo, in provincia di Brescia. L'Alta Valle Camonica è attraversata dal Fiume Oglio ed è incuneata tra i massicci alpini dell'Adamello-Presanella ed Ortles-Cevedale, entrambi con altitudine superiore ai 3.500 metri.

L'abitato di Edolo sorge sul conoide alluvionale generato allo sbocco del Fiume Oglio in uscita dalla strettoia valliva posta a nord dell'abitato, abitato che si estende anche sul raccordo del conoide con la piana alluvionale.

La S.S. 42, che collega il comprensorio dell'Alta Valle a Bergamo in direzione SW e a Bolzano in direzione NE, è l'asse portante della viabilità nella zona, che risulta densamente urbanizzata con insediamenti sia artigianali che legati al settore primario e al turismo. Essa si sviluppa nel fondo valle ed è stata interessata in passato da interventi di riqualificazione, al cui parziale completamento è rivolto il presente progetto. L'abitato di Edolo è attraversato, inoltre, dalla S.S. 39 che lo collega in direzione ovest con il Passo dell'Aprica.

Il tracciato di progetto si sviluppa ai margini Sud-Est e Nord dell'abitato di Edolo in direzione Edolo-Bolzano, interessando nella parte Sud-Est per un breve tratto anche l'estremità Ovest l'abitato di Sonico. La piattaforma adottata in progetto fa riferimento alla strada extraurbana secondaria di tipo "C1", quindi a traffico sostenuto, ed è prevista a doppio senso di marcia con superficie pavimentata complessiva pari a 9,50 m.

A partire dalla S.S. 42, il futuro tracciato stradale (lunghezza complessiva pari a circa 2048 m) ha inizio (lato Sud-Est) con una nuova rotatoria, dalla quale si immette, per un breve tratto, sulla sede della strada comunale Via Mù seguita da Via Valeriana, delle quali è previsto l'adeguamento alla tipologia C1, passando in affiancamento all'attuale impianto ENEL. Alla progressiva 0+150, in corrispondenza di uno degli ingressi della centrale ENEL, ha inizio la galleria, che, con una lunghezza complessiva di circa 1809 m, bypassa l'abitato di Edolo; l'intera galleria nei primi 342 m e negli ultimi 23 m si sviluppa in artificiale, mentre i rimanenti 1444 m circa costituiscono il tratto di galleria naturale. La galleria termina in sinistra del Fiume Oglio, per l'attraversamento del quale viene realizzato un ponte lungo 60 m ed il tracciato termina sul versante sinistro con uno svincolo a rotatoria per l'innesto sulla S.S. 42, in direzione del Passo della Mendola.

2. INTRODUZIONE

2.1 Finalità dello studio

Nell'ambito della *progettazione definitiva ed esecutiva dell'intervento S.S. 42, Variante del tratto Berzo Demo-Edolo e Variante Est di Edolo*, è stato sviluppato il presente studio geologico geomorfologico ed idrogeologico.

Le indagini e le ricerche geologiche sono state finalizzate ad approfondire la conoscenza dei seguenti argomenti:

- caratteri geologici e tettonico-strutturali regionali;
- caratteri geologici e tettonico-strutturali locali;
- assetto litostratigrafico con la geometria e le caratteristiche delle superfici di discontinuità tettoniche, gravitative e lito-stratigrafiche dell'area di intervento;
- origine, natura, distribuzione spaziale, stato di alterazione e degradabilità dei litotipi individuati;
- geomorfologia dell'area in cui si colloca l'opera, con individuazione dei processi morfogenetici e dissesti in atto;
- struttura idrogeologica e caratteristiche della circolazione idrica superficiale e sotterranea;
- interazioni tra aspetti geo-strutturali, tettonici, geomorfici e idrogeologici (livello di pericolosità geologica del sito) ed opere da realizzare.

2.2 Metodologia e mezzi d'indagine

Per raggiungere gli obiettivi previsti si è fatto ricorso a un metodo articolato nelle fasi di seguito elencate.

- Ricerche biblio-cartografiche e verifica degli studi precedenti.
- Rilievi geologici, geomorfologici e idrogeologici di dettaglio.
- Comparazione tra i risultati dei sondaggi meccanici e delle altre prove ed indagini in situ ed in laboratorio con i dati dei rilievi e delle osservazioni dirette.
- Ricostruzioni e correlazioni litostratigrafiche.
- Analisi critica dei risultati delle fasi precedenti e sintesi finale.
- Come mezzi di indagine sono stati utilizzati i rilievi diretti, le campagne geognostiche disponibili, comprendenti sondaggi di vario tipo (meccanici e geofisici, prove in situ ed analisi di laboratorio) che si sono rivelati molto importanti per stabilire l'esistenza di alcune peculiarità geologiche profonde non altrimenti ravvisabili.

2.3 Contenuti

La presente Relazione geologica geomorfologica ed idrogeologica, con gli elaborati grafici e cartografici che la corredano, descrive e rappresenta i risultati di nuove indagini e rilievi specificamente realizzati per la progettazione definitiva ed esecutiva dell'opera in esame a partire dal Progetto Preliminare, con particolare riferimento alla Relazione Geologica dell'aprile 2016 (codice elab. *P02SG02GENRE080*), che viene in alcune sezioni del presente documento esplicitamente richiamata.

In particolare, la presente relazione:

- descrive l'assetto geologico e geotettonico regionale;

- adegua le caratterizzazioni geologiche, geomorfologiche ed idrogeologiche precedenti ai dati bibliografici, ai nuovi rilievi in situ ed ai nuovi sondaggi geognostici eseguiti;
- ricostruisce il modello geologico prevedibile lungo il tracciato della galleria valutando le criticità prevedibili in corso di avanzamento;
- fornisce indicazioni sul comportamento geologico-tecnico dei materiali interessati dalla galleria naturale, dalla galleria artificiale, dal viadotto e dalla viabilità in trincea.

2.4 Riferimenti normativi e limiti delle indagini

Per quanto riguarda le indagini sui terreni e sulle rocce, necessarie per la determinazione delle proprietà geologico-tecniche dei litotipi, si considera ancora valido il D.M. 11.3.1988 ed i più recenti aggiornamenti introdotti dalle Norme Tecniche per le Costruzioni [D.M. 17 gennaio 2018].

Nel rispetto delle norme sopra richiamate, è opportuno evidenziare che le ricostruzioni, le ipotesi e le indicazioni contenute nella relazione dovranno essere confrontate e verificate in situ durante l'esecuzione dei lavori, in modo che ad ogni variazione eventualmente riscontrata, possano essere adottati gli accorgimenti costruttivi più opportuni.

3. DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

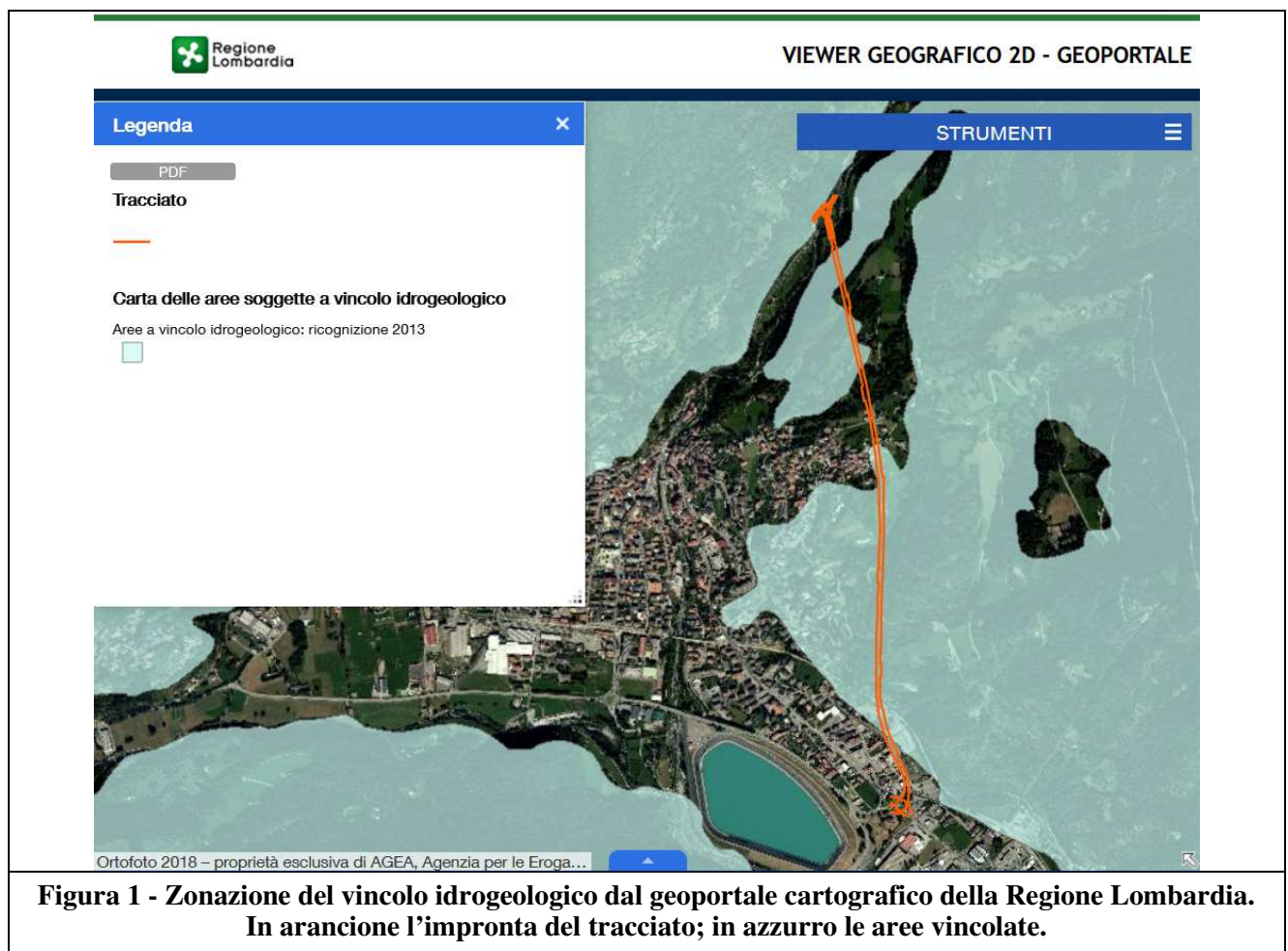
- [1] 2014 - P02 SG02 GEN RE080 A - Relazione geologica Lotto II
- [2] 2016 - P02SG02GENRE100_A – Relazione sismica
- [3] 2017 - MR 7.5-03R-REV.1 - Risultati indagini geologiche e geotecniche
- [4] 2020 - T00GE00GEORE01_A-Relazione sulle indagini geognostiche in sito e sulle prove di laboratorio
- [5] 2020 - T00GE00GETFG01_A – Profilo geologico - geotecnico
- [6] 2020 - T00GE00GEOFG01_A - Profilo geologico - geomeccanico
- [7] 2020 - T00GE00GEOCI01_A – Carta idrogeologica
- [8] 2020 - T00GE00GEOCG01_A – Carta geologica e geomorfologica
- [9] 2020 - T00GE00GETRE01_A – Relazione geotecnica

4. REGIME VINCOLISTICO

4.1 Vincolo idrogeologico

Il vincolo idrogeologico (Regio Decreto Legge n° 3267 del 30/12/1923, “Riordinamento e riforma della legislazione in materia di boschi e di terreni montani” e successive modifiche e integrazioni) si rivolge ad aree delicate dal punto di vista della morfologia e della natura del terreno ed è finalizzato, essenzialmente, ad assicurare che le trasformazioni operate su tali aree non producano dissesti, o distruggano gli equilibri raggiunti e consolidati, a seguito di modifica delle pendenze legate all’uso e alla inefficace regimazione delle acque meteoriche o di falda. La presenza del vincolo comporta la necessità di una specifica autorizzazione per tutte le opere che presuppongono movimenti di terra. La necessità di tale autorizzazione riguarda anche gli interventi di trasformazione colturale agraria che comportano modifiche nell’assetto morfologico dell’area, o intervengono in profondità su quei terreni.

L’area interessata dagli interventi in progetto inerenti l’opera principale è parzialmente soggetta a vincolo idrogeologico interferendo solo nei tratti in cui la realizzazione dell’opera è in galleria, ed in corrispondenza delle interazioni tra la realizzazione della rotatoria nord ed il versante orografico destro (Figura 1).



4.2 Piano di Assetto Idrogeologico (PAI)

Il Piano d'Assetto Idrogeologico (PAI), adottato con delibera del Comitato Istituzionale dell'Autorità di Bacino n. 18 del 26/4/2001 ed approvato con D.P.C.M. 24/5/2001, rappresenta lo strumento che conclude e unifica la pianificazione di bacino per l'assetto idrogeologico, coordinando le determinazioni precedentemente assunte con specifici Piani Stralcio (il Piano Stralcio 45, il Piano Stralcio Fasce Fluviali e il Piano Straordinario 267), in taluni casi precisandoli e adeguandoli nel modo più appropriato al carattere integrato e interrelato richiesto al piano di bacino.

Il PAI contiene, infatti, il completamento della delimitazione delle fasce fluviali sui corsi d'acqua principali del bacino e definisce le linee di intervento strutturali per gli stessi corsi d'acqua e per le aree collinari e montane. Inoltre, il PAI ha risposto alle determinazioni della Legge 3 agosto 1998, n. 267, in merito all'individuazione e perimetrazione delle aree a rischio idrogeologico, mediante la verifica delle situazioni in dissesto.

La documentazione consultata nell'ambito del presente studio corrisponde a quella del piano vigente; l'elenco completo delle varianti approvate e delle attuazioni (delibere) è consultabile direttamente sul sito web dell'autorità di bacino del Fiume Po.

4.2.1 Rischio idraulico e idrogeologico

Per quanto attiene il rischio idraulico e idrogeologico, il PAI presenta una valutazione di tipo qualitativo, nonostante sia fondata su una procedura di quantificazione numerica. Dal punto di vista metodologico, l'applicazione dell'equazione del rischio è stata riferita a un'unità territoriale elementare costituita dai confini amministrativi comunali. Pertanto, la pericolosità connessa ai fenomeni di dissesto in atto e potenziali, il valore socio-economico e la vulnerabilità (fattori che compongono il rischio) sono determinati tramite indicatori parametrici con riferimento all'intera unità territoriale, indipendentemente dalla distribuzione dei diversi parametri all'interno del comune. Ne consegue una classificazione a scala comunale del rischio totale senza una perimetrazione delle singole aree a rischio specifico (Figura 2 - Stralcio Tav.6-II, PAI Cap. 6, Cartografia di piano – Rischio idraulico e idrogeologico – scala 1:250.000.).

In via qualitativa il significato fisico delle classi di rischio individuate è riconducibile alle seguenti definizioni che esprimono le conseguenze attese a seguito del manifestarsi dei dissesti:

- **moderato R1** per il quale sono possibili danni sociali ed economici marginali;
- **medio R2** per il quale sono possibili danni minori agli edifici e alle infrastrutture che non pregiudicano l'incolumità delle persone, l'agibilità degli edifici e lo svolgimento delle attività socio-economiche;
- **elevato R3** per il quale sono possibili problemi per l'incolumità delle persone, danni funzionali agli edifici e alle infrastrutture con conseguente inagibilità degli stessi e l'interruzione delle attività socio-economiche, danni al patrimonio culturale;
- **molto elevato R4** per il quale sono possibili la perdita di vite umane e lesioni gravi alle persone, danni gravi agli edifici e alle infrastrutture, danni al patrimonio culturale, la distruzione di attività socioeconomiche.

Dall'analisi della cartografia allegata al PAI si evince che Edolo è classificato come comune a rischio molto elevato R4.

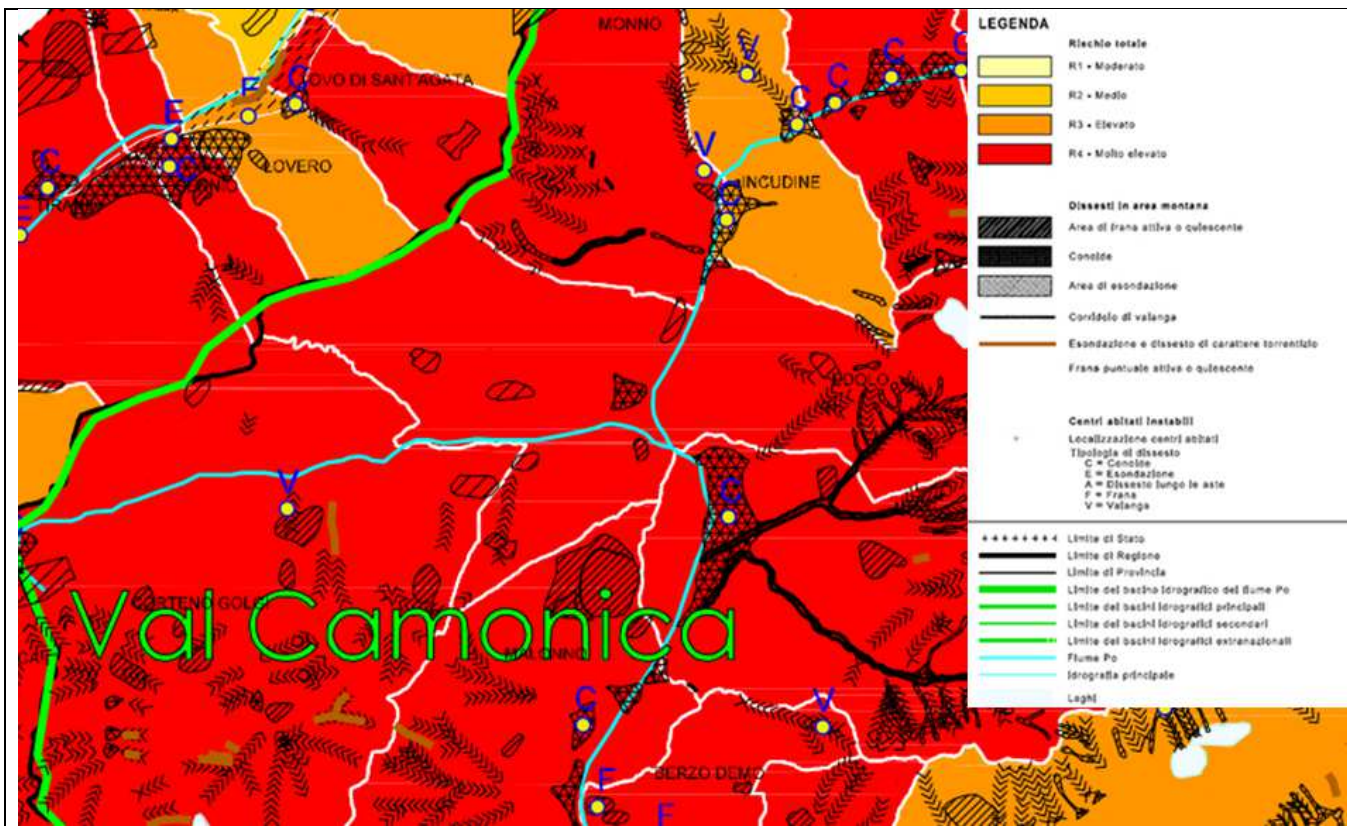


Figura 2 - Stralcio Tav.6-II, PAI Cap. 6, Cartografia di piano – Rischio idraulico e idrogeologico – scala 1:250.000.

4.2.2 Analisi territoriale di pericolosità

4.2.2.1 PAI ORIGINARIO (2001)

Le informazioni risultanti dall'analisi di pericolosità del territorio sono contenute nella cartografia alla scala 1:25.000 allegata al PAI (Allegato 4 – Delimitazione delle aree in dissesto). Figura 3 è riportata la situazione relativa all'intorno dell'area in studio, estratta dal Geoportale della Regione Lombardia

La cartografia PAI espressa alla scala 1:25.000 consente di individuare, con una codifica omogenea, le situazioni di pericolo delimitandole e/o localizzandole puntualmente. I principali elementi informativi sono illustrati nella legenda di Figura 4 – Carta dei dissesti secondo la cartografia PAI originario 2001 –LEGENDA - Fonte Geoportale della Regione Lombardia.

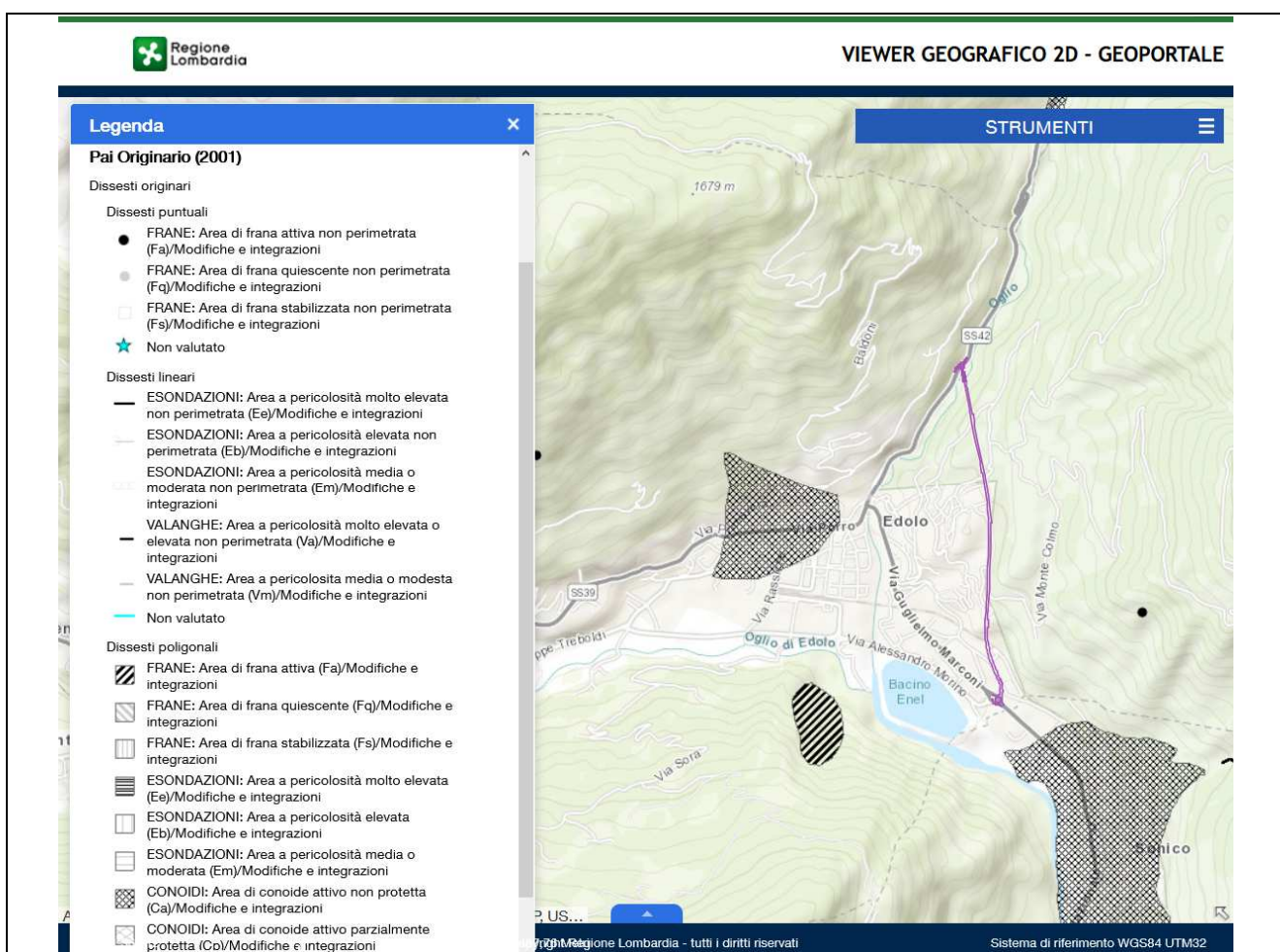
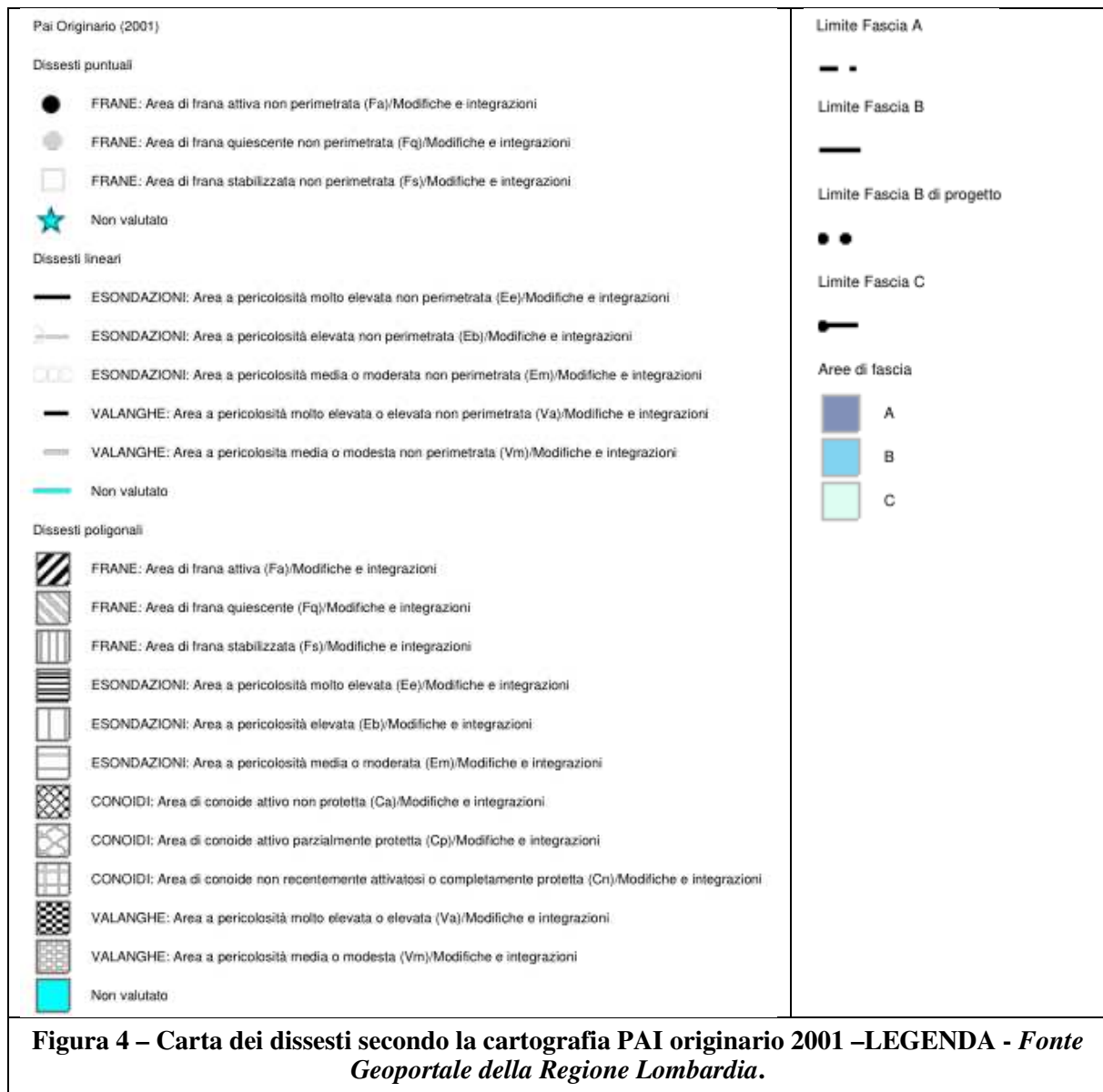


Figura 3 - Carta dei dissesti secondo la cartografia PAI originario 2001 – Fonte Geoportale della Regione Lombardia



Le aree di frane individuate risultano essere distinte, con riferimento alla dimensione del fenomeno o alla qualità delle informazioni disponibili, in perimetrabili e non perimetrabili, mentre in base alle informazioni storiche in attive, quiescenti e stabilizzate, con i significati seguenti:

- *frane attive: si intendono quelle in atto o verificatesi nell'arco degli ultimi 30 anni, anche nel caso che detta "attività" sia consistita in una ripresa di movimento interessante in modo parziale e limitato il corpo di frana;*
- *frane quiescenti: sono quelle che hanno dato segni di "attività" in un periodo di tempo antecedente a quello sopra indicato;*
- *frane stabilizzate: comprendono le frane interessate da interventi di consolidamento o che hanno raggiunto naturalmente assetti sicuramente di equilibrio.*

Per dissesti morfologici di carattere torrentizio si intendono processi erosivi e deposizionali

prodotti essenzialmente dall'azione delle acque di scorrimento superficiale, sia sotto forma laminare e diffusa sulle pendici che lungo linee preferenziali o incanalate lungo il reticolo idrografico.

Per quanto riguarda le esondazioni, la cartografia riporta la delimitazione delle aree inondate nel corso di eventi alluvionali passati.

Le aree individuate risultano distinte, con riferimento alla dimensione del fenomeno o alla qualità delle informazioni disponibili, in perimetrabili e non perimetrabili.

Sono state individuate come conoidi attive o potenzialmente attive, quelle che risultano interessate da notevoli episodi di alluvionamento.

È doveroso precisare ed avere ben presente i limiti connessi alle tecniche usate per la predisposizione di queste carte. Innanzitutto, la mancanza di eventi franosi in una qualsiasi area non significa in assoluto che tale area sia priva di dissesti, tantomeno che essa non sia suscettibile a franare. La carta non può, in altri termini, essere utilizzata per valutazioni di stabilità di un singolo sito, per il quale dovranno essere comunque svolti studi geologico-tecnici accurati e puntuali.

Per quanto concerne le *fasce di pericolosità fluviale*, il Piano Stralcio delle Fasce Fluviali (PSFF), del quale il PAI assume la normativa relativa alla regolamentazione degli usi del suolo e degli interventi nei territori fluviali delimitati, ha individuato tre fasce fluviali definite come segue (lo schema esplicativo della definizione delle Fasce fluviali è riportato in Figura 5/Figura 5 - Legenda carta Fasce fluviali PAI 100-3.):

- **Fascia A** o *Fascia di deflusso della piena*; è costituita dalla porzione di alveo che è sede prevalente, per la piena di riferimento, del deflusso della corrente, ovvero che è costituita dall'insieme delle forme fluviali riattivabili durante gli stati di piena;
- **Fascia B** o *Fascia di esondazione*; esterna alla precedente, è costituita dalla porzione di alveo interessata da inondazione al verificarsi dell'evento di piena di riferimento. Il limite della fascia si estende fino al punto in cui le quote naturali del terreno sono superiori ai livelli idrici corrispondenti alla piena di riferimento (portata con Tempo di ritorno $T_r = 200$ anni) ovvero sino alle opere idrauliche di controllo delle inondazioni (argini o altre opere di contenimento), dimensionate per la stessa portata;
- **Fascia C** o *Area di inondazione per piena catastrofica*; è costituita dalla porzione di territorio esterna alla precedente (Fascia B), che può essere interessata da inondazione al verificarsi di eventi di piena più gravosi di quelli di riferimento (portata con $T_r = 500$ anni).

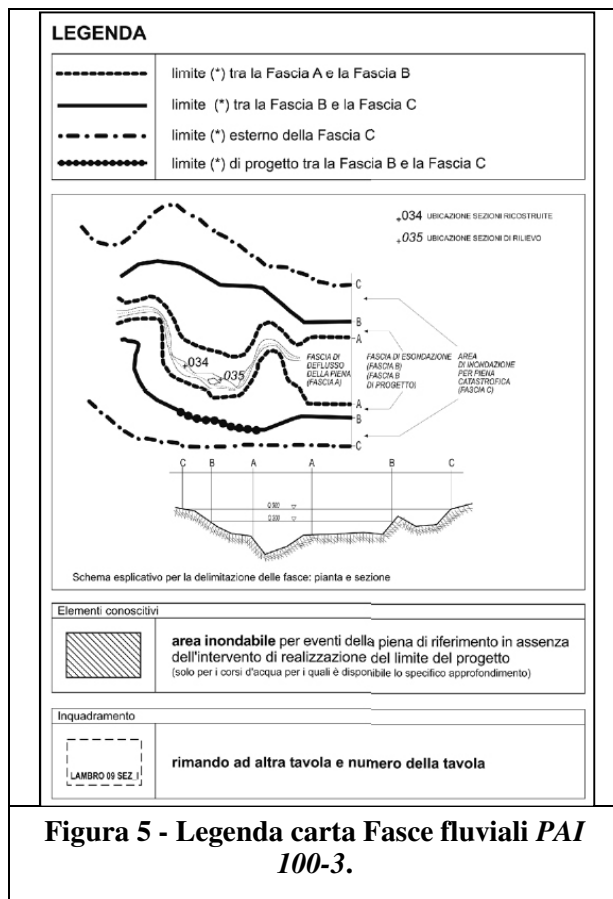


Figura 5 - Legenda carta Fasce fluviali PAI 100-3.

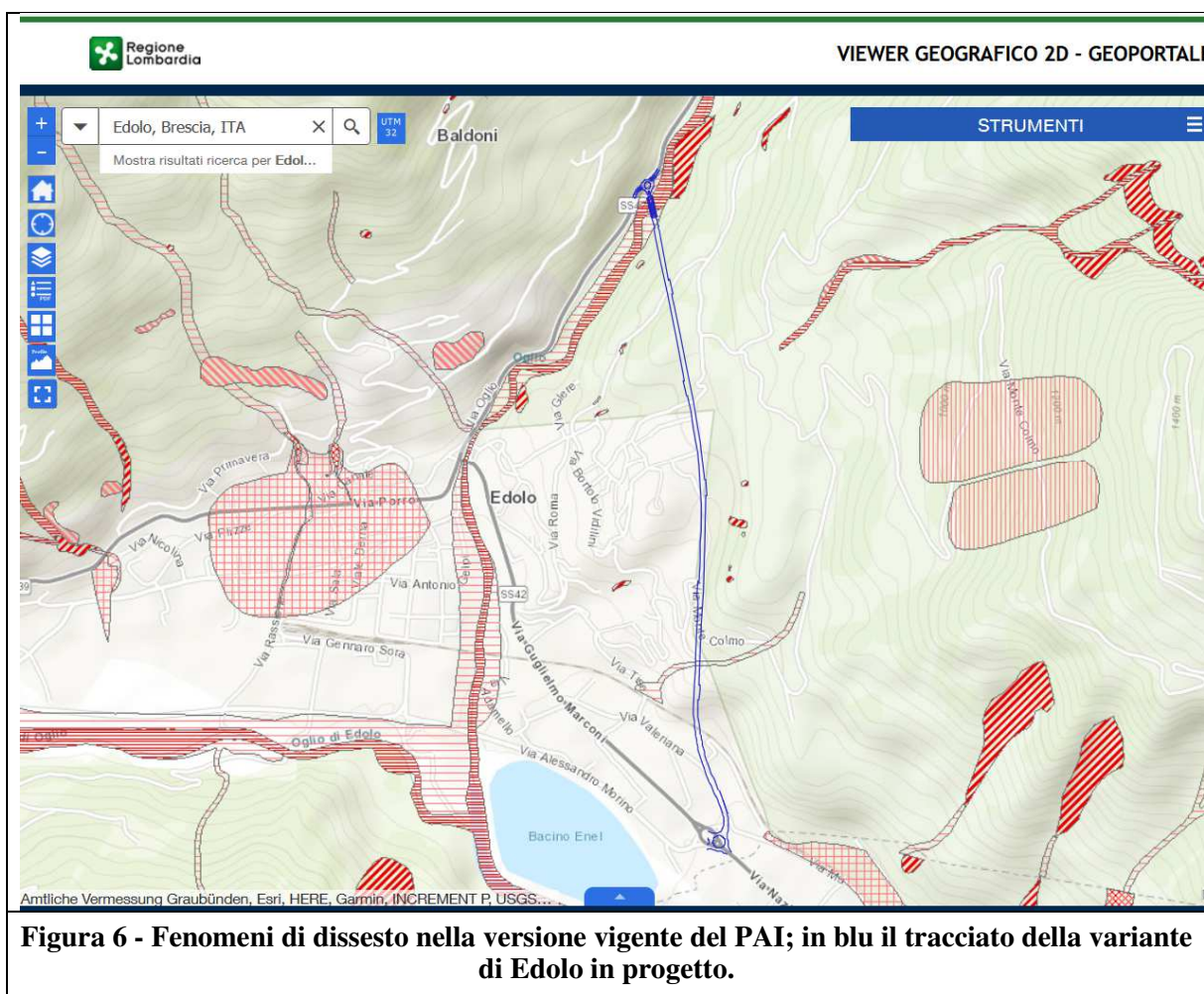
Dall'analisi della cartografia allegata al PAI originario 2001, si evince che l'area in esame non è interessata da alcuna situazione di dissesto (Figura 3 - Carta dei dissesti secondo la cartografia PAI originario 2001 – Fonte Geoportale della Regione Lombardia).

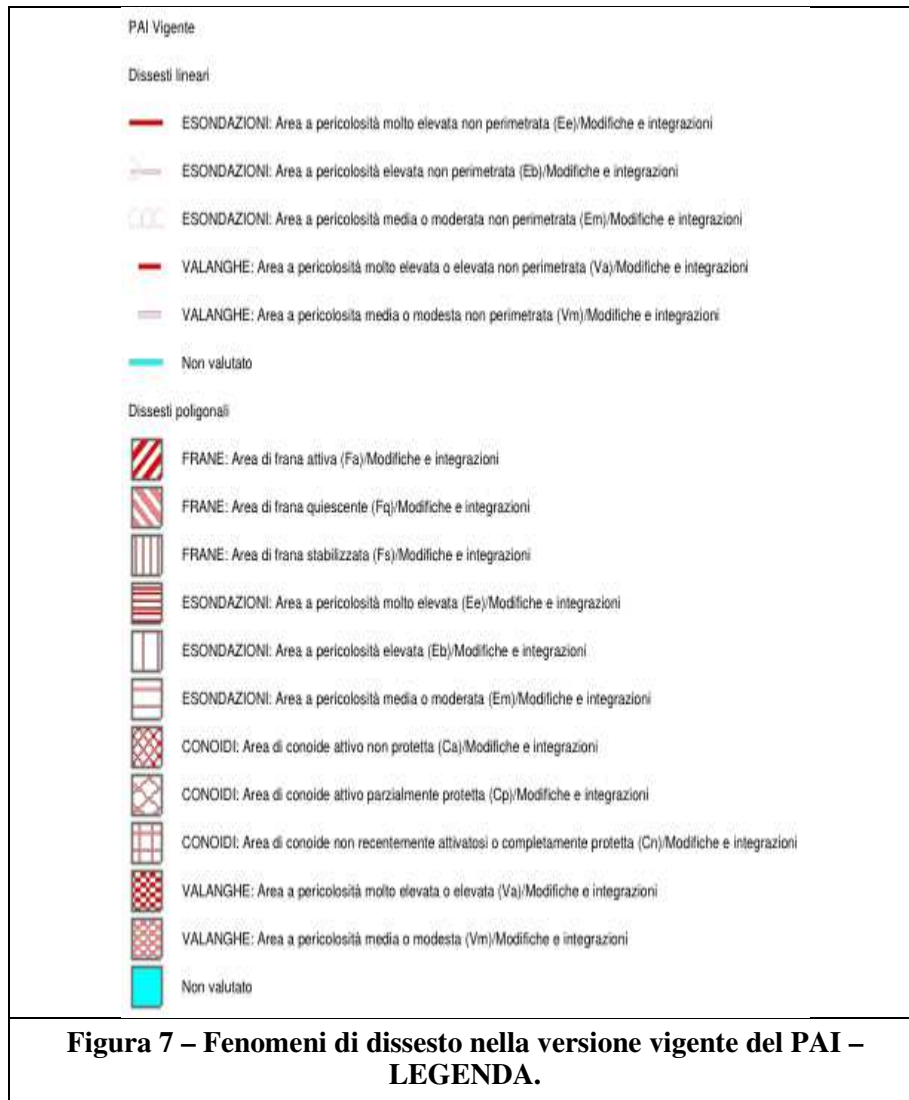
4.2.2.2 PAI vigente

La delimitazione e classificazione, in base alla pericolosità, dei fenomeni di dissesto in accordo al Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico del Bacino del Po (PAI) nella versione vigente, aggiornata, rispetto alla versione PAI originale approvata con DPCM 24 maggio 2001, secondo le procedure definite nel PAI e nelle disposizioni regionali attuative del PAI in campo urbanistico, è stralciata nella Figura 6 con riferimento alla legenda di Figura 7 – Fenomeni di dissesto nella versione vigente del PAI – LEGENDA.

L'osservazione della cartografia pone in evidenza che il tracciato stradale in progetto non interseca le aree delle Fasce fluviali del PAI, che sono state invece identificate per il tratto del Fiume Oglio più a valle rispetto al comune di Edolo. Si osserva dalla figura **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** che **il tracciato stradale, all'uscita N del tratto in galleria, interesserà con attraversamento in viadotto le aree a pericolosità molto elevate (Ee) e media (Em) del Fiume Oglio**, oltre ad un'area a pericolosità media associate a un corso d'acqua della rete idrografica minore, non interferito in quanto interessato dal tratto in galleria.

Per quanto concerne i dissesti di versante che interessano l'area oggetto dello studio, sono segnalati alcune frane attive (Fa) di piccole dimensioni e due episodi in frana stabilizzata (Fs) distribuiti nella porzione medio bassa del versante orografico sinistro.





4.2.3 Piano di Gestione del Rischio Alluvioni del Distretto Idrografico del Po

Il Dlgs 23 febbraio 2010, n.49 "Valutazione e gestione dei rischi di alluvioni – Attuazione della direttiva 2007/60/Ce" disciplina le attività di valutazione e di gestione dei rischi di alluvioni al fine di ridurre le conseguenze negative per la salute umana, per il territorio, per i beni, per l'ambiente, per il patrimonio culturale e per le attività economiche e sociali derivanti dalle stesse alluvioni.

Le autorità di bacino distrettuali di cui all'articolo 63 del D.lgs. n. 152 del 2006 predispongono piani di gestione del rischio alluvioni coordinati a livello di distretto idrografico. Per il distretto della Pianura Padana è stato predisposto il Piano di Gestione del Rischio Alluvioni del Po, brevemente PGRA-Po.

Nella seduta di Comitato Istituzionale del 17 dicembre 2015, con deliberazione n. 4/2015, è stato adottato il Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni (PGRA). Nella seduta di Comitato Istituzionale del 3 marzo 2016, con deliberazione n. 2/2016 è stato approvato il PGRA.

I piani di gestione del rischio di alluvioni riguardano tutti gli aspetti della gestione del rischio

di alluvioni, in particolare la prevenzione, la protezione e la preparazione, comprese le previsioni di alluvione e il sistema di allertamento nazionale e tengono conto delle caratteristiche del bacino idrografico o del sottobacino interessato.

Nell'ottica di organizzare la gestione del rischio alluvioni in maniera condivisa a livello nazionale ed europeo, le azioni del PGRA-Po sono classificate come segue:

- Prevenzione (es. vincoli all'uso del suolo)
- Protezione (es. realizzazione di opere di difesa strutturale)
- Preparazione (es. allerte, gestione dell'emergenza)
- Ritorno alla normalità e analisi (es. valutazione e ristoro danni, analisi degli eventi accaduti)

Il PGRA-Po contiene: la mappatura delle aree potenzialmente interessate da alluvioni, classificate in base alla pericolosità (aree allagabili) e al rischio; una diagnosi delle situazioni a maggiore criticità (sezione A); il quadro attuale dell'organizzazione del sistema di protezione civile in materia di rischio alluvioni e una diagnosi delle principali criticità (sezione B); le misure da attuare per ridurre il rischio nelle fasi di prevenzione e protezione (sezione A) e nelle fasi di preparazione, ritorno alla normalità ed analisi (sezione B).

Nelle mappe di pericolosità è raffigurata l'estensione potenziale delle inondazioni causate dai corsi d'acqua (naturali e artificiali), dal mare e dai laghi, con riferimento a tre scenari di probabilità di accadimento dell'evento alluvionale (alluvioni rare – Low probability L; alluvioni poco frequenti – Medium probability M; alluvioni frequenti – High probability H). Sulla base di queste indicazioni sono state prodotte le mappe della pericolosità avente questa legenda:

| Direttiva Alluvioni | | Pericolosità |
|--|---------------------------------------|----------------------|
| Scenario | Tempo di ritorno | |
| Aree allagabili – scenario frequente Elevata probabilità di alluvioni (H = high) | 20-50 anni (frequente) | P3 elevata |
| Aree allagabili – scenario poco frequente Media probabilità di alluvioni (M = medium) | 100-200 anni (poco frequente) | P2 media |
| Aree allagabili – scenario raro Scarsa probabilità di alluvioni o scenari di eventi estremi (L = low) | 500 anni o massimo storico registrato | P1 bassa |

Il tracciato in esame, in coerenza a quanto già osservato per il PAI, interferisce con *aree a Pericolosità RSCM, scenario frequente – H* e *Pericolosità RSCM scenario raro - L* come evidenziato nella figura successiva (Figura 8) e legenda di Figura 9.

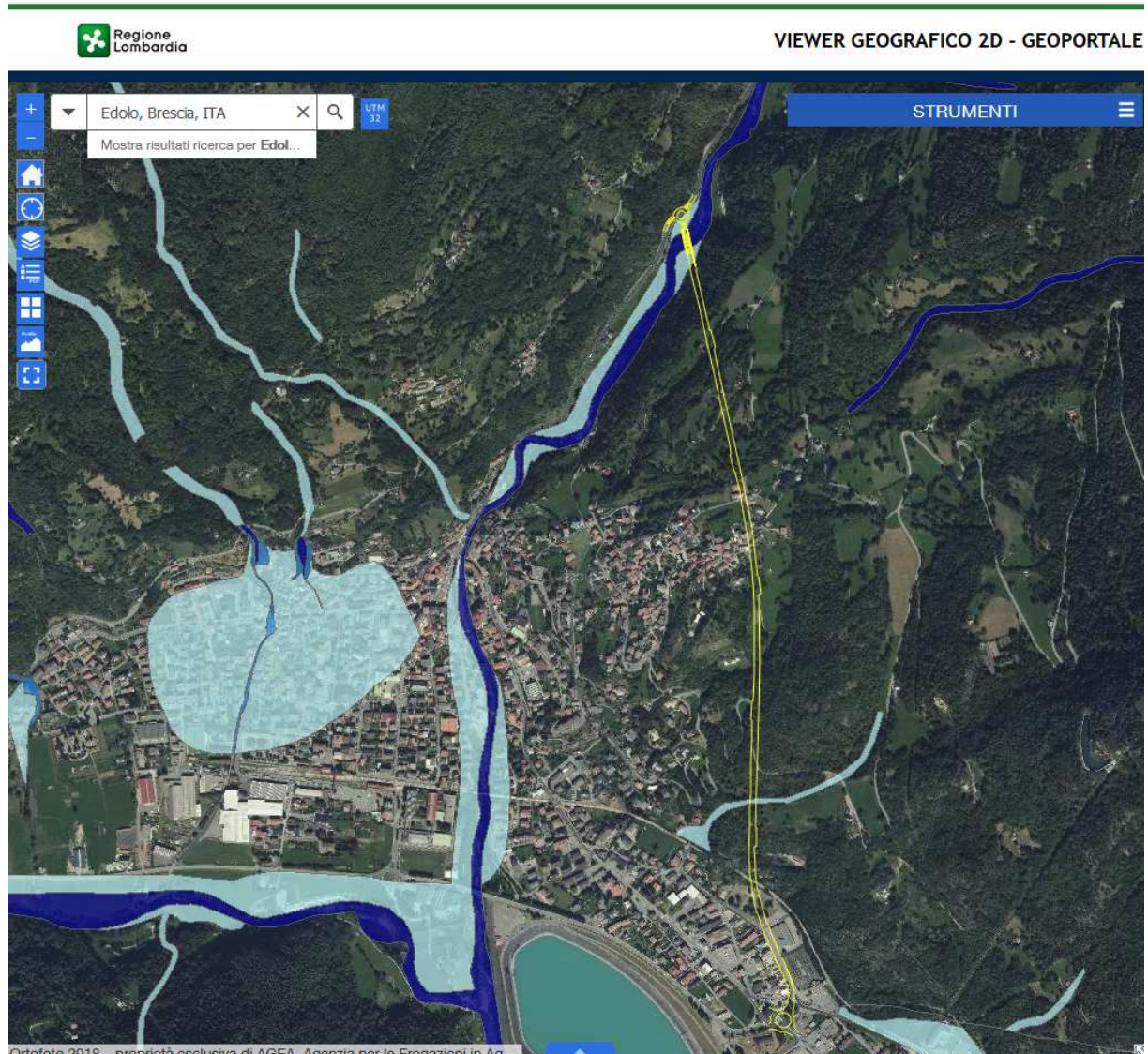


Figura 8 - Mappa delle aree a pericolosità idraulica - revisione 2020 delle mappe di pericolosità e rischio del Piano di Gestione del Rischio di Alluvione (Fonte dati: Geoportale Regione Lombardia)

Nell'ambito della redazione del PGRA è stata condotta una specifica attività volta a verificare le esigenze di aggiornamento degli strumenti di pianificazione di bacino vigenti (Piano per l'Assetto Idrogeologico – PAI e PAI Delta) allo scopo di armonizzarli con il Piano di Gestione del Rischio di Alluvioni – PGRA.

Un'attività particolare, in coordinamento con le Regioni del Distretto, ha riguardato le Norme di Attuazione (NA) del PAI e del PAI Delta allo scopo di aggiornarle ed integrarle in relazione alla necessità di acquisire i nuovi quadri conoscitivi del PGRA.

In data 7 dicembre 2016 con deliberazione n. 5 il Comitato Istituzionale ha adottato la variante alle norme del PAI e del PAI Delta.

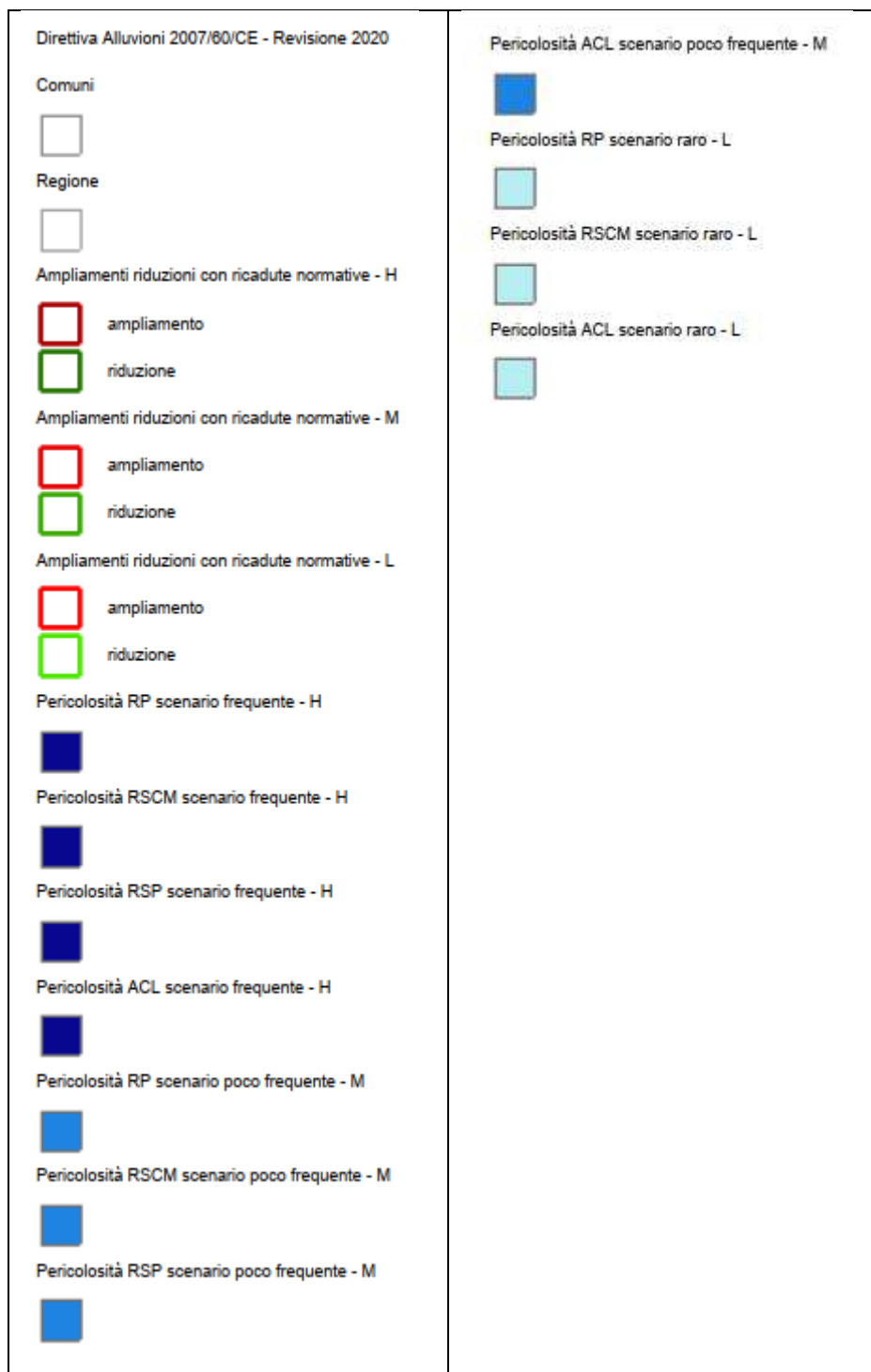


Figura 9 - Legenda delle mappe di pericolosità e rischio del Piano di Gestione del Rischio di Alluvione (revisione 2020).

In particolare, l'art. 58 della variante alle norme PAI fornisce l'aggiornamento agli indirizzi alla pianificazione urbanistica, ai sensi dell'art. 65 comma del Dlgs 152/06.

Secondo quanto riportato nell'articolo 58, per il Reticolo secondario collinare e montano (RSCM):

nelle aree interessate da alluvioni frequenti (aree P3) si applicano le limitazioni e prescrizioni stabilite dall'art. 9, commi 5 e 7 delle NTA PAI, rispettivamente per le aree Ee e per le aree Ca; nelle aree interessate da alluvioni poco frequenti (aree P2) si applicano le limitazioni e prescrizioni stabilite dall'art. 9, commi 6 e 8 delle NTA PAI, rispettivamente per le aree Eb e per le aree Cp; nelle aree interessate da alluvioni rare (aree P1) si applicano le limitazioni e prescrizioni stabilite dall'art. 9, commi 6bis e 9 delle NTA PAI, rispettivamente per le aree Em e per le aree Cn.

Le aree Ee identificate nel PAI per l'area di interesse sono qui classificate come aree Eb (o P2) per cui si applicano le disposizioni dell'art 9 comma 6 che permette come per le aree normate dal comma 5:

- *la ristrutturazione e la realizzazione di infrastrutture lineari e a rete riferite a servizi pubblici essenziali non altrimenti localizzabili e relativi impianti, previo studio di compatibilità dell'intervento con lo stato di dissesto esistente validato dall'Autorità competente. Gli interventi devono comunque garantire la sicurezza dell'esercizio delle funzioni per cui sono destinati, tenuto conto delle condizioni idrauliche presenti;*

Le aree Em identificate dal PAI per l'area di interesse sono invece assimilabili alle aree P1 per cui si applicano le disposizioni dell'art. 9 comma 6 bis come riportato nel precedente paragrafo.

Il progetto quindi è compatibile con le indicazioni del PGRA nella stessa misura in cui è compatibile con il PAI, ricordando che il progetto definitivo è assoggettato a studio di compatibilità idraulica relativamente alle opere infrastrutturali principali (quali il viadotto sull'Oglio) e secondarie.

4.3 Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (PTCP) – Provincia di Brescia

La Provincia di Brescia ha approvato il Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (PTCP) con Delibera di Consiglio n. 31 del 13 giugno 2014, avente come scopo l'adeguamento del quadro conoscitivo e normativo delle metodologie finalizzate alla difesa e allo sviluppo del territorio. In questa sede, viene fatto particolare riferimento alla componente riguardante i fenomeni di stabilità dei versanti, con riferimento particolare alla

- Tav. 3.2 sez. A: Inventario dei dissesti.

Uno stralcio della tavola è mostrato in Fig. 1 da osservare unitamente alla legenda di Fig. 2

Dall'osservazione della tavola si evince che gran parte del tracciato in galleria attraversa una deformazione gravitativa di versante (DGPV) che interessa la porzione inferiore e media del versante orografico sinistro della valle dell'Oglio. Sono presenti inoltre lungo il versante due scivolamenti rotazionali/traslativi, non determinati (già definiti nella carta dei dissesti del PAI come frane stabilizzate Fa) unitamente ad alcuni dissesti minori non determinati.

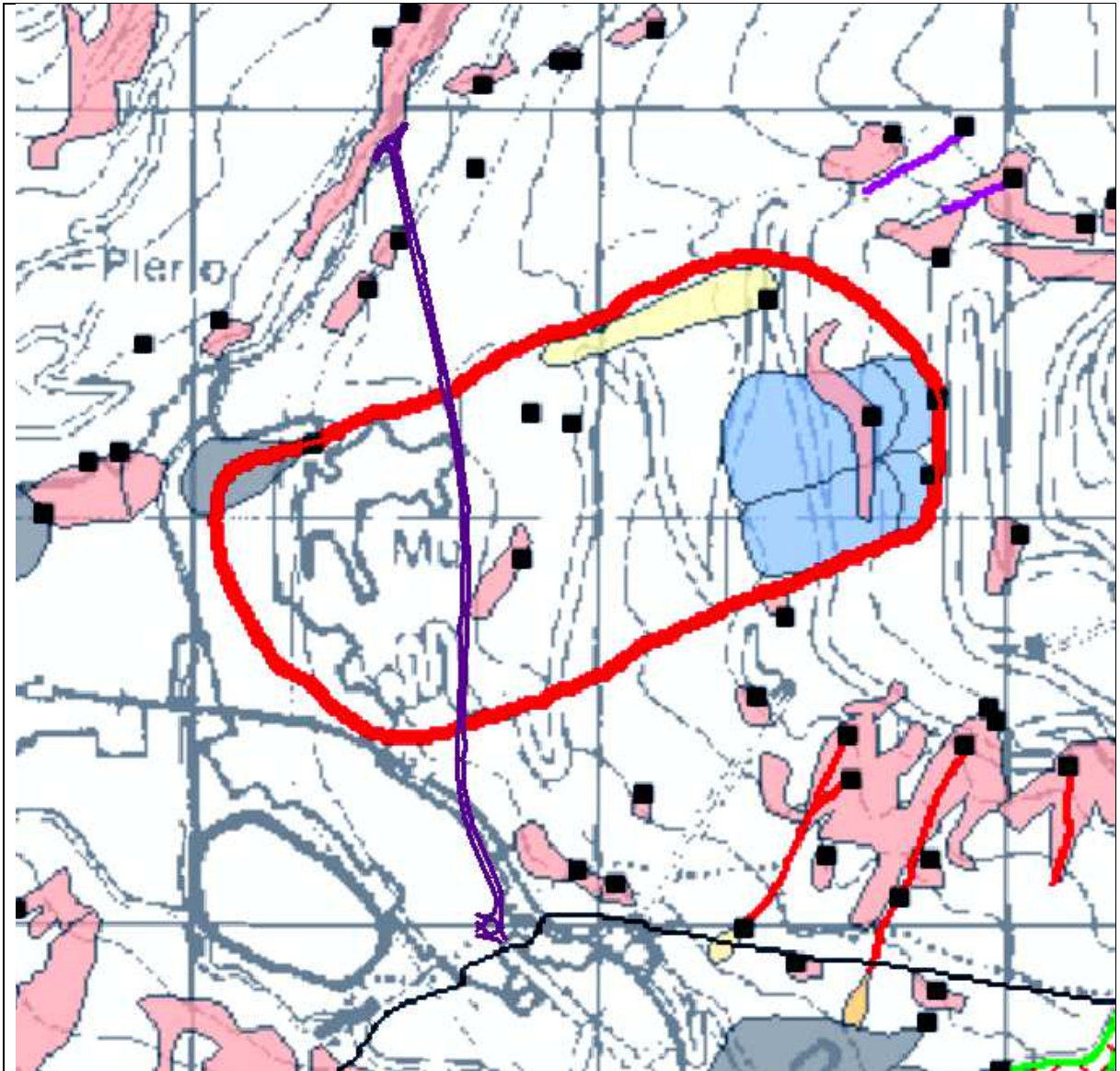


Fig. 1 - Stralcio tavola 3.2 allegata al PTCP della Provincia di Brescia; in nero il tracciato della variante di Edolo.



4.4 Piano di Governo del Territorio – Comune di Edolo

Il Piano di Governo del Territorio (PGT) del comune di Edolo è stato approvato dal Consiglio Comunale con Deliberazione n. 23 del 16 giugno 2017.

Il Piano di governo del territorio è composto da:

- **Documento di piano:** contiene gli elementi conoscitivi del territorio e le linee di sviluppo che l'amministrazione comunale intende perseguire.
- **Piano dei servizi:** riguarda le modalità di inserimento delle attrezzature di interesse pubblico o generale nel quadro insediativo.
- **Piano delle regole:** contiene gli aspetti regolamentativi e gli elementi di qualità della città costruita.

Risultano di particolare interesse per questo studio le informazioni correlate all'analisi della componente geologica, idrogeologica e sismica a supporto del PGT con riferimento alle seguenti tavole a corredo dello studio geologico e consultabili presso il geoportale della Regione Lombardia ed il Geoportale della Valle Camonica:

- Tav. 5 Pericolosità sismica locale
- Tav. 6 Carta della fattibilità
- Tav. 7 Dissesti PAI aggiornati

4.4.1 Pericolosità sismica locale

La carta della pericolosità sismica locale è uno strumento fondamentale e obbligatorio per tutti i Comuni del territorio italiano. Questa carta deriva dall'unione della carta geologica e dalla carta geomorfologica. Riporta la perimetrazione areale e lineare delle diverse situazioni tipo, in grado di determinare effetti sismici locali.

I possibili effetti in uno scenario di pericolosità sismica locale sono (Fig. 3):

- **Z1** fenomeni di instabilità (ad esempio aree con frane attive o quiescenti o aree potenzialmente franose);
- **Z2** cedimenti e/o liquefazioni (aree con terreni di fondazioni aventi caratteristiche geologico-tecniche scadenti);
- **Z3** amplificazioni topografiche (scarpate subverticali, bordi di cava, creste e/o cucuzzoli);
- **Z4** amplificazioni litologiche o geometriche (zone di fondovalle con depositi alluvionali e/o fluvio-glaciali, zone pedemontane di falda di detrito, conoidi, zone moreniche, zone con argille residuali);
- **Z5** comportamenti differenziali (zone di contatto stratigrafico e/o tettonico tra aree con caratteristiche fisico-meccaniche molto diverse)

Da N verso S il tracciato della variante di Edolo in progetto interessa le seguenti categorie di

pericolosità sismica locale:

- Z4a - Zona di fondovalle con presenza di depositi alluvionali e/o fluvioglaciali granulari e/o coesivi;
- Z3a - Zona di ciglio con altezza superiore a 10m
- Z1a/Z4c - Zona caratterizzata da movimenti franosi attivi / Zona morenica con presenza di depositi granulari e/o coesivi (comprese le coltri loessiche);
- Z4c - Zona morenica con presenza di depositi granulari e/o coesivi (comprese le coltri loessiche);

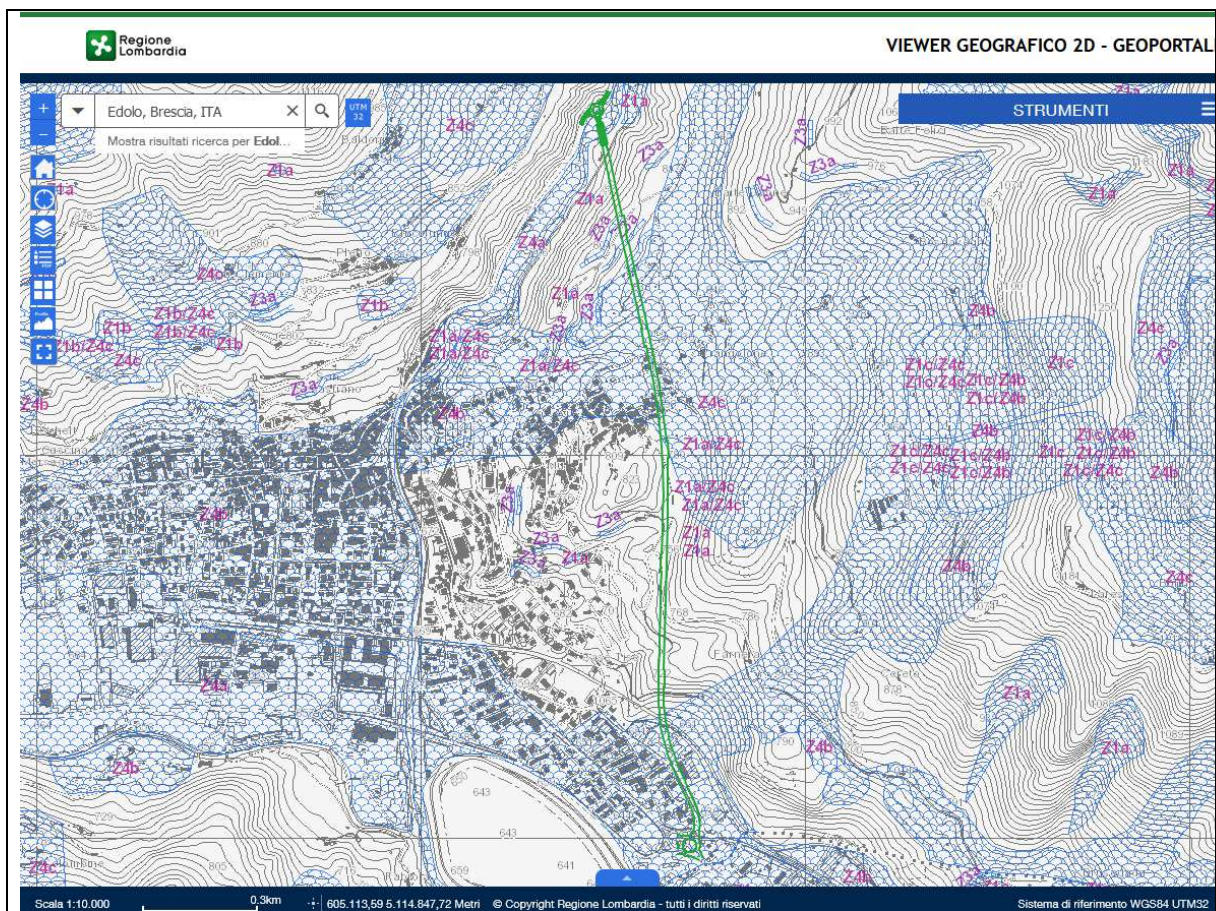
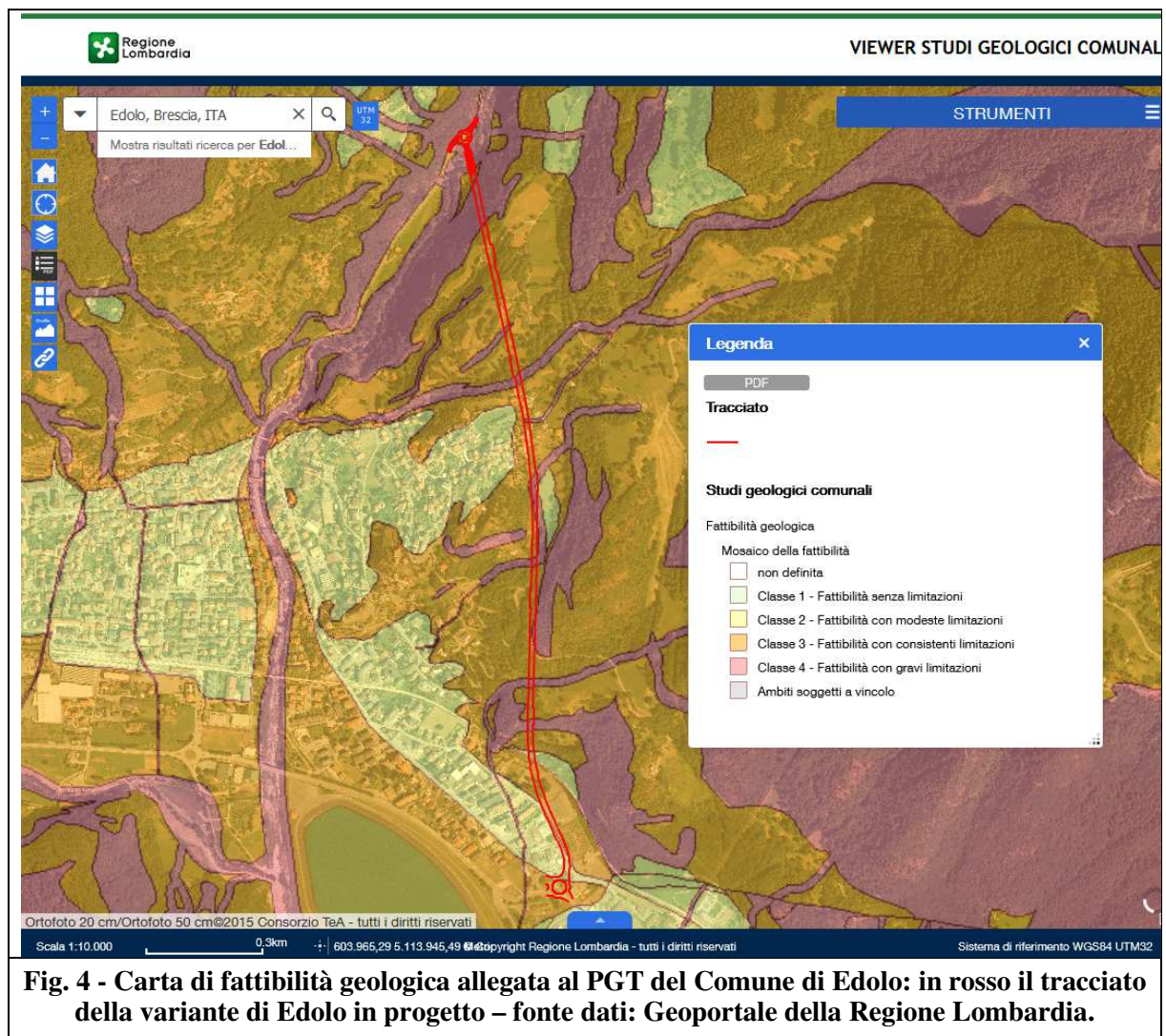


Fig. 3 – Carta della pericolosità sismica locale. In verde il tracciato della variante di Edolo in progetto – Fonte dati: Geoportale della Regione Lombardia.

4.4.2 Carta della fattibilità geologica

Ai sensi dell'art. 57 della L.R. 11 marzo 2005, n. 12 e con riferimento ai criteri attuativi di cui alla Deliberazione della Giunta Regionale n. 8/1566 del 22/12/2005 della Regione Lombardia, il territorio di Edolo è stato suddiviso in tre classi di fattibilità geologica. Le classi di fattibilità tengono conto dei singoli aspetti litologici, geomorfologici, idrogeologici, geotecnici e sismici delle aree, emersi dallo studio ed evidenziati nelle carte dei vincoli e di sintesi. A ciascuna classe di fattibilità individuata, corrispondono specifiche prescrizioni tecniche, riportate nel documento di piano approvato cui si rimanda direttamente per la trattazione approfondita. Le classi di fattibilità interferite dal tracciato in progetto si possono osservare in Fig. 4.



Il tracciato interessa settori ricadenti nelle seguenti classi di fattibilità:

- Classe 2 – Aree di fattibilità con modeste limitazioni;
- Classe 3 - Aree di fattibilità con consistenti limitazioni;
- Classe 4 - Aree di fattibilità con gravi limitazioni.

4.4.2.1 Prescrizioni normative

Classe 2 di fattibilità - Aree soggette a fattibilità con modeste limitazioni

La classe comprende le zone nelle quali sono state riscontrate modeste limitazioni all'utilizzo a scopi edificatori e/o alla modifica della destinazione d'uso, che possono essere superate mediante approfondimenti di indagine e accorgimenti tecnico-costruttivi e senza l'esecuzione di opere di difesa.

Comune di Edolo – Piano di Governo del Territorio – NTA del Documento di Piano 182a - Aree con versanti da debolmente a mediamente inclinati, situate nella fascia pedemontana, stabili Rientrano in questa classe le aree con versanti in genere poco acclivi. I terreni di copertura, con caratteristiche geotecniche da mediocri a buone, possiedono spessore anche notevole e poggiano sul substrato roccioso. Sono consentite tutte le tipologie di intervento. I progetti dovranno essere dotati delle indagini geologiche, idrogeologiche e geotecniche di dettaglio previste dal Decreto Ministero Infrastrutture e Trasporti 14/09/2005 “Norme Tecniche per le Costruzioni”.

- **2a** - Aree con versanti da debolmente a mediamente inclinati, situate nella fascia pedemontana, stabili Rientrano in questa classe le aree con versanti in genere poco acclivi. I terreni di copertura, con caratteristiche geotecniche da mediocri a buone, possiedono spessore anche notevole e poggiano sul substrato roccioso. Sono consentite tutte le tipologie di intervento. I progetti dovranno essere dotati delle indagini geologiche, idrogeologiche e geotecniche di dettaglio previste dal Decreto Ministero Infrastrutture e Trasporti 14/09/2005 “Norme Tecniche per le Costruzioni”.

Classe 3 di fattibilità - Aree soggette a fattibilità con consistenti limitazioni

La classe comprende le zone nelle quali sono state riscontrate consistenti limitazioni all'utilizzo a scopi edificatori e/o alla modifica della destinazione d'uso per le condizioni di pericolosità/vulnerabilità individuate, per il superamento delle quali potrebbero rendersi necessari interventi specifici o opere di difesa. L'utilizzo di tali aree sarà subordinato alla realizzazione di supplementi di indagine per acquisire maggiore conoscenza geologico-tecnica e/o idrogeologica dell'area e del suo intorno ed alla presentazione di eventuali progetti per la sistemazione e la bonifica dei siti. In queste aree è ipotizzabile solamente un'edificazione a basso impatto ambientale, che cerchi le soluzioni tecniche atte a ridurre al minimo sbancamenti e riporti. La nota geologica a supporto dei nuovi progetti di edificazione deve verificare preventivamente la documentazione geologica allegata al PGT ed eventualmente integrarla con verifiche di terreno e mediante campagne geognostiche, prove in situ ed in laboratorio oppure studi tematici a carattere idrogeologico, nivologico, ambientale, idraulico. Congiuntamente a tale nota geologica e, preventivamente al progetto di edificazione, deve essere presentato, ove necessario, un progetto esecutivo per la sistemazione e la bonifica dei luoghi.

Il particolare il Tecnico incaricato deve:

- fornire il quadro geologico sullo stato dei luoghi;
- dettagliare le problematiche geologiche presenti;
- illustrare il tipo di indagini di dettaglio effettuate, le motivazioni delle stesse ed esporne le conclusioni;
- predisporre un eventuale progetto teso alla salvaguardia del territorio e alla sistemazione dei siti;
- motivare i limiti ammissibili dell'intervento e stabilire le eventuali salvaguardie

Si specifica che le indagini e gli approfondimenti devono essere realizzati prima della progettazione degli interventi in quanto propedeutici alla pianificazione dell'intervento e alla progettazione stessa. Copia delle indagini effettuate e della relazione geologica di supporto deve essere consegnata, congiuntamente alla restante documentazione, in sede di presentazione dei Piani attuativi (L.R. 12/05, art. 14) o in sede di richiesta del permesso di costruire (L.R. 12/05, art. 38). Si sottolinea che gli approfondimenti di cui sopra, non sostituiscono, anche se possono comprendere, le indagini previste dal D.M. 14 settembre 2005 "Norme tecniche per le costruzioni".

Rientrano in questa classe le aree soggette ad una consistente limitazione della fattibilità suddivise, in funzione dei diversi fattori e problematiche, nelle cinque sottoclassi di seguito elencate.

- **3b** – Aree interessate da trasporto in massa e flusso di detrito su conoide Cn
 Sono aree che in passato sono state soggette a problematiche di tipo idraulico quali fenomeni di esondazione e trasporto solido e che attualmente hanno probabilità basse o nulle di essere interessate da fenomeni di dissesto e/o esondazione. Per tali aree gli approfondimenti saranno volti a valutare le condizioni di sicurezza del corso d'acqua, rilevare eventuali punti critici di possibile esondazione e definire portate liquide e liquido/solide. Nell'area di conoide dovranno essere individuate le eventuali deviazioni dei deflussi superficiali, restringimenti e/o ostacoli. Per gli interventi di nuova edificazione potranno essere introdotte eventuali limitazioni edificatorie e le seguiti misure di salvaguardia, valide per le aree esondabili, qualora si rilevino possibili fenomeni di esondazione della fase liquida:
 - a) Misure per evitare il danneggiamento dei beni e delle strutture
 - realizzare le superfici abitabili, le aree sede dei processi industriali, degli impianti tecnologici e degli eventuali depositi di materiali sopraelevate rispetto al livello della piena di riferimento;
 - realizzare le aperture degli edifici situate al di sotto del livello di piena a tenuta stagna; disporre gli ingressi in modo che non siano perpendicolari al flusso principale della corrente;
 - progettare la viabilità minore interna e la disposizione dei fabbricati così da limitare allineamenti di grande lunghezza nel senso dello scorrimento delle acque, che potrebbero indurre la creazione di canali di scorrimento a forte velocità;
 - progettare la disposizione dei fabbricati in modo da limitare la presenza di lunghe strutture trasversali alla corrente principale; •favorire il deflusso/assorbimento delle acque di esondazione, evitando interventi che ne comportino l'accumulo.
 - b) Misure atte a garantire la stabilità delle fondazioni

- opere di difesa per evitare i fenomeni di erosione delle fondazioni superficiali;
 - fondazioni profonde per limitare i fenomeni di cedimento o di rigonfiamento di suoli coesivi.
 - c) Misure per facilitare l'evacuazione di persone e beni in caso di inondazione
 - uscite di sicurezza situate sopra il livello della piena di riferimento aventi dimensioni sufficienti per l'evacuazione di persone e beni verso l'esterno o verso i piani superiori;
 - vie di evacuazione situate sopra il livello della piena di riferimento
 - d) Utilizzo di materiali e tecnologie costruttive che permettano alle strutture di resistere alle pressioni idrodinamiche;
 - e) Utilizzo di materiali per costruzione poco danneggiabili al contatto con l'acqua
- **3c – Area di cava dismessa.**
Con riferimento alle disposizioni di legge vigenti le aree in cui sono cessate le attività estrattive dovranno essere recuperate da un punto di vista ambientale. In tali aree saranno consentiti esclusivamente gli interventi finalizzati al recupero ambientale della zona. Qualsiasi progetto di recupero ambientale dovrà essere accompagnato da una relazione geologica, geotecnica e idrogeologica.
 - **3d – Aree con versanti acclivi potenzialmente instabili**
In questa sottoclasse si hanno consistenti limitazioni alla modifica della destinazione d'uso derivanti dalla presenza di versanti mediamente acclivi e potenzialmente soggetti a fenomeni di instabilità. Si tratta di aree a bosco di conifere, latifoglie e pascoli che hanno un notevole pregio naturalistico. In queste aree si riconoscono limitazioni alla modifica delle destinazioni d'uso legate al fatto che, anche dove si hanno condizioni stabili, interventi antropici errati potrebbero rompere l'equilibrio esistente e indurre situazioni di dissesto o provocare modifiche significative all'ambiente.
 - **3e – Aree con frane inattive**
Sono aree che in passato sono state soggette a frane superficiali di scivolamento e che attualmente sono stabili.

Classe 4 di fattibilità - Aree soggette a fattibilità con gravi limitazioni

L'alta pericolosità/vulnerabilità delle aree inserite in classe 4, comporta gravi limitazioni all'utilizzo a scopi edificatori e/o alla modifica della destinazione d'uso. Deve essere esclusa qualsiasi nuova edificazione, se non opere tese al consolidamento o alla sistemazione idrogeologica per la messa in sicurezza dei siti. Per gli edifici esistenti sono consentite esclusivamente le opere relative ad interventi di demolizione senza ricostruzione, manutenzione ordinaria e straordinaria, restauro, risanamento conservativo, come definiti dall'art. 27, comma 1, lettere a), b), c) della L.R. 12/05, senza aumento di superficie o volume e senza aumento del carico insediativo. Sono consentite le innovazioni necessarie per l'adeguamento alla normativa antisismica. In tali aree dovranno essere adottati i provvedimenti tesi a provvedere al trasferimento dei nuclei abitati esistenti.

Al fine di gestire eventuali situazioni di emergenza, dovranno essere predisposti idonei piani di protezione civile. Infrastrutture pubbliche e di interesse pubblico possono essere realizzate solo se non altrimenti localizzabili; dovranno comunque essere puntualmente e attentamente valutate

in funzione della tipologia di dissesto e del grado di rischio che determinano l'ambito di pericolosità/vulnerabilità omogenea. A tal fine, alle istanze per l'approvazione da parte dell'autorità comunale, deve essere allegata apposita relazione geologica e geotecnica che dimostri la compatibilità degli interventi previsti con la situazione di grave rischio idrogeologico.

- **4a** - Area di pertinenza del corso d'acqua soggetta a fenomeni erosivi collegati all'attività idrica.

L'istituzione di una fascia di rispetto per i corsi d'acqua è prevista dall'art. 96 della L. 523/1904 ed è stata definita nello studio del reticolo idrico minore, in attuazione della D.G.R. 25 gennaio 2002, n.7/7868 e successive modifiche. Si tratta di aree in genere comprese entro una fascia dei 10 m dalle sponde dei corsi d'acqua principali costituenti la rete idrografica del territorio, soggette a ricorrenti processi erosivi con possibile arretramento delle sponde. A queste aree vengono anche associate motivazioni di carattere ambientale in quanto spesso lungo il corso d'acqua è presente vegetazione di tipo arboreo e/o arbustivo. La rappresentazione grafica della fascia dei 10 m non sempre coincide con il reale andamento di campagna a causa della scarsa definizione cartografica di alcuni tratti di sponda dei corsi d'acqua; di conseguenza va ricordato che, per avere le fasce esatte, le distanze dai corsi d'acqua devono essere misurate, in campagna, dal piede arginale esterno o dalla sommità della sponda incisa. La restrizione della fattibilità va soprattutto intesa a tutela del reticolo idrografico naturale che può essere influenzato negativamente da strutture che determinano una riduzione della sezione idraulica e possono limitare nel tempo la disponibilità delle aree per eventuali opere idrauliche. Sui corsi d'acqua e nelle relative fasce di rispetto saranno consentiti solo gli interventi di difesa idraulica e recupero ambientale; sono previste indagini geologiche, geotecniche, idrogeologiche e idrauliche che dimostrino la compatibilità degli interventi previsti con la situazione di rischio potenziale presente.

- **4b** – Aree di frana attiva e/o quiescente, con e falde di detrito attive

Si tratta di versanti interessati da falde e con di detrito attive, fenomeni franosi attivi di scivolamento e/o di colata. Sono consentiti esclusivamente interventi di recupero dell'esistente come definito alle lettere a, b, c, dell'art. 27 della L.R. 12/2005 o di bonifica, anche da un punto di vista ambientale, mediante tecniche adeguate di consolidamento o di ripristino delle condizioni di stabilità (ingegneria naturalistica). Tali interventi dovranno essere accompagnati da studi di carattere geologico e ambientale allo scopo di valutare le condizioni locali di stabilità delle scarpate naturali o artificiali e di definire gli interventi di bonifica. I progetti di mitigazione dovranno verificare gli spessori del detrito, individuare l'eventuale presenza della falda idrica, verificare la stabilità del versante prima e dopo l'intervento.

- **4c** – Aree in erosione accelerata, aree di franosità diffusa, fenomeni di creep, potenziali crolli e cadute massi

Si tratta di aree degradate interessate da diffusi fenomeni di instabilità superficiale e di aree potenzialmente soggette a fenomeni di rilascio dell'ammasso roccioso in grado di generare nel tempo frane di crollo e caduta massi. Sono consentiti esclusivamente interventi di recupero o di protezione mediante tecniche adeguate di consolidamento dei versanti. Tali interventi dovranno essere accompagnati da studi geologici allo scopo di valutare le condizioni locali di stabilità delle scarpate naturali o artificiali e di

predisporre le opere di bonifica, necessarie. I progetti di mitigazione dovranno verificare gli spessori del detrito, individuare l'eventuale presenza della falda idrica. Per le aree potenzialmente soggette a crolli bisognerà fare una caratterizzazione geomeccanica e classificazione degli ammassi rocciosi, simulazione e modellazione del fenomeno di caduta in condizioni gravose, valutazione puntuale del rischio di caduta massi ed eventuali progettazioni di opere di difesa attiva o passiva.

- **4d** – Aree interessate da trasporto in massa e flusso di detrito su conoide attiva Ca
 Sono aree soggette a problematiche di tipo idraulico quali fenomeni di esondazione e trasporto solido su conoide, in tal senso valgono le limitazioni di cui ai punti precedenti ed in particolare quanto contenuto nell'art. 7 delle NTA del Piano di Assetto Idrogeologico, ovvero: fatto salvo quanto previsto dall'art. 3 ter del D.L. 12 ottobre 2000, n. 279, convertito in L. 11 dicembre 2000, n. 365, nelle aree Ca sono esclusivamente consentiti:
 - gli interventi di demolizione senza ricostruzione;
 - gli interventi di manutenzione ordinaria e straordinaria, di restauro e di risanamento conservativo degli edifici, così come definiti alle lettere a), b) e c) dell'art. 27 della L.R. 12/05;
 - gli interventi volti a mitigare la vulnerabilità degli edifici e degli impianti esistenti e a migliorare la tutela della pubblica incolumità, senza aumenti di superficie e volume, senza cambiamenti di destinazione d'uso che comportino aumento del carico insediativo;
 - gli interventi necessari per la manutenzione ordinaria e straordinaria di opere pubbliche e di interesse pubblico e di restauro e di risanamento conservativo di beni di interesse culturale, compatibili con la normativa di tutela;
 - i cambiamenti delle destinazioni colturali, purché non interessanti una fascia di ampiezza di 4 m dal ciglio della sponda ai sensi del R.D. 523/1904;
 - gli interventi volti alla ricostituzione degli equilibri naturali alterati e alla eliminazione, per quanto possibile, dei fattori incompatibili di interferenza antropica;
 - le opere di difesa, di sistemazione idraulica e di monitoraggio dei fenomeni;
 - la ristrutturazione e la realizzazione di infrastrutture lineari e a rete riferite a servizi pubblici essenziali non altrimenti localizzabili, previo studio di compatibilità dell'intervento con lo stato di dissesto esistente valicato dall'Autorità competente. Gli interventi devono comunque garantire la sicurezza dell'esercizio delle funzioni per cui sono destinati, tenuto conto delle condizioni idrauliche presenti;
 - l'ampliamento o la ristrutturazione degli impianti di trattamento delle acque reflue.
- **4e** – Aree interessate da valanghe
 Si tratta di aree periodicamente soggette a fenomeni valanghivi più o meno importanti. Gli interventi consentiti e necessariamente preceduti da approfonditi studi geologici e nivologici sono riferiti ad aree che possono essere interessate solo marginalmente da fenomeni valanghivi più o meno estesi. Dovranno essere predisposte le tipologie

d'intervento più adatte per la difesa dalle valanghe e attivati monitoraggi e modelli previsionali.

- **4f – Aree con emergenze idriche (salvaguardia delle captazioni ad uso idropotabile)**
 Si tratta delle aree in cui vi sono le emergenze idriche sfruttate ad uso idropotabile. Dovranno essere rispettate le disposizioni di legge vigenti (D.P.R. 236 1988 e D.lgs. 3 aprile 2006, n.152) ed in particolare quanto indicato all'art. 94 del D.lgs. n. 152 per le zone di tutela assoluta. La zona di tutela assoluta è costituita dall'area immediatamente circostante le captazioni o derivazioni: essa, in caso di acque sotterranee e, ove possibile, per le acque superficiali, deve avere un'estensione di almeno dieci metri di raggio dal punto di captazione, deve essere adeguatamente protetta e dev'essere adibita esclusivamente a opere di captazione o presa e ad infrastrutture di servizio. Valgono oltre alle limitazioni della zona 4, le seguenti limitazioni valide anche per la zona di rispetto e sono pertanto vietati:
 - a) dispersione di fanghi e acque reflue, anche se depurati;
 - b) accumulo di concimi chimici, fertilizzanti o pesticidi;
 - c) spandimento di concimi chimici, fertilizzanti o pesticidi, salvo che l'impiego di tali sostanze sia effettuato sulla base delle indicazioni di uno specifico piano di utilizzazione che tenga conto della natura dei suoli, delle colture compatibili, delle tecniche agronomiche impiegate e della vulnerabilità delle risorse idriche;
 - d) dispersione nel sottosuolo di acque meteoriche proveniente da piazzali e strade;
 - e) aree cimiteriali;
 - f) apertura di cave che possono essere in connessione con la falda;
 - g) apertura di pozzi ad eccezione di quelli che estraggono acque destinate al consumo umano e di quelli finalizzati alla variazione dell'estrazione ed alla protezione delle caratteristiche quali-quantitative della risorsa idrica;
 - h) gestione di rifiuti;
 - i) stoccaggio di prodotti ovvero sostanze chimiche pericolose e sostanze radioattive;
 - j) centri di raccolta, demolizione e rottamazione di autoveicoli;
 - k) pozzi perdenti; n) pascolo e stabulazione di bestiame che ecceda i 170 chilogrammi per ettaro di azoto presente negli effluenti, al netto delle perdite di stoccaggio e distribuzione. È comunque vietata la stabulazione di bestiame nella zona di rispetto ristretta.

5. INQUADRAMENTO SISMICO

5.1 Generalità

Il presente capitolo ha in lo scopo di riassumere il quadro di riferimento per il progetto in merito alla tettonica e sismicità del sito, con riferimento sia ai contributi della recente campagna indagini [4] che alla documentazione specifica del Progetto Preliminare [1][2][3].

Dopo una breve descrizione della sismicità storica della Regione Lombardia e del Comune di

Edolo (comprendete gli eventi sismici che a partire dal XI secolo hanno interessato l'area), vengono riportate le fasi fondamentali della procedura seguita per la valutazione della pericolosità sismica, su cui la normativa nazionale attuale fa riferimento per la nuova classificazione sismica.

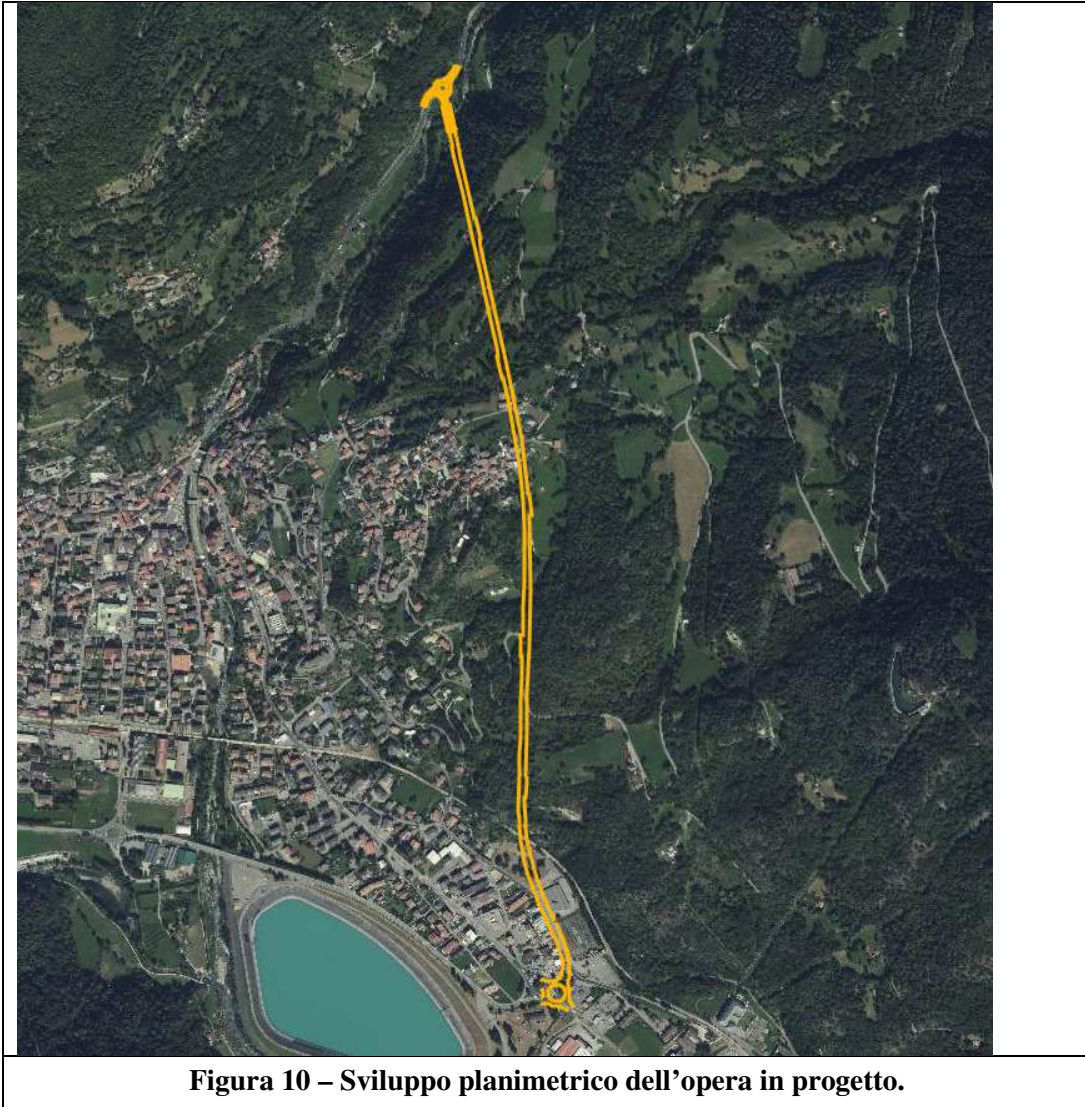


Figura 10 – Sviluppo planimetrico dell'opera in progetto.

5.2 Sismicità storica, recente, e contesto geodinamico

L'analisi della sismicità storica e recente del comune di Edolo, ricavata dal database macrosismico italiano DBMI15 con copertura temporale estesa a tutto il 2019, evidenzia risentimenti con intensità macrosismica massima intorno a 4-5, come mostrato di seguito in forma grafica e tabellare in Figura 11.

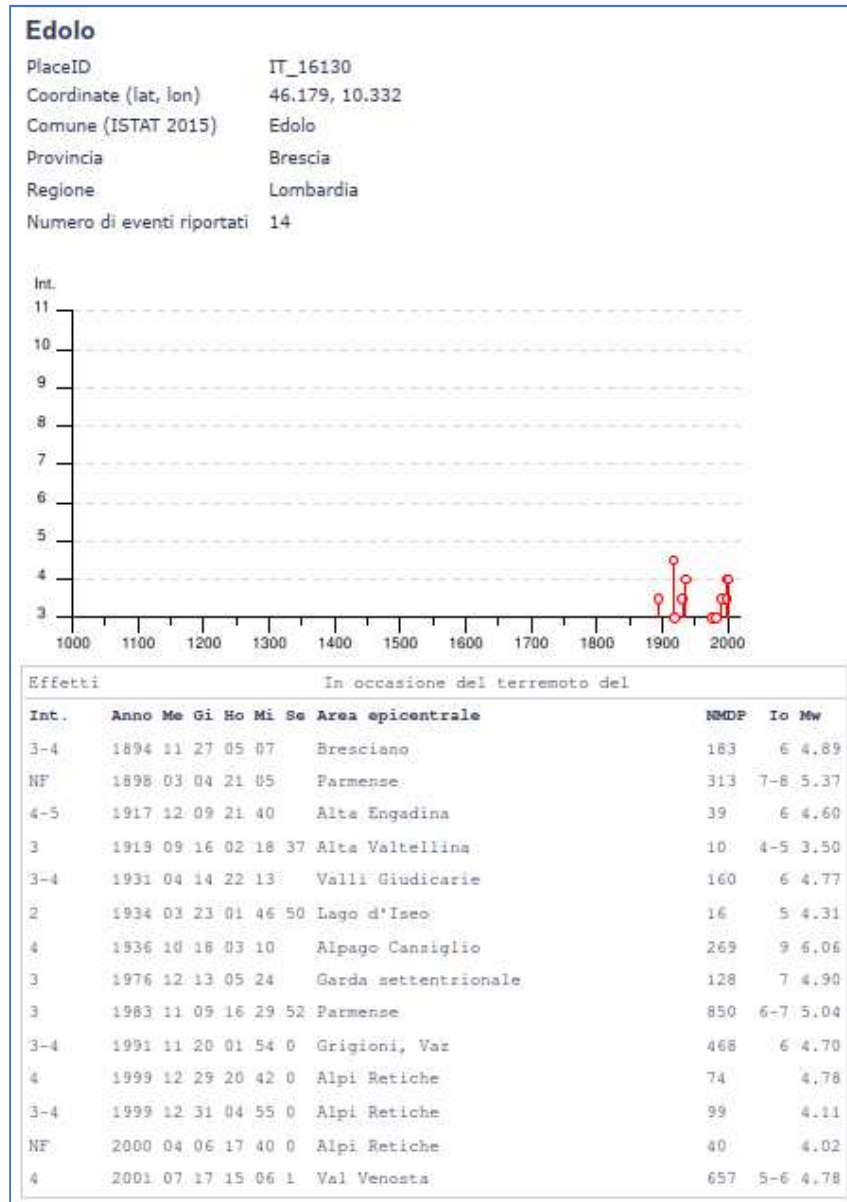


Figura 11 – Storia sismica del comune di Edolo

Tra le massime intensità macrosimiche osservate al sito si segnalano quelle relative all'evento del 1917, con epicentro nell'area dell'Alta Engadina e magnitudo momento all'epicentro pari a 4,60 ed all'evento del 1936 con epicentro ad Alpago Cansiglio e magnitudo momento all'epicentro pari a 6,06.

La sismicità risentita nell'area, compresa all'interno della zona sismogenetica 907 della zonazione ZS9, è riferibile dal punto di vista geodinamico prevalentemente alle zone sismogenetiche 906 e 907, come mostrato nella seguente tabella

CPTI04 - Risultato dell'interrogazione per parametri

Interrogazione effettuata sui seguenti parametri:

Area circolare con centro C (46.179, 10.932) e raggio 50 km
a partire dal 217/01/01 fino al 2002/12/31

| N | Tr | Anno | Me | Gi | Or | Mi | Se | AE | Rt | Np | Imx | Io | TI | Lat | Lon | TL | Mav | Daw | TW | Maa | Das | TS | Msp | Dep | ZS9 | TZ | Ncft | Nnt | Ncpt |
|------|----|------|----|----|----|----|----|----------------|-------|-----|-----|----|----|--------|--------|----|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|----|------|------|------|
| 322 | CP | 1623 | 2 | 20 | | | | CHIESA | VGL91 | | | | | 46.3 | 9.767 | | 4.83 | 0.26 | 4.30 | 0.39 | | 4.53 | 0.36 | 903 | G | | 2014 | 322 | |
| 383 | DI | 1688 | 5 | 25 | | | | V. GIUDICARIE | DOM | 4 | 65 | 65 | | 46.024 | 10.864 | A | 5.00 | 0.26 | 4.56 | 0.38 | | 4.76 | 0.35 | | | | 253 | 383 | |
| 631 | DI | 1733 | 7 | 23 | | | | VAL DI LEDRO | DOM | 4 | 65 | 65 | | 45.978 | 10.808 | A | 5.03 | 0.33 | 4.60 | 0.49 | | 4.30 | 0.45 | 906 | G | | 255 | 631 | |
| 877 | DI | 1851 | 8 | 3 | | | | GIUDICARIE | DOM | 15 | 60 | 60 | | 45.938 | 10.561 | A | 4.96 | 0.17 | 4.49 | 0.26 | | 4.70 | 0.24 | | | | 260 | 877 | |
| 882 | CP | 1852 | 7 | 29 | 12 | 40 | | PIZ BERNINA | VGL91 | | | | | 46.417 | 9.35 | | 4.83 | 0.26 | 4.30 | 0.39 | | 4.53 | 0.36 | 903 | G | | 360 | 882 | |
| 1076 | DI | 1882 | 2 | 27 | 6 | 30 | | ROVETTA | DOM | 37 | 65 | 65 | | 45.878 | 9.926 | A | 4.96 | 0.13 | 4.49 | 0.20 | | 4.70 | 0.19 | 907 | A | | 290 | 1076 | |
| 1180 | DI | 1891 | 12 | 22 | | | | SONDRIO | DOM | 7 | 55 | 55 | | 46.139 | 9.829 | A | 4.63 | 0.13 | 4.00 | 0.20 | | 4.25 | 0.19 | 903 | A | | 2050 | 1180 | |
| 1483 | DI | 1907 | 4 | 20 | 13 | 25 | | GRAN ZEBRU' | DOM | 28 | 60 | 60 | | 46.512 | 10.482 | A | 4.66 | 0.11 | 4.05 | 0.17 | | 4.23 | 0.16 | 903 | A | | 2069 | 1483 | |
| 1688 | CP | 1919 | 9 | 16 | 2 | 13 | 37 | SVIZZERA | POSS5 | | | | | 46.4 | 10 | | 4.68 | 0.14 | 4.08 | 0.21 | | 4.32 | 0.19 | 903 | G | | 364 | 1688 | |
| 1854 | DI | 1931 | 4 | 14 | 22 | 13 | | GIUDICARIE | DOM | 160 | 60 | 60 | | 45.973 | 10.665 | A | 4.89 | 0.09 | 4.38 | 0.13 | | 4.60 | 0.12 | | | | 272 | 1854 | |
| 1889 | CP | 1934 | 3 | 23 | 1 | 46 | 50 | PISOGNE | POSS5 | | | | | 45.8 | 10.1 | | 4.63 | 0.11 | 4.00 | 0.16 | | 4.25 | 0.15 | 907 | A | | 295 | 1889 | |
| 1928 | DI | 1937 | 6 | 7 | 22 | 2 | | PEJO | DOM | 5 | 60 | 60 | | 46.343 | 10.551 | A | 4.71 | 0.09 | 4.12 | 0.14 | | 4.36 | 0.13 | | | | 2103 | 1928 | |
| 2017 | CP | 1948 | 7 | 17 | 19 | 34 | 3 | BAZENA | POSS5 | | | | | 45.9 | 10.4 | | 4.95 | 0.11 | 4.48 | 0.16 | | 4.69 | 0.15 | 907 | A | | 297 | 2017 | |
| 2144 | DI | 1960 | 2 | 19 | 2 | 30 | | GIUDICARIE | DOM | 50 | 60 | 60 | | 45.806 | 10.625 | A | 4.83 | 0.26 | 4.30 | 0.39 | | 4.53 | 0.36 | 906 | G | | 276 | 2144 | |
| 2357 | CP | 1975 | 6 | 1 | 13 | 25 | 56 | CIMA BRENTA | POSS5 | | | | | 46.2 | 10.9 | | 4.63 | 0.13 | 4.00 | 0.20 | | 4.25 | 0.19 | | | | 279 | 2357 | |
| 2372 | DI | 1976 | 12 | 13 | 5 | 24 | | RIVA DEL GARDA | DOM | 128 | 70 | 70 | | 45.894 | 10.799 | A | 4.89 | 0.10 | 4.38 | 0.15 | | 4.60 | 0.14 | 906 | A | | 280 | 2372 | |
| 2528 | DI | 1999 | 12 | 29 | 20 | 42 | 35 | ALPI CENTRALI | EMING | 78 | 55 | 50 | | 46.464 | 10.267 | A | 4.82 | 0.18 | 0 | 4.33 | 0.14 | | 4.55 | 0.13 | 903 | G | | | |

Numero di record estratti: 17

Figura 12 - da CPTI04, risultato dell'interrogazione effettuata sui seguenti parametri: eventi risentiti in un'area circolare di 50 km di raggio con centro sul sito di progetto

Come si può osservare nella seguente Figura 13, l'area di interesse ricade esternamente alle zone sismogenetiche riconosciute dalla zonazione ZS9 ed ai meccanismi focali prevalenti ad esse associati.

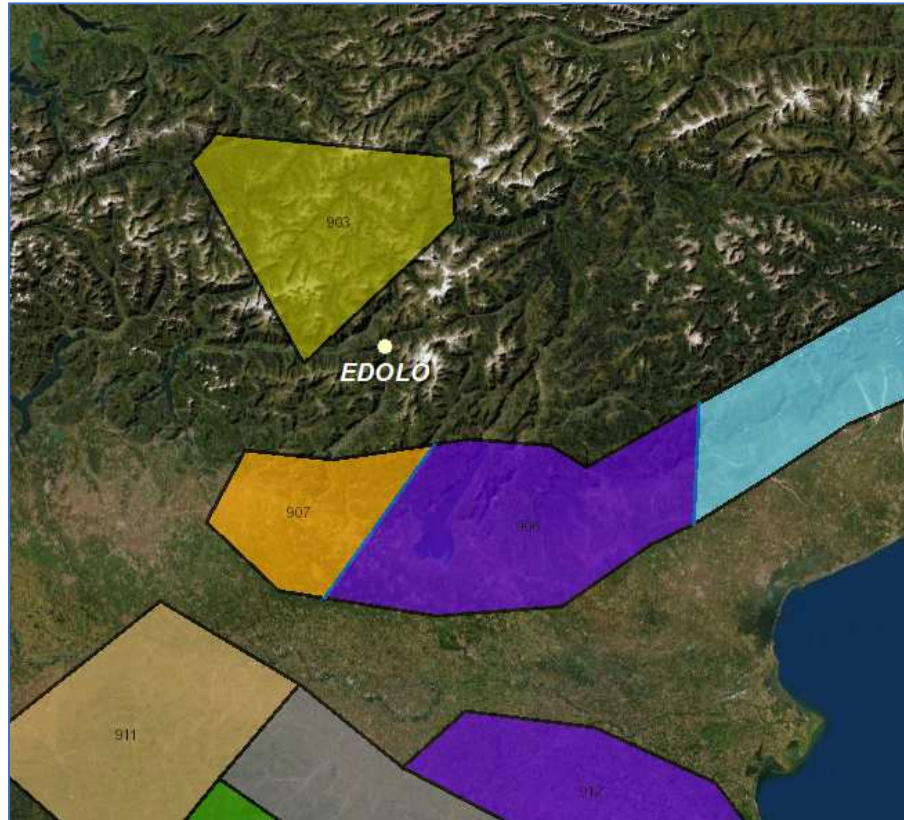


Figura 13 – Zonazione sismogenetica ZS9

5.3 Sorgenti sismogenetiche e faglie capaci

Il recente database DISS 3.2.1, reso disponibile dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, non individua sorgenti sismogenetiche nelle immediate vicinanze del sito di progetto.

Ampliando l'area di indagine si individuano le seguenti sorgenti sismogenetiche:

- ITCS002 – Western South Alps external thrust deep
- ITCS010 – Western South Alps internal thrust
- ITCS048 – Giudicarie
- ITIS069 – Salò
- ITCS072 – Capriano÷Castenedolo back thrust
- ITCS073 – Monte Baldo
- ITCS113 – Sirmione
- ITCS114 – Solferino
- ITCS115 – Western South Alps external thrust shallow-west
- ITCS116 – Western South Alps external thrust shallow-east

I massimi valori di magnitudo momento registrati nelle sorgenti sismogenetiche sopra indicate e la minima distanza dal sito in esame sono mostrate nella seguente Tabella 1:

| Sorgente sismogenetica | Profondità [km] | Magnitudo momento Mw | Distanza minima dal sito [km] |
|------------------------|-----------------|----------------------|-------------------------------|
| ITCS002 | 6÷13 | 6.0 | 12.8 |
| ITCS010 | 5÷12 | 5.5 | 7.3 |
| ITCS048 | 5÷12 | 5.7 | 5.7 |
| ITCS069 | 6.5÷9.0 | 5.7 | 7.4 |
| ITCS072 | 1÷6 | 6.0 | 18.2 |
| ITCS073 | 3÷9 | 5.5 | 27.0 |
| ITCS113 | 2÷7 | 6.0 | 15.4 |
| ITCS114 | 3÷8 | 6.0 | 24.9 |
| ITCS115 | 2÷6 | 6.0 | 42.6 |
| ITCS116 | 2.5÷5.5 | 5.5 | 32.6 |

Tabella 1– Sorgenti sismiche (da database DISS 3.2.1).

L'ubicazione delle sorgenti sismogenetiche sopra indicate è di seguito mostrata (Figura 14) in rapporto all'ubicazione del sito di progetto.

La consultazione del Catalogo delle Faglie Capaci – Database ITHACA ha infine consentito di escludere la presenza di elementi attivi noti in grado di dar luogo ad effetti di superficie in corrispondenza dell'area di progetto, identificato dal cerchio rosso, come mostrato nella immagine di Figura 15.

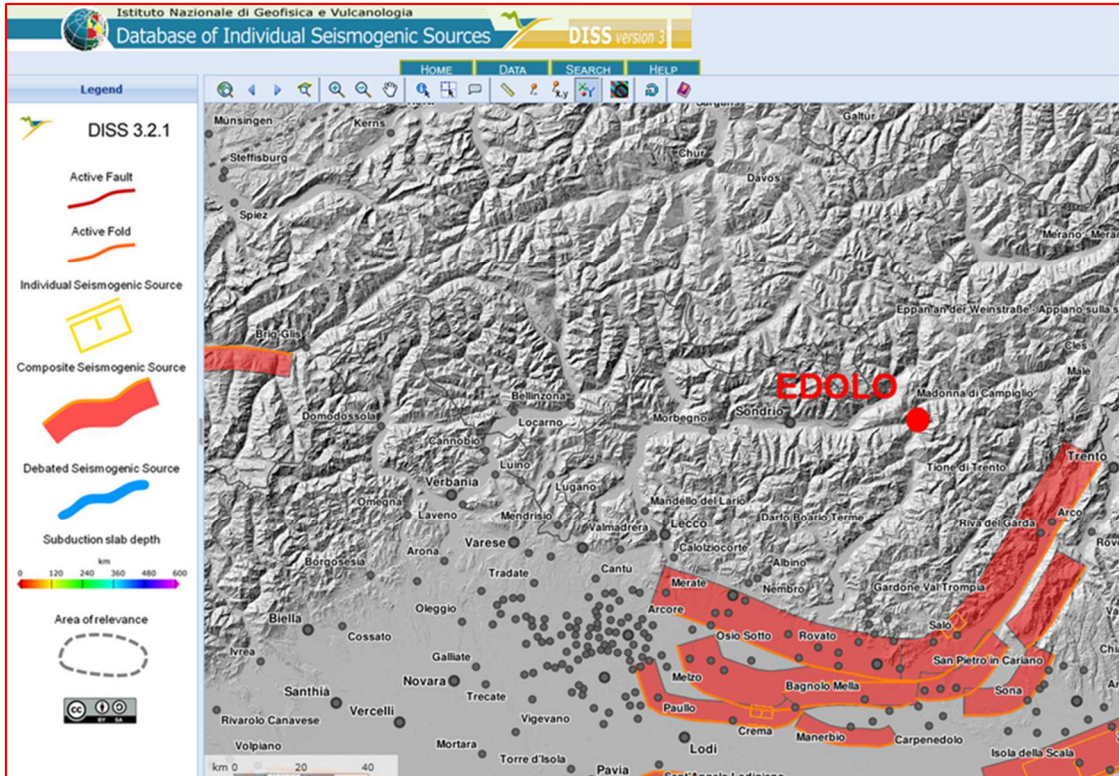


Figura 14 - Sorgenti sismogenetiche (da database DISS 3.2.1).

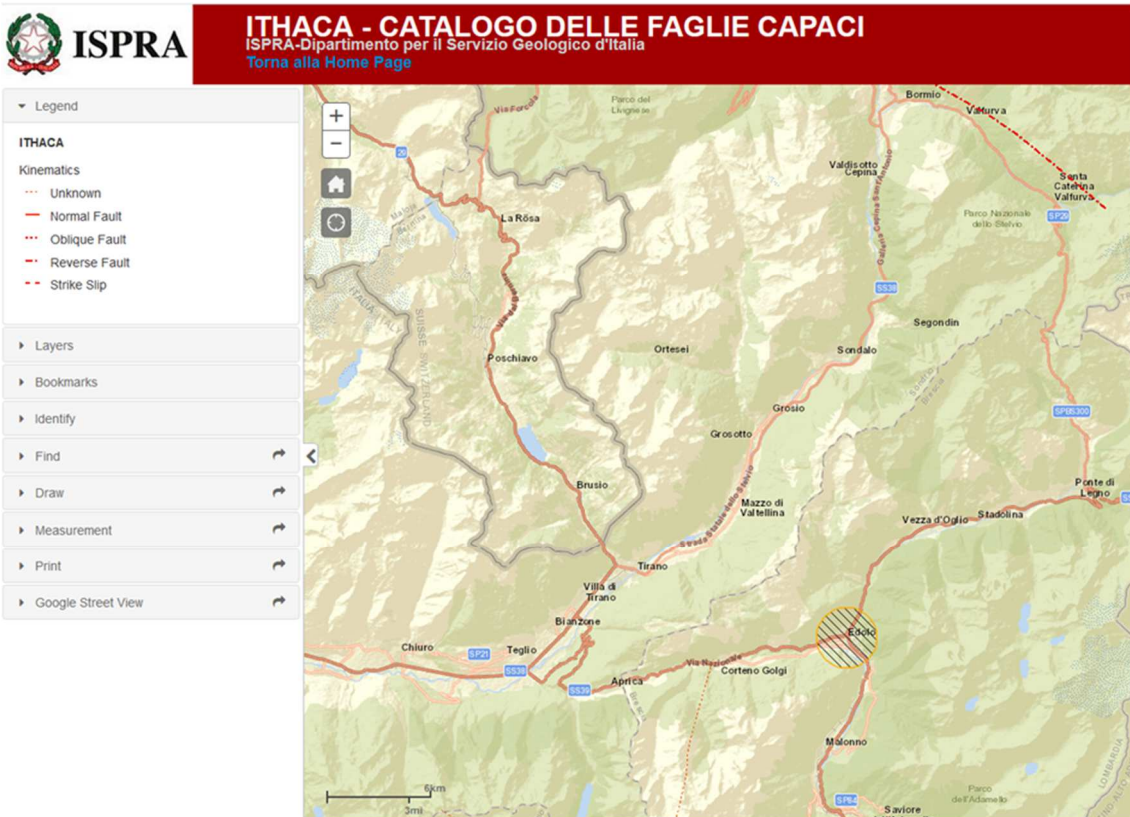


Figura 15 – Faglie capaci (da database ITHACA).

5.4 Classificazione sismica dell'area

5.4.1 Sismicità di base dell'area

Il Comune di Edolo è classificato in **zona 3** contraddistinto da un parametro di accelerazione massima orizzontale ag compreso nell'intervallo **0,05-0,075*g m/s²** (valore riferito ad una probabilità di superamento del 10% in 50 anni - Figura 16) come segnalato dall'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia (<http://esse1-gis.mi.ingv.it/>). La Regione Lombardia con *D.G.R. 7 novembre 2003 - n. 7/14964* ha recepito la classificazione sismica del territorio comunale stabilita con *l'ordinanza n. 3274/2003* e con successiva *D.G.R. 7 maggio 2008 - n. 8/7374* ha preso atto, tra l'altro, di quanto disposto dalla successiva *ordinanza n.3519/2006*, mentre con la *D.G.R. 11 luglio 2014 - n. X/2129* ha aggiornato le zone sismiche della Regione Lombardia come da *L.R. 1/2000, art. 3, c. 108, lett. D*. Sulla base di quest'ultima classificazione il comune di Edolo presenta all'interno del territorio comunale **AgMax = 0,069257**

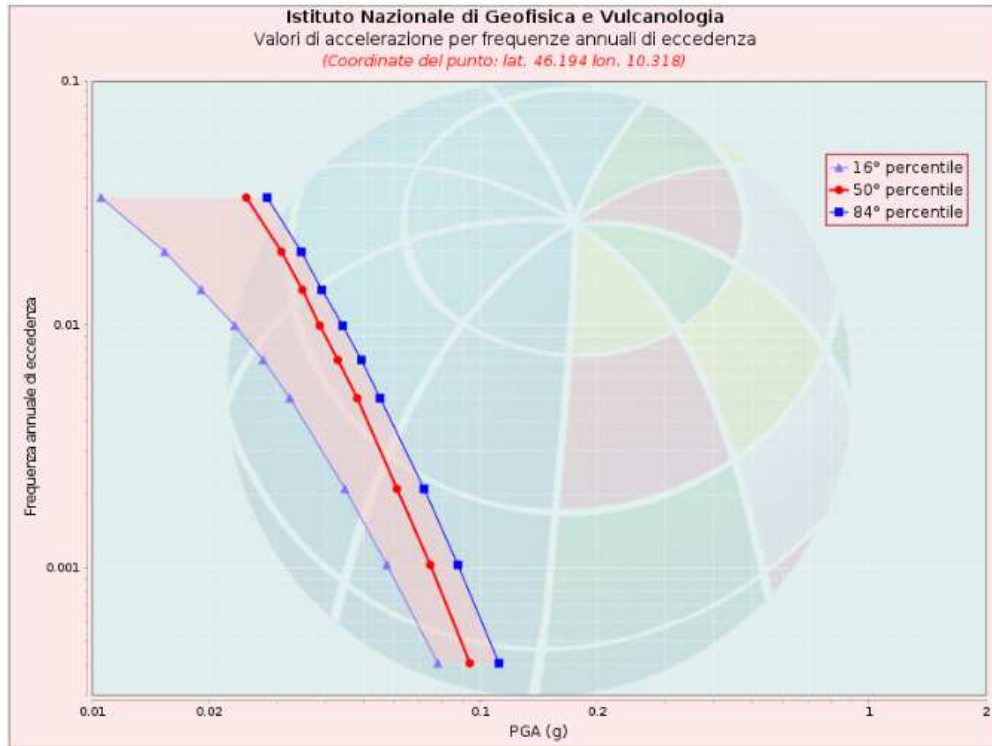
5.4.2 Pericolosità sismica

La mappa di Figura 16 rappresenta il modello di pericolosità sismica e i diversi colori indicano il valore di scuotimento (PGA = Peak Ground Acceleration; accelerazione di picco del suolo, espressa in termini di g, l'accelerazione di gravità) atteso con una probabilità di eccedenza pari al 10% in 50 anni su suolo rigido (classe A, Vs30 > 800 m/s) e pianeggiante.



5.4.2.1 Curva di pericolosità sismica

La pericolosità è l'insieme dei valori di scuotimento (in questo caso per la PGA) per diverse frequenze annuali di eccedenza (valore inverso del periodo di ritorno) (Figura 17). La tabella riporta i valori mostrati nel grafico, relativi al valore mediano (50mo percentile) ed incertezza, espressa attraverso il 16° e l'84° percentile.

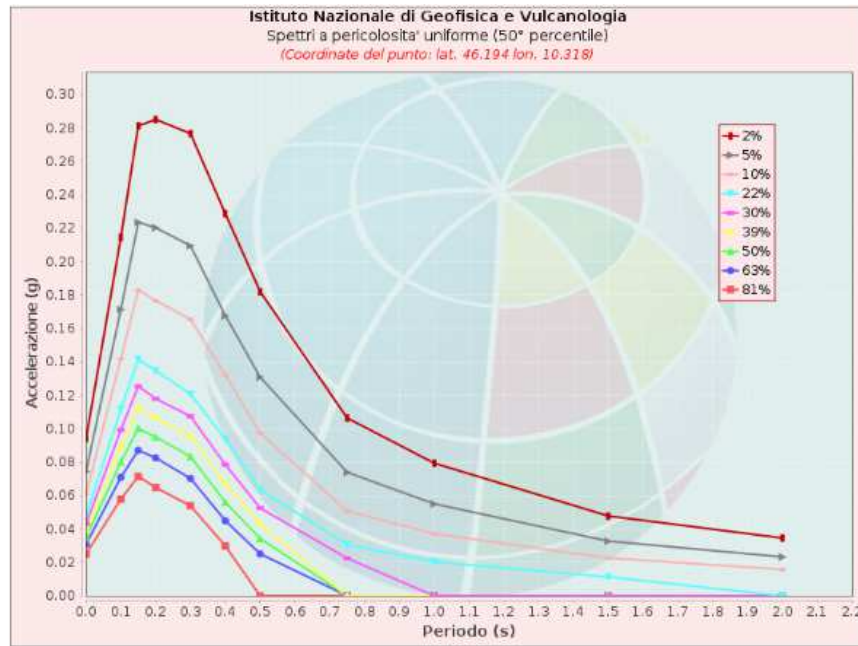


| Valori di accelerazione per frequenze annuali di eccedenza | | | |
|--|----------------|----------------|----------------|
| Frequenza annuale di ecc. | PGA (g) | | |
| | 16° percentile | 50° percentile | 84° percentile |
| 0.0004 | 0.078 | 0.094 | 0.112 |
| 0.0010 | 0.058 | 0.074 | 0.088 |
| 0.0021 | 0.045 | 0.061 | 0.072 |
| 0.0050 | 0.032 | 0.048 | 0.055 |
| 0.0071 | 0.028 | 0.043 | 0.049 |
| 0.0099 | 0.023 | 0.039 | 0.044 |
| 0.0139 | 0.019 | 0.035 | 0.039 |
| 0.0199 | 0.015 | 0.031 | 0.035 |
| 0.0332 | 0.011 | 0.025 | 0.028 |

Figura 17 – Curva di pericolosità sismica e tabella di riferimento

5.4.2.2 Spettri a pericolosità uniforme

Gli spettri di indicano i valori di scuotimento calcolati per 11 periodi spettrali, compresi tra 0 e 2 secondi. La PGA corrisponde al periodo pari a 0 secondi. Il grafico è relativo alle stime mediane (50mo percentile) proposte dal modello di pericolosità. I diversi spettri nel grafico sono relativi a diverse probabilità di eccedenza (PoE) in 50 anni. La tabella riporta i valori mostrati nel grafico.



| Spettri a pericolosità uniforme (50° percentile) | | | | | | | | | | | |
|--|-------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| PoE | Accelerazione (g) | | | | | | | | | | |
| in 50 | Periodo (s) | | | | | | | | | | |
| anni | 0.0 | 0.1 | 0.15 | 0.2 | 0.3 | 0.4 | 0.5 | 0.75 | 1.0 | 1.5 | 2.0 |
| 2% | 0.094 | 0.215 | 0.281 | 0.285 | 0.277 | 0.229 | 0.182 | 0.106 | 0.079 | 0.048 | 0.035 |
| 5% | 0.074 | 0.171 | 0.224 | 0.220 | 0.209 | 0.168 | 0.131 | 0.074 | 0.055 | 0.033 | 0.023 |
| 10% | 0.061 | 0.142 | 0.183 | 0.177 | 0.165 | 0.132 | 0.097 | 0.051 | 0.037 | 0.023 | 0.016 |
| 22% | 0.048 | 0.112 | 0.142 | 0.135 | 0.121 | 0.094 | 0.064 | 0.031 | 0.020 | 0.011 | 0.000 |
| 30% | 0.043 | 0.099 | 0.125 | 0.118 | 0.107 | 0.079 | 0.053 | 0.022 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 39% | 0.039 | 0.089 | 0.113 | 0.107 | 0.096 | 0.067 | 0.043 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 50% | 0.035 | 0.080 | 0.100 | 0.095 | 0.083 | 0.056 | 0.034 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 63% | 0.031 | 0.071 | 0.087 | 0.083 | 0.070 | 0.045 | 0.025 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| 81% | 0.025 | 0.058 | 0.071 | 0.065 | 0.054 | 0.030 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

Figura 18 – Spettri a pericolosità uniforme e relativa tabella di riferimento

5.4.2.3 Disaggregazione della pericolosità sismica

La disaggregazione della pericolosità sismica è una procedura con la quale si determinano i parametri del terremoto che maggiormente influenzano la pericolosità sismica di un sito. In pratica, assunto che l'accelerazione superi un determinato valore di interesse, con la disaggregazione si calcola per ciascuna possibile coppia magnitudo (Mw) e distanza del sito dalla sorgente del terremoto (Km), la probabilità che tale superamento sia causato dalla coppia. Il grafico seguente di rappresenta il contributo percentuale delle possibili coppie di valori di magnitudo-distanza epicentrale alla pericolosità del nodo, rappresentata in questo caso dal

valore della PGA mediana, per una probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni. La tabella riporta i valori mostrati nel grafico ed i valori medi di magnitudo, distanza ed epsilon

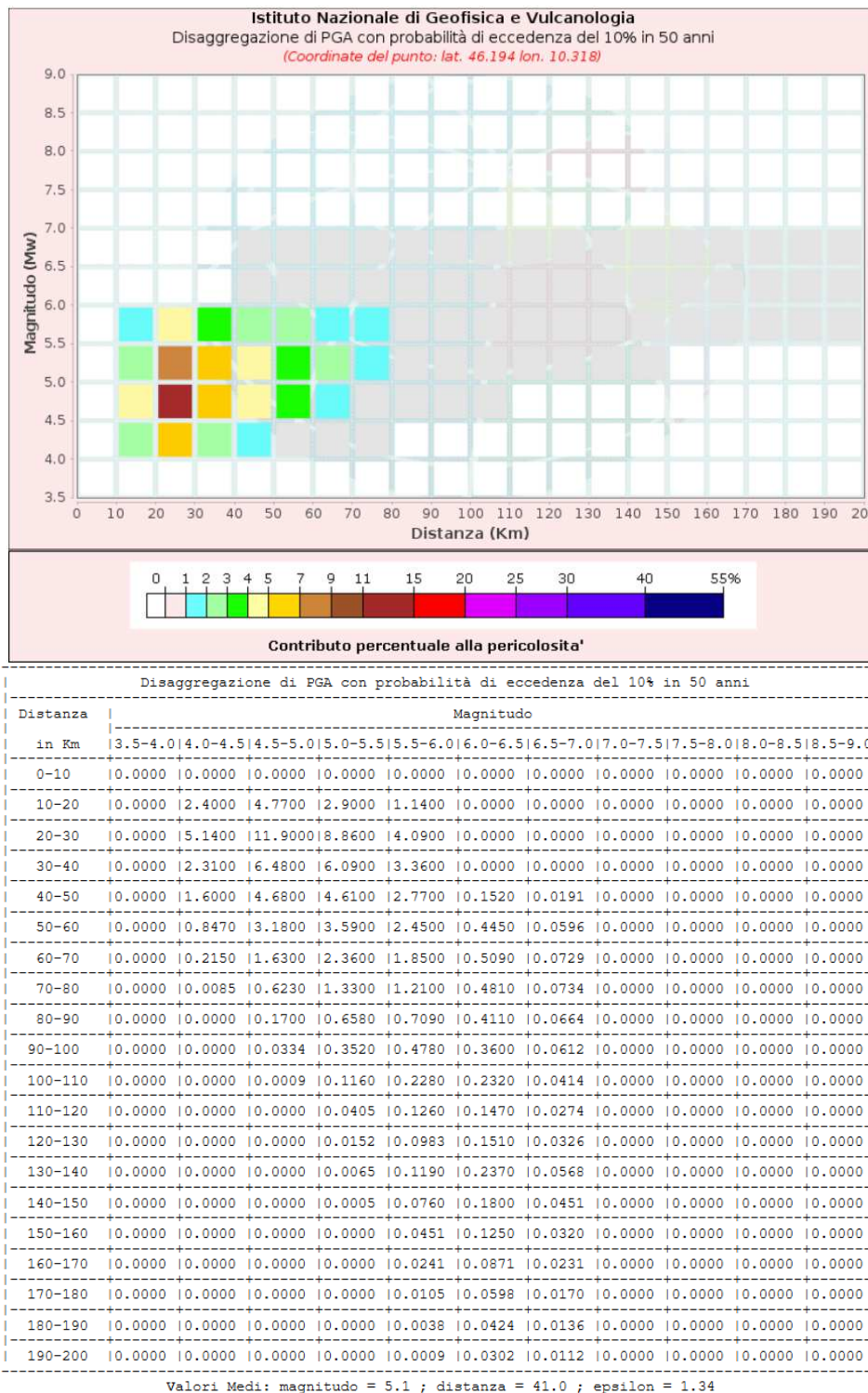


Figura 19 – Disaggregazione di PGA e relativa tabella di riferimento

5.4.3 Definizione della risposta sismica locale

Ai fini della definizione dell'azione sismica di progetto, l'effetto della risposta sismica locale si valuta mediante la classificazione del sottosuolo in funzione dei valori delle velocità di propagazione delle onde di taglio, V_s .

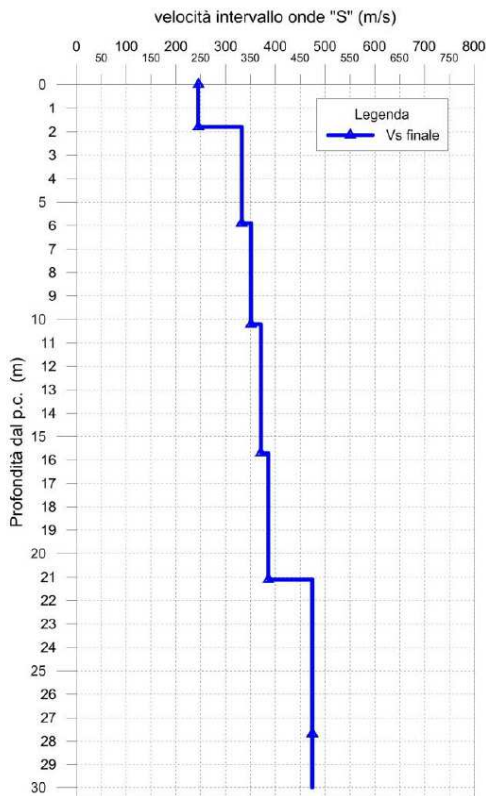
I valori di V_s sono stati ottenuti mediante specifiche prove, in particolare, sono state eseguite tre prospezioni MASW in corrispondenza degli imbocchi, si veda a riferimento per la loro ubicazione la Figura 36.

Nell'area dell'imbocco sud sono state eseguite la MASW01 e MASW02, mentre nell'area dell'imbocco nord la MASW03.

Più nello specifico la MASW01 è stata eseguita in corrispondenza del tratto di galleria artificiale, la MASW02 è sostanzialmente nei pressi dell'imbocco sud della galleria naturale, mentre la MASW03 si trova sulla spalla destra del ponte sul fiume Oglio lato imbocco Nord.

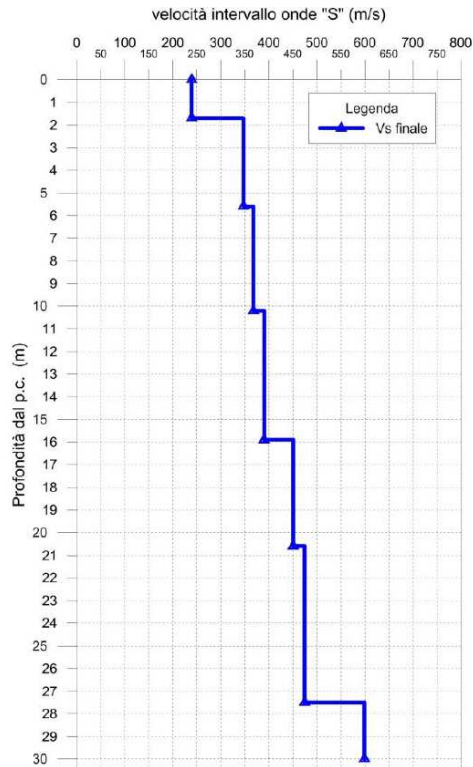
Nella Figura 22 è riportato il risultato della prova eseguita in termini di profilo delle velocità delle onde taglio con la profondità.

Il diagramma è esteso fino ai 30 metri di profondità come richiesto dalle NTC2018.



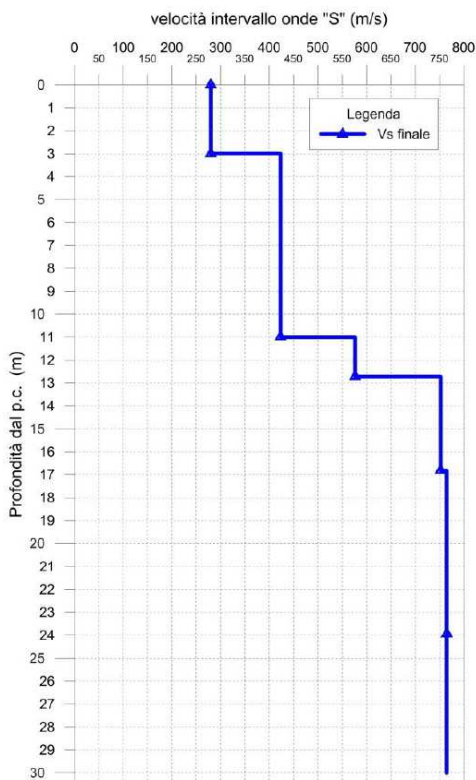
| Numero di Strati | Profondità (m dal p.c) | Vs finale (m/s) | Spessore (m) | h/Vs |
|------------------|------------------------|-----------------|--------------|--------|
| 1 | 1,8 | 245 | 1,8 | 0,0073 |
| 2 | 5,9 | 332 | 4,1 | 0,0123 |
| 3 | 10,2 | 351 | 4,3 | 0,0123 |
| 4 | 15,7 | 371 | 5,5 | 0,0148 |
| 5 | 21,1 | 386 | 5,4 | 0,0140 |
| 6 | 27,7 | 474 | 6,6 | 0,0139 |
| 7 | 30,0 | 620 | 2,3 | 0,0037 |

Figura 20 Prospezioni sismiche MASW01 - Profilo delle velocità delle onde di taglio con la profondità



| Numero di Strati | Profondità (m dal p.c) | Vs finale (m/s) | Spessore (m) | h/Vs |
|------------------|------------------------|-----------------|--------------|--------|
| 1 | 1,7 | 239 | 1,7 | 0,0071 |
| 2 | 5,6 | 347 | 3,9 | 0,0112 |
| 3 | 10,2 | 368 | 4,6 | 0,0125 |
| 4 | 15,9 | 390 | 5,7 | 0,0146 |
| 5 | 20,6 | 451 | 4,7 | 0,0104 |
| 6 | 27,5 | 474 | 6,9 | 0,0146 |
| 7 | 30,0 | 599 | 2,5 | 0,0042 |

Figura 21 Prosperezioni sismiche MASW02 - Profilo delle velocità delle onde di taglio con la profondità



| Numero di Strati | Profondità (m dal p.c) | Vs finale (m/s) | Spessore (m) | h/Vs |
|------------------|------------------------|-----------------|--------------|--------|
| 1 | 3,0 | 280 | 3,0 | 0,0107 |
| 2 | 11,0 | 423 | 8,0 | 0,0189 |
| 3 | 12,7 | 577 | 1,7 | 0,0030 |
| 4 | 16,8 | 752 | 4,1 | 0,0055 |
| 5 | 23,9 | 765 | 7,1 | 0,0093 |
| 6 | 34,2 | 837 | 10,3 | 0,0123 |

Figura 22 Prosperezioni sismiche MASW03 - Profilo delle velocità delle onde di taglio con la profondità

La classificazione del sottosuolo si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori della velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio, $V_{s,eq}$ in metri al secondo, definita come:

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}}$$

essendo:

- h_i = spessore dello strato i -esimo,
- $V_{s,i}$ = velocità delle onde di taglio nell' i -esimo strato;
- N = numero di strati;
- H = profondità del substrato, in questo caso si è posto $H=30$ metri

Le categorie di sottosuolo di fondazione sono definite nella tabella 3.2.II delle NTC2018 e vengono di seguito riportate:

| Categoria | Caratteristiche della superficie topografica |
|-----------|--|
| A | <i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m. |
| B | <i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> , caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s. |
| C | <i>Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s. |
| D | <i>Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s. |
| E | <i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D</i> , con profondità del substrato non superiore a 30 m. |

Nel caso in esame si ottengono i seguenti valori di $V_{s,eq}$:

- MASW01:

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}} = \frac{30}{0,0073 + 0,0123 + 0,0123 + 0,0148 + 0,014 + 0,0139 + 0,0037} = 383 \frac{m}{s}$$

- MASW02:

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}} = \frac{30}{0,0071 + 0,0112 + 0,0125 + 0,0146 + 0,0104 + 0,0146 + 0,0042} = 402 \frac{m}{s}$$

- MASW03:

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}} \frac{30}{0,0107 + 0,0189 + 0,0030 + 0,0055 + 0,0093 + 0,0123} = 502 \frac{m}{s}$$

Risulta, pertanto, per tutte le prove MASW eseguite, e quindi, per tutti i tratti del tracciato che non interessano direttamente l'ammasso roccioso (galleria naturale), che il terreno di fondazione risulta di **Categoria B**.

6. ASSETTO GEOLOGICO REGIONALE

6.1 Inquadramento geologico

Tutte le formazioni affioranti nell'area appartengono alla successione stratigrafica del dominio paleogeografico-strutturale del Sudalpino. Tale successione (Figura 23) è intensamente tettonizzata e sovrascorsa con senso di trasporto da nord verso sud; in generale, i terreni più antichi affiorano verso settentrione, mentre quelli più recenti costituiscono i rilievi più meridionali.

L'evoluzione geologico-strutturale e paleogeografica della regione, dopo il metamorfismo pre-westfaliano del Basamento Cristallino connesso all'orogenesi varisica, vede l'instaurarsi durante il Permiano di condizioni transtensionali, con formazione di bacini di trascorrenza e deposizione, a nord-ovest dell'area, di una successione clastica continentale alluvio-lacustre (Formazione di Collio e conglomerato del Dosso dei Galli), accompagnata da frequenti episodi vulcanici. Alla fine del periodo la catena ercinica in sollevamento ed erosione, in un generale regime geodinamico estensionale, diede luogo a depositi fluviali di ambiente subaereo (Verrucano Lombardo). La progressiva peneplanazione della morfologia creò condizioni adatte per una rapida ingressione marina, durante il Triassico inferiore, da quadranti genericamente orientali. Dopo la trasgressione scitica, segnalata da depositi costieri che comprendono sedimenti terrigeni di spiaggia e di piattaforma, si assiste, presumibilmente durante l'Anisico inferiore, ad una tendenza regressiva, con presenza di evaporiti che indicano un ambiente di deposizione di tipo sabkha, caratterizzato da condizioni climatiche aride, circolazione ristretta e conseguente elevata evaporazione.

Segue un intervallo di tempo caratterizzato da condizioni di mare relativamente aperto, subtidale (Calcere di Angolo), con locale presenza di piattaforme carbonatiche (calcere di Monte Guglielmo), che mostrano evidenze di annegamento ad opera di apporti terrigeni nell'Anisico superiore (calcere di Prezzo). La sedimentazione prosegue ancora in un ambiente di mare aperto (Formazione di Buchenstein), con locali e significativi apporti vulcanoclastici e con lo sviluppo durante il Ladinico superiore di estese piattaforme carbonatiche (calcere di Esino), localmente solcate da bacini terrigeni interni (Formazione di Wengen). Tra il Ladinico e il Carnico, probabilmente in un regime geodinamico di retroarco, con fenomeni di trascorrenza, si registra inoltre una significativa attività vulcanica di natura da acida a basica, il cui significato è ancora completamente da definire.

Durante il Carnico, la sedimentazione indica la presenza di condizioni di piana tidale (formazione di Gorno), alla fronte del sistema deltizio in progradazione dell'arenaria di Val Sabbia, seguita verso l'alto da sedimenti peritidali, localmente con facies evaporitiche, depositi in una piana costiera a clima arido (formazione di San Giovanni Bianco). Gli ultimi episodi magmatici triassici della regione e la progressiva ingressione marina dovuta a cause tettoniche segnano nel Carnico superiore l'inizio del rifting tardotriassico, che porterà alla formazione dell'oceano giurassico della Tetide, posto tra la placca euro-asiatica e quella dell'Adria.

Lo sviluppo dell'estesa piattaforma carbonatica della Dolomia Principale, localmente intervallata da bacini intrapiattaforma ("dolomie zonate" ed altre facies eteropiche alla Dolomia Principale) avviene durante il Norico. Il rifting si manifesta attraverso un complesso sistema di faglie normali a direzione nord-sud e di trasferimento con direzione est-ovest, che producono una serie di bacini e di alti strutturali. Verso la fine del Norico e nel Retico si ha la deposizione delle Argilliti di Riva di Solto (che indicherebbero un episodio trasgressivo) e del Calcere di Zu. Ad essi seguono nel Giurassico depositi di piattaforma carbonatica (formazione dell'Albenza, corrispondente alla Dolomia a Conchodon Auct., Corna e Calcere di Sedrina) il

cui smembramento e annegamento porta allo sviluppo, a partire dall'Hettangiano, del Bacino Triumplino-Sebino, parte orientale

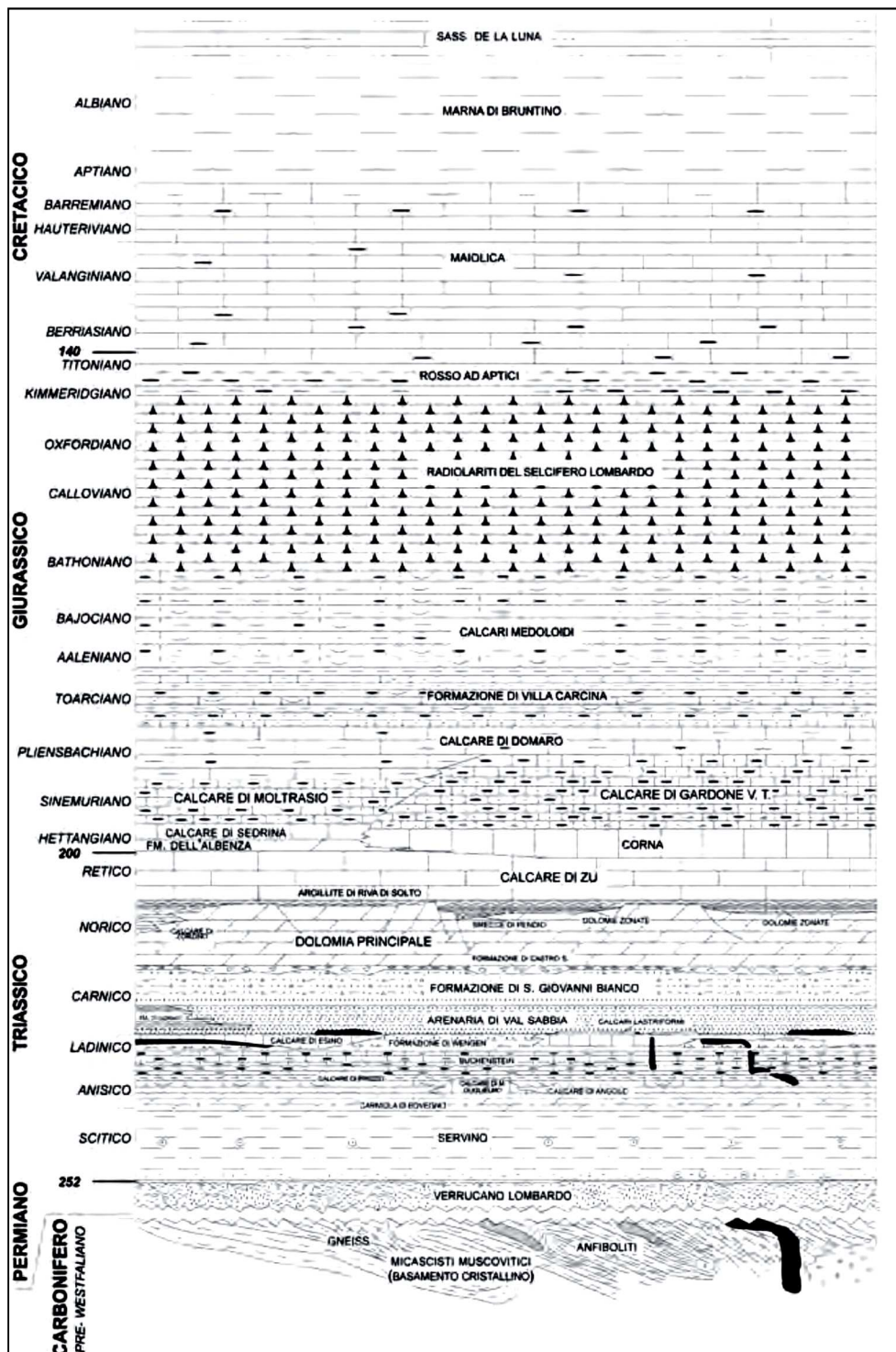


Figura 23 - Schema stratigrafico della successione sedimentaria di substrato affiorante nell'area del più esteso Bacino Lombardo, con diffusi e potenti depositi pelagici ed emipelagici a facies di "Medolo" (calcare di Gardone Val Trompia, calcare di Moltrasio e Calcare di Domaro) e del gruppo di Concesio.

La relativa uniformità delle Radiolariti del Selcifero Lombardo nella regione attesta che tali depositi drappeggiarono i fondali dell'intero Bacino Lombardo durante un periodo di relativa calma tettonica, seguita alla conclusione della fase di rifting. Condizioni bacinali proseguono nel Giurassico superiore e nel Cretacico inferiore, durante la deposizione del Rosso ad Aptici e della Maiolica.

Le formazioni pre-quadernarie più recenti, affioranti più a sud e a ovest dell'area di studio, sono la marna di Bruntino, il Sass de la Luna e la Scaglia Rossa (gruppo della Scaglia Lombarda). Queste ultime unità, soprattutto quella del Sass de la Luna, sono interpretate come costituite in prevalenza da torbiditi pelagiche, e segnano probabilmente l'inizio dell'inversione del movimento delle placche e della subduzione dell'oceano tetideo.

La successiva evoluzione compressiva e collisionale terziaria della regione non è resa localmente evidente dai sedimenti di quest'età, che si sviluppano invece più ad ovest e a sud, anche nel sottosuolo. Tuttavia, l'orogenesi alpina, anche se sensibilmente condizionata dalla precedente strutturazione permiana e mesozoica, è la principale responsabile dell'attuale assetto tettonico dell'area e, almeno in parte, anche della sua configurazione fisiografica.

6.2 Inquadramento tettonico

L'area di studio è parte integrante delle Alpi Meridionali che costituiscono il settore della catena alpina compreso tra la Linea Insubrica a nord e la Pianura Padana a sud. L'attuale assetto tettonico dell'area (Figura 24) deriva essenzialmente dagli imponenti fenomeni compressivi manifestatisi in concomitanza dell'orogenesi alpina, a partire dal Cretacico superiore (fase eoalpina) e perdurati nel Neogene.

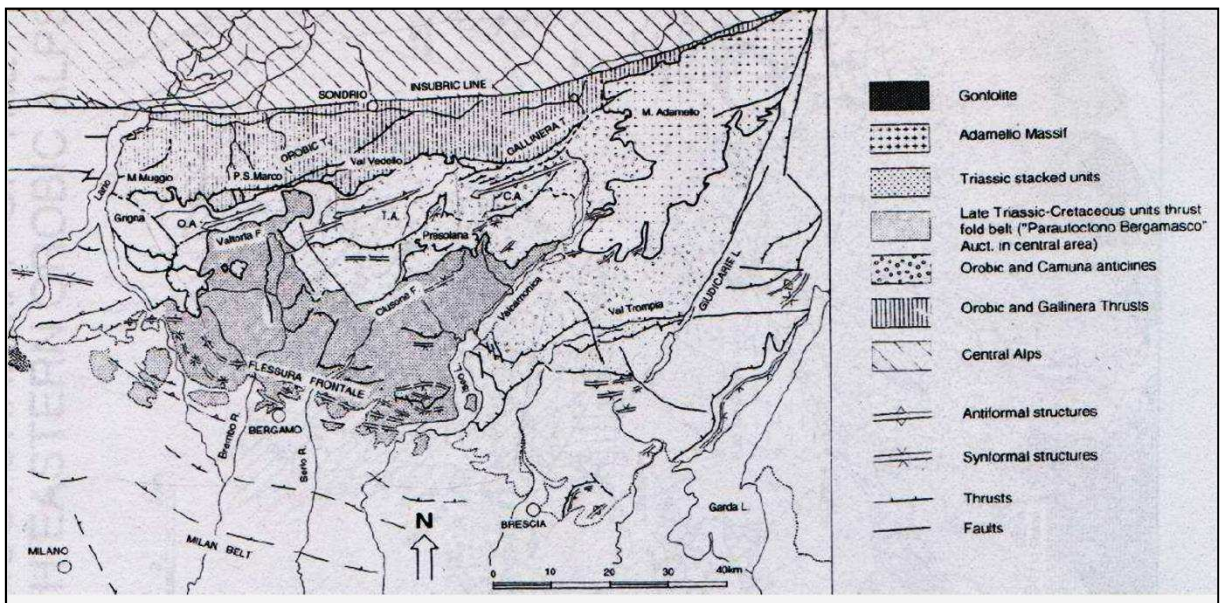


Figura 24 - Schema tettonico delle Sudalpine lombardo (BERSEZIO et al., 1993)

Tuttavia, l'evoluzione tettonica alpina è stata consistentemente guidata e controllata da un gran numero di linee tettoniche e di strutture ancestrali che si sono generate nel corso di precedenti fasi di deformazione, già a partire dal Permiano. L'azione di regimi geodinamici trascorrenti (e/o transtensivi), estensionali e compressivi, che si sono succeduti nella regione in esame dopo l'orogenesi ercinica (Carbonifero inferiore) fino alle ultime fasi della strutturazione della catena

alpina, hanno infatti provocato diffusi fenomeni di riattivazione tettonica e di inversione. Per meglio comprendere l'assetto strutturale attuale, è pertanto opportuno ripercorrere, anche se in estrema sintesi, i principali eventi tettonici che hanno interessato questa zona dal Permiano.

Nel corso del Permiano il settore centrale del Sudalpino fu interessato da una cospicua attività vulcanica e dall'apertura di alcuni bacini sedimentari continentali di natura silicoclastica, quali i bacini di Collio, Tione e Tregiovo e quello Orobico, affioranti a nord-ovest dell'area. Questi fenomeni sono da ricondurre ad un'attività trascorrente e transtensiva connessa alla segmentazione post-collisionale della catena ercinica, che è attiva in tutta l'Europa e che, localmente, si manifesta con movimenti trascorrenti destri lungo la Linea delle Giudicarie, presente a nord-ovest dell'area in esame. In tale quadro strutturale i bacini permiani sopra citati possono essere interpretati come bacini trascorrenti (strike-slip e pull-apart basins), localmente marginati da faglie estensionali (CASSINIS & PEROTTI, 1994).

Una delle più importanti è la Linea della Val Trompia, a direzione ENE-WSW ed immergente verso settentrione, che nel Permiano rappresentava il margine meridionale del Bacino di Collio. Attualmente, la linea, a seguito dei fenomeni di inversione tettonica realizzatisi durante la compressione alpina, costituisce un esteso sovrascorrimento che porta in affioramento il Basamento Cristallino metamorfico. La sua natura ancestrale di faglia estensionale è testimoniata dal fatto che a nord della linea si sviluppa, al di sopra del Basamento Cristallino, la successione permiana vulcanoclastica del Bacino di Collio, mentre a sud di essa il basamento è ricoperto in contatto stratigrafico direttamente dal Verrucano Lombardo.

6.2.1 Triassico superiore-cretacico inferiore

Durante il Permiano superiore i movimenti trascorrenti si attenuarono fino a scomparire e l'intera regione fu soggetta ad una consistente riorganizzazione strutturale, con estesi fenomeni di sollevamento e di erosione in un regime tettonico prevalentemente estensionale che portarono alla deposizione del Verrucano Lombardo. Questi depositi segnano l'inizio di un nuovo ciclo tettono-sedimentario e l'avvio del cosiddetto ciclo alpino (ITALIAN I.G.C.P. 203 GROUP, 1986).

Nel Triassico inferiore e medio perdurò nella regione un regime tettonico essenzialmente estensionale, intervallato da episodi trascorrenti, che produssero frammentazione crostale, e fu accompagnato da una significativa attività vulcanica ladino-carnica. La natura bimodale e la prevalente affinità calcocalina di questo magmatismo è probabilmente giustificata da un parziale melting del mantello superiore che era stato profondamente modificato durante l'Orogenesi varisica e contaminato da materiale proveniente dalla crosta (v. ad es. CRISCI et alii, 1984). Tuttavia, non del tutto chiaro appare il significato geodinamico di questo vulcanismo e ulteriori indagini sono ancora in corso.

6.2.2 Triassico superiore-cretacico inferiore

Nel Carnico superiore ha inizio il rifting intracontinentale che condurrà, verso la fine del Giurassico, alla formazione dell'oceano della Tetide sviluppatosi tra la placca euro-asiatica e quella dell'Adria. Il rifting si manifesta attraverso un complesso sistema di faglie normali e di trasferimento che producono una serie di bacini e di alti strutturali (Figura 25).

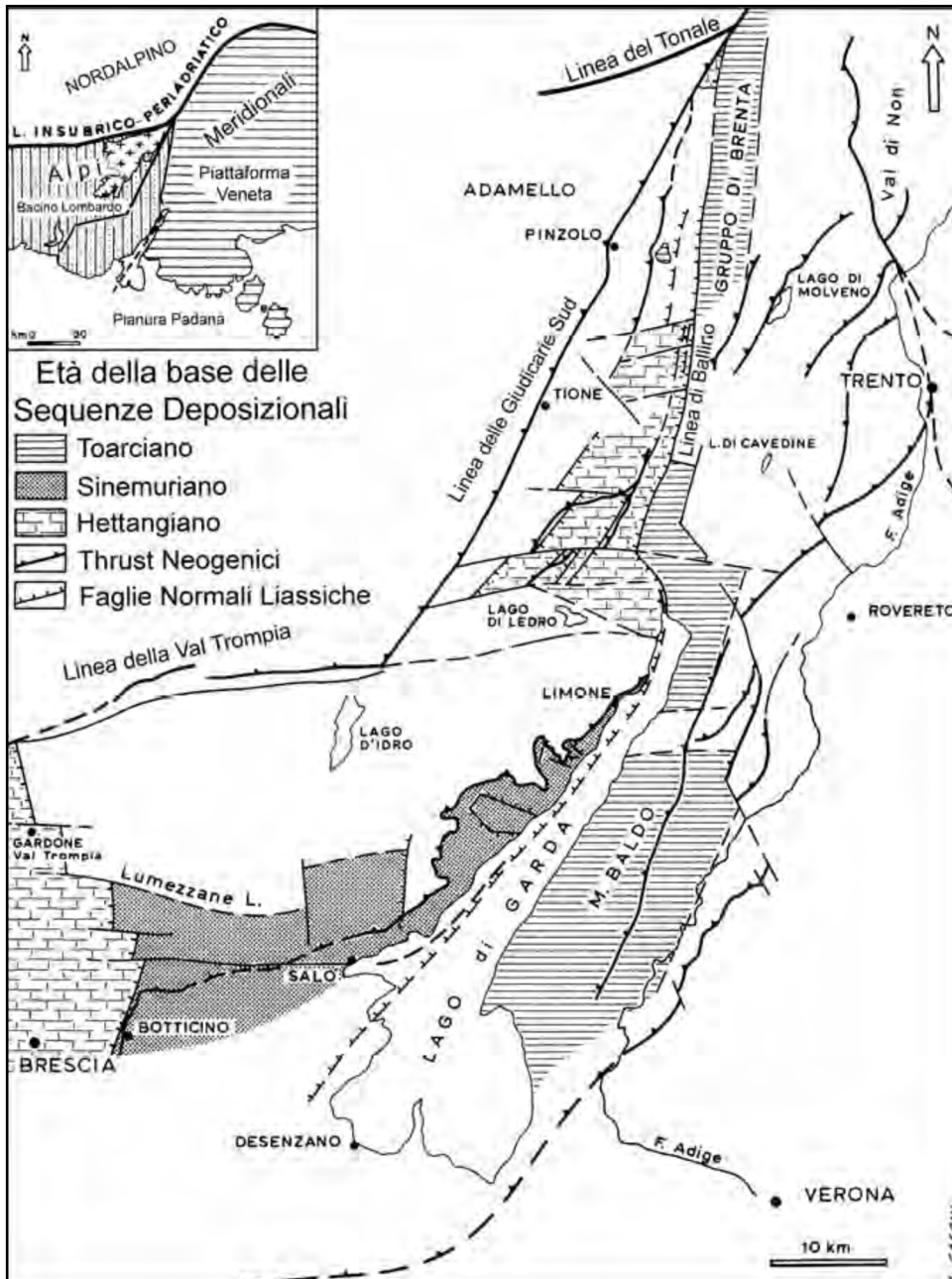


Figura 25 - Schema del rifting norico-liassico e sua inversione strutturale neogenica (da CASTELLARIN & PICOTTI, 1990).

Le direzioni delle strutture, rispetto alle coordinate attuali, sono essenzialmente nord-sud, per quanto riguarda le faglie normali, ed est-ovest, per quanto attiene le faglie di trasferimento; i rigetti in alcuni casi raggiungono anche alcune migliaia di metri. Subito a ovest dell'area in esame si sviluppa il Bacino Triumplino-Sebino, che appartiene al più vasto Bacino Lombardo. Alcune delle faglie che costituivano il margine orientale di questo articolato bacino sono ancora oggi visibili, nonostante abbiano subito consistenti fenomeni di riattivazione e di parziale inversione durante l'orogenesi alpina (CASSINIS & VERCESI, 1983): la linea di Inzino, la linea Gardone-M. Conche e la linea di Lumezzane sono gli esempi più evidenti. In particolare, i tratti a direzione nord-sud di queste linee, che rappresentano faglie normali mesozoiche immergenti verso occidente, sono stati riattivati come faglie trascorrenti o rampe laterali,

mentre quelli a direzione est-ovest come la linea di Lumezzane (CASSINIS et alii, 1994), faglia di trasferimento con componente di movimento sinistra sicuramente già attiva durante il Norico, hanno subito una parziale inversione tettonica come faglie inverse. Le morfostrutture del rifting mesozoico hanno quindi controllato lo sviluppo e l'evoluzione della successiva compressione alpina, condizionando l'ubicazione delle strutture di raccorciamento e di svincolo trasversale e inducendo una complessa architettura dei sovrascorrimenti e delle diverse unità tettoniche.

6.2.3 *Cretacico superiore-neogene*

A partire dal Cretacico superiore fino al Miocene ed oltre, un regime geodinamico compressivo, connesso alla collisione fra la placca europea e quella Adria, dominò in tutta la regione. Le prime fasi compressive iniziarono verso la fine del Cenomaniano (BERSEZIO & FORNACIARI, 1988), in concomitanza con la sedimentazione dei primi depositi flyschoidi. Immediatamente prima di questo periodo, durante i movimenti di convergenza fra le placche, avvenne la gran parte della rotazione antioraria della placca Adria di 50°-60° indicata dai dati paleomagnetici relativi ai depositi permiani (v. ad es. HELLER et alii, 1989 e DEWEY et alii, 1989): infatti mentre il rifting mesozoico ha uno sviluppo essenzialmente a direzione meridiana, i bacini dei flysch del Cretacico superiore si estendono essenzialmente con direzione est-ovest. Durante tutta l'orogenesi alpina, dal Cretacico superiore fino al Neogene, l'asse di massima compressione regionale ha una direzione circa N-S: quindi le linee tettoniche e le strutture a direzione est-ovest corrispondono a faglie inverse, sovrascorrimenti e pieghe ad essi associate, mentre le strutture a direzione N-S hanno un significato trascorrente (o transpressivo) o rappresentano rampe laterali di sovrascorrimenti principali. Localmente, comunque, possono essere distinte due direzioni di compressione, una con asse di massima compressione a direzione NNW e l'altra con direzione NNE.

La scansione temporale della tettonica compressiva connessa all'orogenesi alpina è nelle Prealpi bresciane essenzialmente definita dai rapporti geometrici che intercorrono tra il plutone dell'Adamello (42-30 Ma) (DEL MORO et alii, 1986) e i numerosi sovrascorrimenti vergenti verso S e SSE (BRACK, 1981; CASSINIS & CASTELLARIN, 1988) affioranti più a nord, come le anticlinali di Trabuchello, Cabianca, Cedegolo e Orobica e i connessi sovrascorrimenti di Porcile e Gallinera (SCHÖNBORN, 1992). Tutte queste strutture sono tagliate e suturate dall'intrusione dell'Adamello e sono probabilmente da considerare del Cretacico superiore (fase eoalpina).

Durante l'intrusione dell'Adamello non sono state rinvenute nell'area tracce di compressione e con tutta probabilità l'attività ignea periadriatica è avvenuta in condizioni di estensione crostale che interessarono per un breve periodo di tempo il settore interno della catena alpina (DAL PIAZ & VENTURELLI, 1985) e i settori circostanti (LAUBSCHER, 1985).

È quindi da ritenere che la principale fase di compressione che ha strutturato la regione in esame e provocato i principali sovrascorrimenti sia post-Adamello e quindi post-Oligocene medio (fase neoalpina), probabilmente miocenica. Le caratteristiche tettoniche e i rapporti stratigrafico-strutturali con il substrato di alcuni limitati affioramenti di terreni pliocenici e oligocenici presenti lungo la sponda occidentale del Lago di Garda confermano nel complesso questa indicazione (CASSINIS & PEROTTI, 1996). Anche le linee sismiche e i pozzi esplorativi eseguiti dall'Agip nel settore della Pianura Padana immediatamente antistante al margine affiorante delle Prealpi bresciane e bergamasche evidenziano un chiaro e rilevante coinvolgimento dei depositi pre-Messiniani nei sovrascorrimenti alpini (v. ad es. PIERI & GROPPPI, 1981; CASSANO et alii, 1986).

In generale, comunque, come già sottolineato, l'architettura tettonica complessiva assunta da questo settore della catena sudalpina, a seguito dell'ultima orogenesi, e i rapporti fra le diverse

unità strutturali, risentono sensibilmente dell'evoluzione geodinamica pre-terziaria e segnatamente dell'eredità morfo-strutturale permiana e mesozoica.

6.2.4 L'assetto strutturale attuale

L'assetto strutturale dell'area è contraddistinto dalla presenza di differenti unità tettoniche sovrapposte l'una sull'altra, con vergenza verso i quadranti meridionali, attraverso estese superfici di sovrascorrimento e faglie inverse (Figura 26). La vergenza ed il senso di trasporto verso sud evidenziato dalle strutture è confermato dalla generale immersione verso settentrione dei sovrascorrimenti principali e dal fatto che le unità strutturali geometricamente più elevate e originariamente più profonde attualmente affiorano verso nord (v. ad es. il Basamento Cristallino metamorfico che affiora nella parte settentrionale a tetto della Linea della Val Trompia). Oltre a numerosi sovrascorrimenti e faglie sono presenti, soprattutto verso i quadranti meridionali dell'area, pieghe anticlinali e sinclinali di ampiezza regionale (anche qualche chilometro) che interessano soprattutto la successione giurassico-cretacea. Queste strutture, anche se non direttamente associabili a superfici di faglia affioranti, sembrano comunque connesse geneticamente alla tettonica di accavallamento, e in particolare alla traslazione della successione su superfici di sovrascorrimento profonde non planari.

La successione stratigrafica del Sudalpino in generale e in particolare di questa regione presenta caratteristiche reologiche e un comportamento meccanico alla deformazione non omogeneo. Infatti, accanto a formazioni fortemente competenti e ad elevata resistenza come la Dolomia Principale e le altre unità di calcari di piattaforma, che hanno un comportamento essenzialmente rigido, sono presenti altre formazioni meno competenti e resistenti, caratterizzate da un comportamento decisamente più plastico. Queste ultime formazioni costituiscono orizzonti di scivolamento regionali, parallelamente ai quali si impostano in genere le superfici di flat dei sovrascorrimenti, mentre le formazioni più competenti sono tagliate da rampe. In particolare, i principali orizzonti di scollamento di significato regionale sono costituiti dalla formazione della carniola di Bovegno (Anisico), dalle unità carniche (in particolare, formazione di San Giovanni Bianco e arenaria di Val Sabbia), dalle Argilliti di Riva di Solto (Retico), da parte del Medolo giurassico e dalle Marne di Bruntino.

Numerosi autori hanno tentato di ricostruire l'evoluzione cinematica ed il raccorciamento della catena sudalpina lombarda arrivando a conclusioni in alcuni casi anche contrastanti sia per quanto riguarda il significato da attribuire alle diverse strutture, che per quanto riguarda l'entità del raccorciamento (ROEDER, 1989, 1992; LAUBSCHER, 1990; SCHÖNBORN, 1992; PICOTTI et alii, 1995).

in questo settore tra 42 e 32 Ma).

Il basamento Sudalpino, affiorante nell'area in esame, è costituito prevalentemente da rocce silicoclastiche pelitico-psammitiche di supposta età paleozoica (GANSSE & PANTIC, 1988), che hanno subito un metamorfismo di età varisica (MOTTANA *et al.*, 1985). Intercalati alle metapeliti e metapsammiti si trovano inoltre numerosi corpi di ortogneiss granitoidi di varia estensione, messi in posto al termine del ciclo orogenetico caledoniano (Ordoviciano) e successivamente metamorfosati e deformati dagli eventi ercinici e alpini. Esso rappresenta una porzione del margine settentrionale di Adria, una microplacca che costituisce un promontorio della Placca Africana, che è stato, almeno per quello che risulta dai dati oggi a disposizione, solo parzialmente interessato da metamorfismo durante la convergenza alpina. Pertanto, pur rappresentando il risultato dell'evoluzione tettonica Alpina, preserva molto chiaramente l'evoluzione Varisica e la successiva fase di estensione permiana fino alla successiva deformazione tardo-cretacica.

Le classiche interpretazioni relative al basamento cristallino del dominio Sudalpino individuavano una zonazione metamorfica, riferibile all'orogenesi varisica, con un incremento del grado metamorfico da est verso ovest: dalle sequenze poco o per nulla metamorfosate delle Alpi Carniche fino a complessi di alto grado dell'area di Ivrea. In questo modello il Sudalpino centrale rappresenta l'area di transizione da unità di basso grado ad unità di medio grado.

L'idea di una tale distribuzione regolare a larga scala del grado metamorfico nel basamento delle Alpi Meridionali è stata sostanzialmente smentita grazie ad una serie di lavori recenti. Comparando, a diverse scale, le strutture del basamento e della copertura, è stata ricostruita e distinta la storia tettonica alpina (pre- e post- intrusione dell'Adamello), da quella pre-Alpina (orogenesi Varisica e fasi prevalentemente estensionali permo-mesozoiche).

L'evoluzione tettonometamorfica alpina è caratterizzata, in tutto il basamento, dalla presenza di due o tre distinte fasi deformative sinmetamorfiche, che mostrano, con debite differenze, un percorso P-T-t retrogrado (MILANO *ET AL.*, 1988; DIELLA *et al.*, 1992; ALBINI *et al.*, 1994; MARONI *et al.*, 1995; CADEL *et al.*, 1996; SPALLA *et al.*, 1999). Indicazioni sulla dimensione delle unità tettoniche meccanicamente indipendenti durante l'orogenesi Varisica e nel Permiano sono state ottenute dall'analisi della storia deformativa e dei dati microstrutturali, che hanno consentito di individuare quattro tipi di percorsi P-T durante i due periodi (SPALLA & GOSSO, 1999) (Figura 28).

Il primo tipo comprende due elementi (VVB = Basamento Val Vedello e MMZ = Zona Monte Muggio) caratterizzati da due percorsi P-T retrogradi equivalenti, a partire da un picco termico in facies anfiboliti di pressione intermedia, ben rappresentato solo in una zona, mentre nell'altra predomina il successivo carattere retrogrado in facies scisti verdi.

Il secondo tipo comprende altri due elementi (NEOB-A = Basamento Nord-Est Orobico - tipo A e DCZ = Zona Domaso-Cortafò), entrambi con tre stadi di equilibratura metamorfica, di cui uno progrado a temperatura relativamente bassa e pressioni mediamente elevate.

- Assemblages successions related to deformation stages in each lithostratigraphic unit (columns). In rows the different tectono-metamorphic units are grouped into metamorphic evolution types (I to IV). Thermobarometric estimates and ages are related to successive deformation stages for each tectonometamorphic unit

| tectono-metamorphic units | lithostratigraphic units | "Edolo Schists" | "Morbegno (or Stabiello) Gneisses" | P-T estimates | Ages |
|---------------------------|---|--|--|--|---------------------------------|
| Type I | VVB (Cadel <i>et al.</i> , 1996; Diella <i>et al.</i> , 1992) | syn-D1 = Ms, Bt, Grt, Pl, Qtz, ±St syn-D2 = Ms, BtII, Chl, Ab, Qtz, ±Ep | syn-D1 = Ms, Bt, Grt, Pl, Qtz, ±St, ±Ky syn-D2 = MsII, BtII, Chl, Ab, Qtz, ±Ep | T = 570-610°C P = 7-9 kbar T < 500°C P < 4 kbar | ≥ 330 Ma ≥ 280 Ma |
| | MMZ (Gosso <i>et al.</i> , 1997; Spalla <i>et al.</i> , 1998) | | syn-D1 = Ms, Bt, Grt, Pl, Qtz, ±St, ±Ky syn-D2 = MsII, Chl, Ab, Qtz, ±Mrg, ±Ep | T = 560-600°C P = 8-11.1 kbar T < 500°C P < 4 kbar | ≥ 330 Ma ≥ 260 Ma |
| Type II | NEOB-A (Spalla <i>et al.</i> , 1999) | syn-D1a = Cld, BtI, MsI, GrtI, Pl, Qtz syn-D1b = St, BtII, MsII, GrtII, Pl, Qtz syn-D2 = MsIII, Chl, Ab, Qtz, ±Ep, ±BtIII, ±GrtIII | | T = 480-540°C P = 7.5-9.5 kbar T = 570-660°C P = 8.5-11.5 kbar T < 400-550°C P < 3-4 kbar | - ≥ 330 Ma ≥ 295 Ma |
| | DCZ (di Paola, 1997; di Paola <i>et al.</i> , in prog.) | | pre-D2 = Cld, BtI, MsI, GrtI, Pl, Qtz syn-D2 = BtII, MsII, GrtII, Pl, Qtz, ±St, ±Ky syn-D3 = MsIII, Chl, Ab, Qtz, ±Ep, ±BtIII, ±GrtIII | - - - | - - - |
| Type III | NEOB-B (Gansser and Pantic, 1988) | Chl, Bt, ±Grt schists | | - | - |
| | NEOB-C (Ceriani, 1994) | pre-D2 = Qtz, MsI, ChlI, BtI syn-D2 = Qtz, Ms, Grt, ChIII, Ab, ±Bt syn-D3 = Qtz, Ms, ChIII, Ab | | - - - | - - - |
| | DOZ (Diella <i>et al.</i> , 1992; Spalla <i>et al.</i> , 1998) | | syn-D1 = Ms, Bt, Grt, Pl, Qtz, ±St, ±Ky syn-D2 = BtII, Sil, Pl, Qtz, ±GrtII, ±Kfs syn-D3 = MsII, Chl, Ab, Qtz, ±Ep | T = 550-630°C P = 7-9 kbar T = 650-750°C P = 4-5.5 kbar T < 500°C P < 3 kbar | ≥ 330 Ma ≥ 226 Ma Liassic |

Figura 28: Schema riguardante la composizione delle unità tettono-metamorfiche in relazione a quelle litostratigrafiche, delle età radiometriche e delle stime di pressioni e temperature (SPALLA & GOSSO, 1999).

Il terzo tipo (NEOB-B = Basamento Nord-Est Orobico - tipo B) è caratterizzato da un percorso P-T di tipo progrado, due foliazioni in scisti verdi, con picco in scisti verdi basso e relitti di palinomorfi e microplancton marino di età Siluriano-Ordoviciano. Esso contiene un altro elemento (NEOB-C = Basamento Nord-Est Orobico - tipo C) con due foliazioni in scisti verdi e caratteri strutturali che suggeriscono una doppia impronta metamorfica in scisti verdi, senza evidenze di evoluzione progradata.

Il quarto tipo (DOZ = Zona Dervio-Olgiasca) ha un basso rapporto P/T, interpretabile come l'effetto di un assottigliamento litosferico di età permo-triassica.

In conclusione, i dati stratigrafici e geocronologici integrati con tracciati P-T-d-t (pressione, temperatura, tempo relativo di deformazione) mostrano come siano riconoscibili quattro principali stadi evolutivi:

1. inspessimento crostale varisco (fase D1 di NEOB-A nel tipo II)
2. collisione varisca (D1 in unità tipo II, D2 nel tipo III)
3. esumazione e denudamento della catena varisca (D2 in VVB del tipo I e in NEOB-A del tipo II)
4. assottigliamento crostale collegato al *rifting* permo-triassico, evidenziato da un forte riscaldamento (incremento-T nella fase D2 del tipo IV).

I limiti tra tali unità sono ancora poco conosciuti, in parte a causa della mancanza di una cartografia completa di dettaglio ed in parte a causa delle complicazioni introdotte dalle faglie e dai sovrascorrimenti alpini.

Il basamento affiorante nell'area d'interesse è riferibile alle tipologie NEOB-A (tipo II) e NEOB-B (tipo III) di SPALLA & GOSSO (1999) (Figura 29).

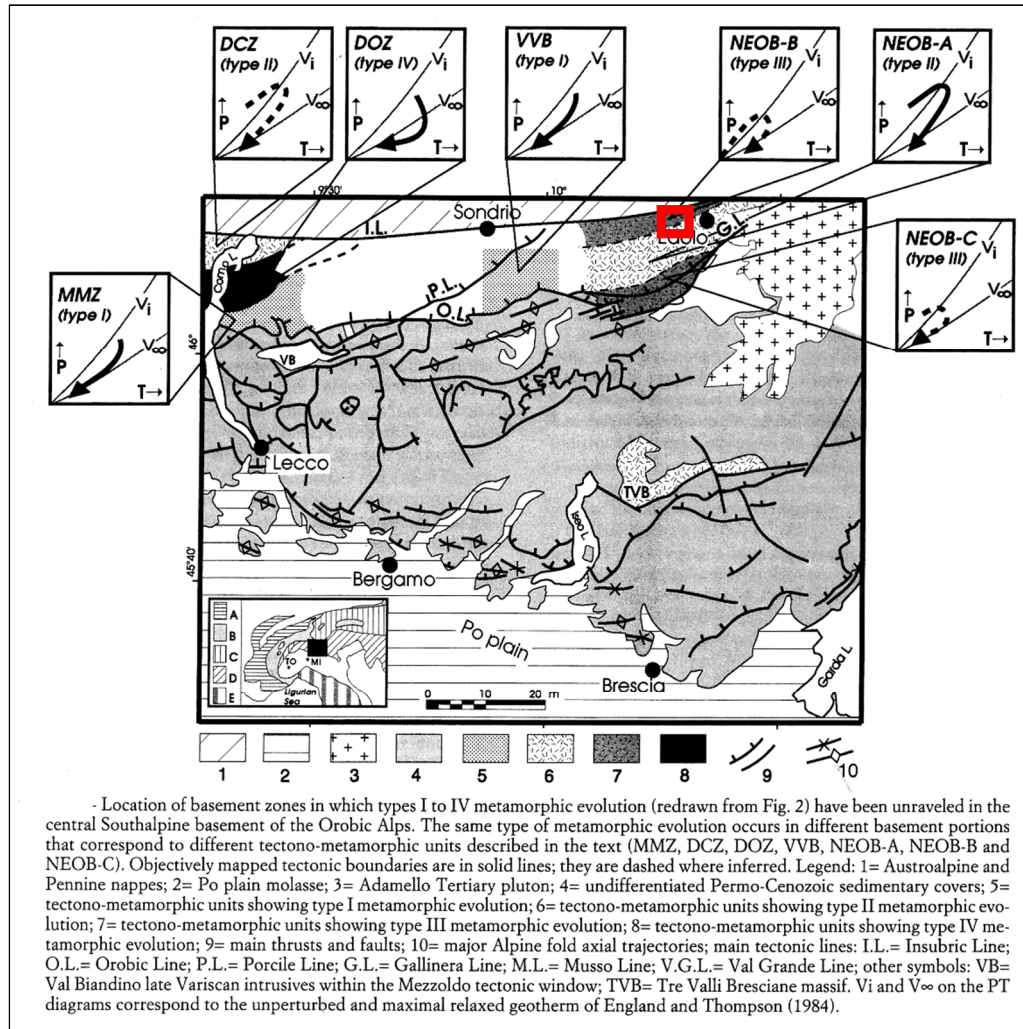


Figura 29: Ubicazione delle unità tettono-metamorfiche identificate nel basamento orobico (da SPALLA & GOSSO, 1999); nel riquadro rosso la zona interessata dall'opera.

Tradizionalmente le metapeliti del basamento delle Alpi Meridionali vengono raggruppate all'interno di una stessa unità litostratigrafica, nota in letteratura come "Scisti di Edolo" (Salomon, 1901). Nell'ambito degli studi e dei rilievi per la redazione del Foglio 57 Malonno della nuova Carta Geologica d'Italia in scala 1:50.000 (GOSSO ET AL., 2012), che lambisce ma non comprende l'area interessata dall'opera in esame, il basamento è stato suddiviso in unità tettonometamorfiche, ovvero in unità che raggruppano rocce che possiedono una corrispondente storia evolutiva, sia strutturale che metamorfica. In particolare, per la zona adiacente a quella in esame sono state distinte due di queste unità: UTM dell'Aprica e UTM del Passo di Cavalcafiche (Figura 30).

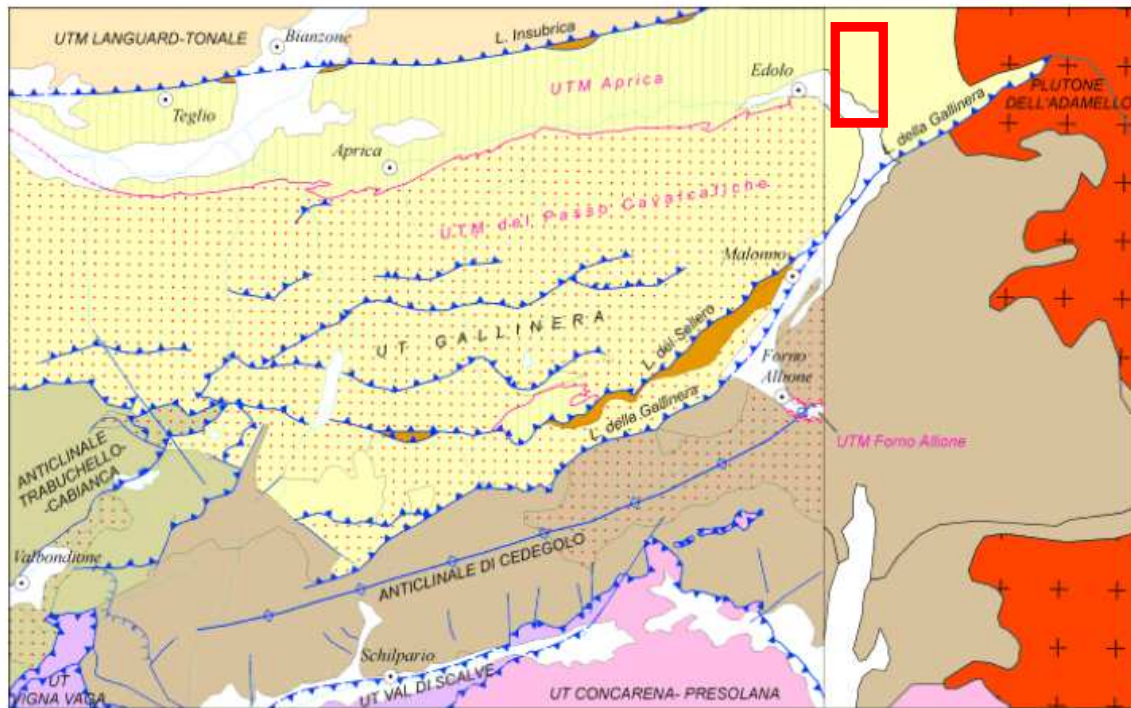


Figura 30: Schema tettonico del Foglio 57 Malonno esteso al Plutone dell'Adamello. Le unità tettoniche alpine sono rappresentate dai diversi colori e contrassegnate dalle scritte maiuscole nere, le unità tettonometamorfiche pre-alpine (distinte solo all'interno del F. Malonno) dai retini e dalle scritte magenta (Gosso et al., 2012).

L'Unità tettonometamorfica dell'Aprica (NEOB-B secondo SPALLA & GOSSO), affiorante tra Linea Insubrica ed Edolo, è costituita da metapeliti e quarziti, con evoluzione metamorfica di età ercinica interamente in facies scisti verdi durante lo sviluppo delle deformazioni D1, D2 e D2b. In questa unità vi sono relitti di palinomorfi e di microplankton marino siluriano-ordoviciani (GANSSER & PANTIC, 1988). In dettaglio le litofacies distinte all'interno di questa unità sono: micascisti a granato-biotite-clorite, quarziti e quarzoscisti, metabasiti e, raramente, scisti carbonatici

L'Unità tettonometamorfica del Passo Cavalcafciche (NEOB-A o Basamento Orobico Nord-Est, tipo II di SPALLA & GOSSO), compresa tra una direttrice non precisamente definita che connette Edolo, a nord, e la Linea del Sellero (riattivata in età alpina), a sud, è costituita prevalentemente da metapeliti a granato-biotite-cloritoide-staurolite, metagranitoidi, quarziti e rare metabasiti, e mostra un'evoluzione metamorfica di età ercinica in facies anfibolitica a epidoto, in facies anfibolitica e quindi in facies scisti verdi durante lo sviluppo di tre gruppi di strutture sovrapposte (D1a, D1b, D2). L'associazione di rocce è simile a quella dell'UTM dell'Aprica, con la differenza che questa UTM include anche granitoidi prepermiani, che ne suggeriscono una provenienza da un diverso livello crostale.

Entrambe le UTM sono intersecate da filoni basici, sia molto antichi (pre-Permiano?), foliati e piegati insieme alle rocce incassanti, sia di età più recente che intersecano in discordanza le strutture prealpine delle rocce incassanti (pre-Cretacico?) o le loro pieghe alpine (Cretacico superiore - Paleocene inferiore).

In entrambe le UTM la foliazione S_2 rappresenta la *fabric* dominante.

Nel basamento metamorfico dell'area in oggetto sono state individuate almeno quattro distinte fasi deformative duttili, due delle quali attribuite all'evento orogenico alpino. Le prime due fasi deformative riconosciute D1 e D2, correlate all'orogenesi varisca, sono entrambe

sinmetamorfiche.

La fase deformativa D1 è riconoscibile unicamente dai relitti della foliazione S1 presenti in domini intrafoliali alla successiva S2, oppure nelle zone di cerniera delle pieghe D2. A scala mesoscopica sono attribuibili alla D1 le alternanze litologiche micascisti-quarziti.

La seconda fase deformativa D2, responsabile della foliazione S2 (*fabric* dominante a scala regionale), ha prodotto strutture (pieghe isoclinali sviluppate su scala da metrica ad ettometrica associate ad una foliazione di piano assiale) che risultano ancora ben visibili nonostante la successiva sovraimpronta alpina.

Le strutture successive alla D2 sono correlate alla fase compressiva alpina che ha prodotto nell'area orobica una serie di sovrascorrimenti sudvergenti che hanno interessato sia il basamento, sia la copertura permo-mesozoica.

La fase D3 ha prodotto un clivaggio di crenulazione (S3) associato a pieghe a *chevron* solo nelle rocce di basamento più fillosilatiche, e *kink* nelle rocce gneissiche e quarzitiche più competenti.

La successiva fase deformativa D4 è responsabile della formazione di piani di taglio e solo occasionalmente sviluppa un clivaggio.

Per quanto riguarda i depositi di copertura, i più antichi sono di origine glaciale s.l. (*till* di alloggiamento e di ablazione, depositi di contatto glaciale, depositi lacustri e glaciolacustri, depositi fluvioglaciali) e, nella letteratura geologica più recente, vengono attribuiti al *Sintema di Cantù*, unità stratigrafica a limiti inconformi che raggruppa i depositi relativi all'ultima glaciazione (Episodio di Cantù – *Last Glacial Maximum*), la cui età è pleistocenica superiore.

I più recenti, invece, sono tutti attribuibili al *Sintema del Po*, che raggruppa tutti i depositi, indipendentemente dall'agente deposizionale, formati posteriormente all'ultimo evento glaciale pleistocenico. Tale sintema è diacrono su tutta la sua estensione e abbraccia un arco temporale che va dalla parte terminale del Pleistocene superiore sino a tutto l'Olocene. Comprende depositi messi in posto per gravità (detrito di versante, di frana, da trasporto in massa) e depositi alluvionali.

8. GEOMORFOLOGIA

L'area in esame è posta nell'Alta Valle Camonica, laddove questa termina bruscamente il suo andamento NW-SE, proseguendo poi sia verso Est fino a Ponte di Legno (valle del Fiume Oglio), sia verso Ovest fino al Passo dell'Aprica (Valle di Corteno percorsa dal Fiume Ogliolo). Tale assetto a grande scala è di probabile controllo strutturale vista la presenza sia di lineamenti tettonici d'importanza regionale (es. Linea Insubrica), sia di strutture deformative (pieghe, foliazioni) legate alle ultime fasi dell'orogenesi alpina.

All'intersezione tra i tratti vallivi a diversa orientazione e drenaggio si sviluppa l'ampio fondovalle di Edolo, costituito da un riempimento di sedimenti di natura e spessore non del tutto noti, suturato da sedimenti alluvionali olocenici. I sondaggi geognostici eseguiti per la realizzazione della vasca di accumulo ENEL, spinti sino a profondità di 40 m, hanno evidenziato la presenza, al di sotto del materasso alluvionale (4÷10 m di spessore), di depositi lacustri con intercalazioni più grossolane. In corrispondenza della destra idrografica tali depositi ricoprono il substrato roccioso che si colloca a 36÷38 metri da p.c., mentre a valle della vasca (nella zona centrale del fondovalle) il loro spessore aumenta (il substrato non è stato raggiunto dalle perforazioni). Si tratta di depositi costituiti da sabbie limose, limi sabbiosi e limi o limi argillosi con locale presenza di livelli di torba. Geneticamente sono attribuiti alla formazione temporanea di un lago di sbarramento creatosi a seguito degli eventi di trasporto solido della Valle Rabbia di Sonico, con apporti episodici di materiale alluvionale più grossolano. Vista la presenza di intercalazioni più grossolane è probabile che la formazione di un bacino lacustre temporaneo si sia ripetuta più volte in quest'area, sempre a seguito degli eventi di sovralluvionamento della Valle Rabbia di Sonico.

I versanti che delimitano il fondovalle si presentano acclivi e si innalzano rapidamente di quota.

I tratti morfologici salienti dell'area in esame (cfr. carta geologica - geomorfologica [8]) sono determinati principalmente da processi fluviali, processi glacigenici e processi legati alla gravità.

I processi fluviali hanno agito sia con fenomeni di erosione, che hanno portato alla formazione e all'approfondimento delle valli (le principali sono di origine preglaciale), sia con fenomeni di sedimentazione, con formazione di riempimenti alluvionali. Sul fondovalle attualmente sembrano prevalere processi di deposizione, anche se fenomeni erosionali si presentano nei frequenti episodi di piena cui vanno soggetti i corsi d'acqua principali (Fiume Oglio ed Ogliolo). Queste piene sono caratterizzate dall'elevato contributo del trasporto solido di fondo e dalla forte energia di erosione. Nelle incisioni minori che scendono ripidamente dai versanti, invece, sono preponderanti i fenomeni erosionali: lungo le stesse sono frequenti i fenomeni di trasporto in massa a seguito di episodi alluvionali intensi che innescano frane lungo le sponde. I processi glacigenici, connessi a ripetute glaciazioni, per tutto il Quaternario hanno determinato diversi episodi di avanzata e ritiro dei ghiacciai che occupavano le valli principali e dei loro apparati glaciali minori affluenti. Evidenze di terreno morfologiche e deposizionali sono riscontrabili principalmente per l'ultima glaciazione (Episodio Cantù) in quanto le aree di alimentazione e le quote raggiunte dal ghiacciaio vallivo e dai suoi affluenti erano simili durante tutte le avanzate glaciali, tanto che quasi sempre l'LGM (*Last Glacial Maximum*) coincide con la quota massima locale del ghiaccio. Per tale motivo sia i depositi che le morfologie legati a glaciazioni più antiche sono stati quasi completamente oblitterati dall'ultimo passaggio del ghiacciaio. Durante l'LGM, presso Monno (località poco a N di Edolo) la lingua principale del

ghiacciaio proveniente dall'alta valle raggiungeva i 2000 m slm. Tale ghiacciaio risaliva la Valle di Corteno raggiungendo il Passo dell'Aprica, dove entrava in contatto con quello che occupava la Valtellina. Studi recenti ipotizzano che durante la fase di massima avanzata il ghiacciaio camuno fosse quello dominante, che riusciva a contrastare il flusso degli apparati afferenti al grande ghiacciaio abduano.

I processi di esarazione glaciale, con forme di erosione e modellamento del substrato in dossi montonati, allungati parallelamente alla valle sono ben visibili lungo il versante vallivo sinistro, nell'intorno di Mu. Forme di esarazione così ben sviluppate sono sicuramente state favorite, oltre che dalla presenza di un apparato glaciale di grande spessore, anche da fattori strutturali. Va comunque evidenziato che, sebbene il modellamento del substrato con una morfologia a ripiani e gradini, a scala da metrica a ettometrica è sicuramente legato primariamente a motivi strutturali a grande scala, sui quali l'azione del ghiacciaio si è limitata a produrre forme di esarazione, già in epoca preglaciale sono stati attivi processi di deformazione gravitativa profonda dei versanti, che hanno originato una serie di terrazzi (interpretati in passato come terrazzi di origine glaciale) caratterizzati da dossi e contropendenze delimitati da profonde trincee da rilascio, poi modellati dall'esarazione glaciale.

I processi di deposizione di materiale glaciale su un substrato modellato in dossi montonati hanno portato al colmamento, parziale o totale, delle depressioni con *till* di alloggiamento o di fondo, e alla deposizione sui dossi di materiale di ablazione. Un importante fenomeno di colmamento è stato messo in evidenza dal sondaggio SD06, eseguito entro una depressione tra dossi montonati poco a Nord di Mu, dove il substrato roccioso è stato riscontrato ad una profondità di -38.40 m. In questo specifico caso, tuttavia, si ritiene che lo spesso riempimento, oltre che da depositi glaciali veri e propri, sia costituito da materiale (sempre di origine prevalentemente glaciale) deposti per trasporto in massa da parte del corso d'acqua che scende dalla Valle Moia. È infatti ancora riconoscibile un ampio conoide che interrompe la continuità della depressione tra dossi montonati.

Nell'area in esame mancano evidenze delle fasi di ritiro del ghiacciaio al termine dell'Episodio Cantù, sia a causa di mancata deposizione, sia a causa dell'intensa dinamica postglaciale dei versanti.

I processi gravitativi sviluppati lungo i versanti hanno dato luogo a falde detritiche, particolarmente estese alle quote più elevate, a frane per crollo in roccia, con fenomeni più significativi nelle aree dove il substrato è più intensamente fratturato, ed a frane per colata o scivolamento. In epoca storica, i processi di franamento nella copertura, sia per colata che per *debris-flow*, sono stati favoriti dal disboscamento antropico, attività il cui impatto inizia ad essere sensibile già in epoca romana, e che ha privato molti versanti della copertura arborea che li proteggeva dai fenomeni di dissesto più superficiali. I processi di soliflusso, colate di *debris*-o *mud flow* e fenomeni di colluvio interessano, rimaneggiandoli, tutti i depositi quaternari e in particolare i sedimenti glaciali presenti lungo i versanti. Spesso, in una stessa area agiscono contemporaneamente più processi gravitativi, tanto da non poter essere facilmente identificati. Tra i processi gravitativi rientrano anche i fenomeni di deformazione gravitativa profonda (DGPV), particolarmente diffusi ed estesi in Alta Val Camonica. L'Inventario dei fenomeni franosi della Regione Lombardia non riporta fenomeni di tale tipologia sul versante orientale del M. Colmo, entro il cui piede si sviluppa il tracciato della galleria naturale della variante in progetto (Figura 31), mentre una DGPV è riportata nella cartografia allegata all'Inventario dei dissesti del Piano Territoriale Coordinamento Provinciale della Provincia di Brescia (2014) (Figura 32) e nel "WP1 - Geodatabase delle grandi frane in roccia" del progetto "Long-term activity, damage and collapse potential of large, slow-moving landslides in rock in Lombardia

(Slow2Fast)” portato avanti dal Dipartimento di Scienze della Terra e dell’Ambiente dell’Università degli Studi Milano-Bicocca (Figura 33).

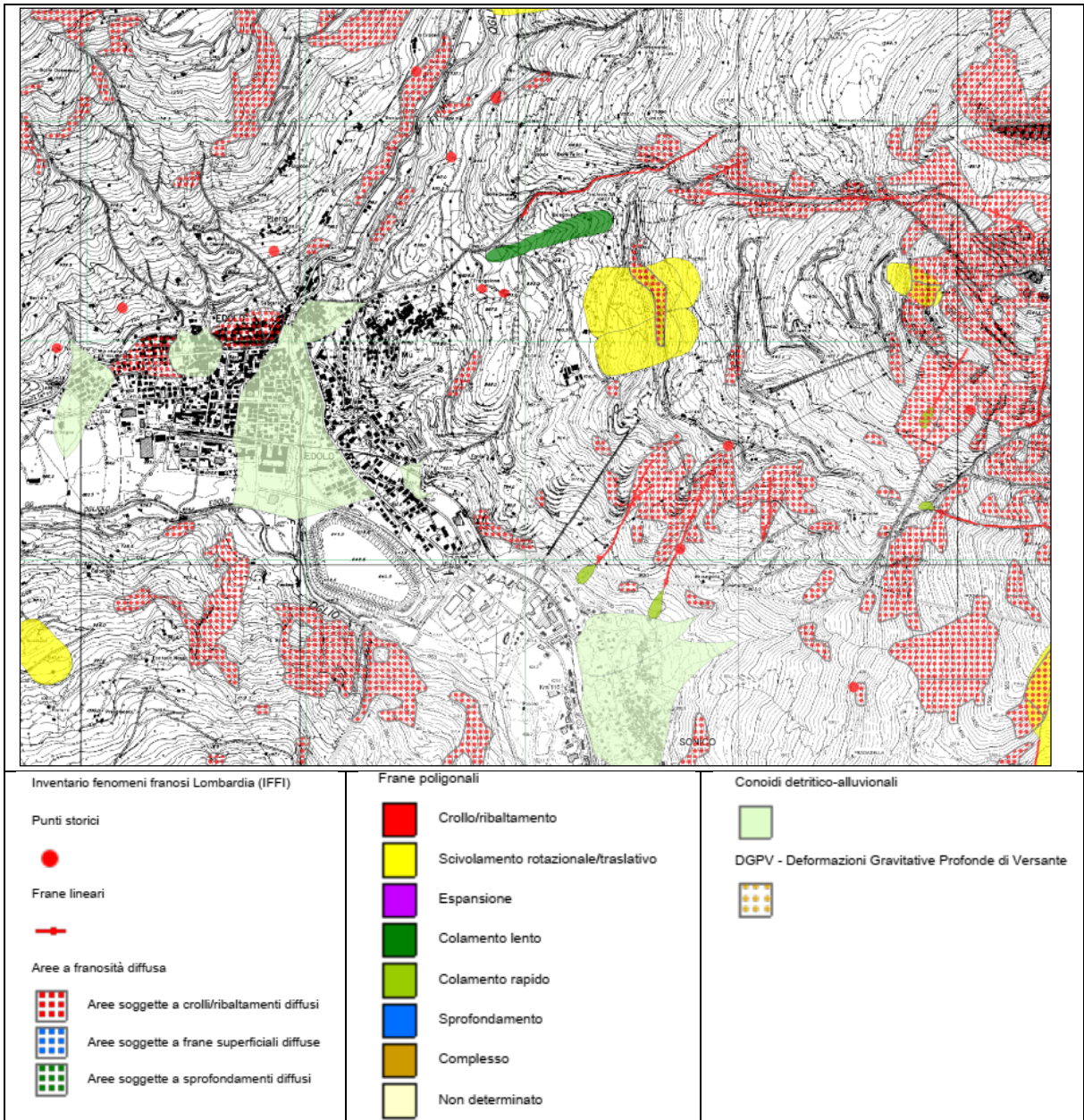


Figura 31: Estratto dall’Inventario dei fenomeni franosi della Regione Lombardia relativo alla zona in esame.

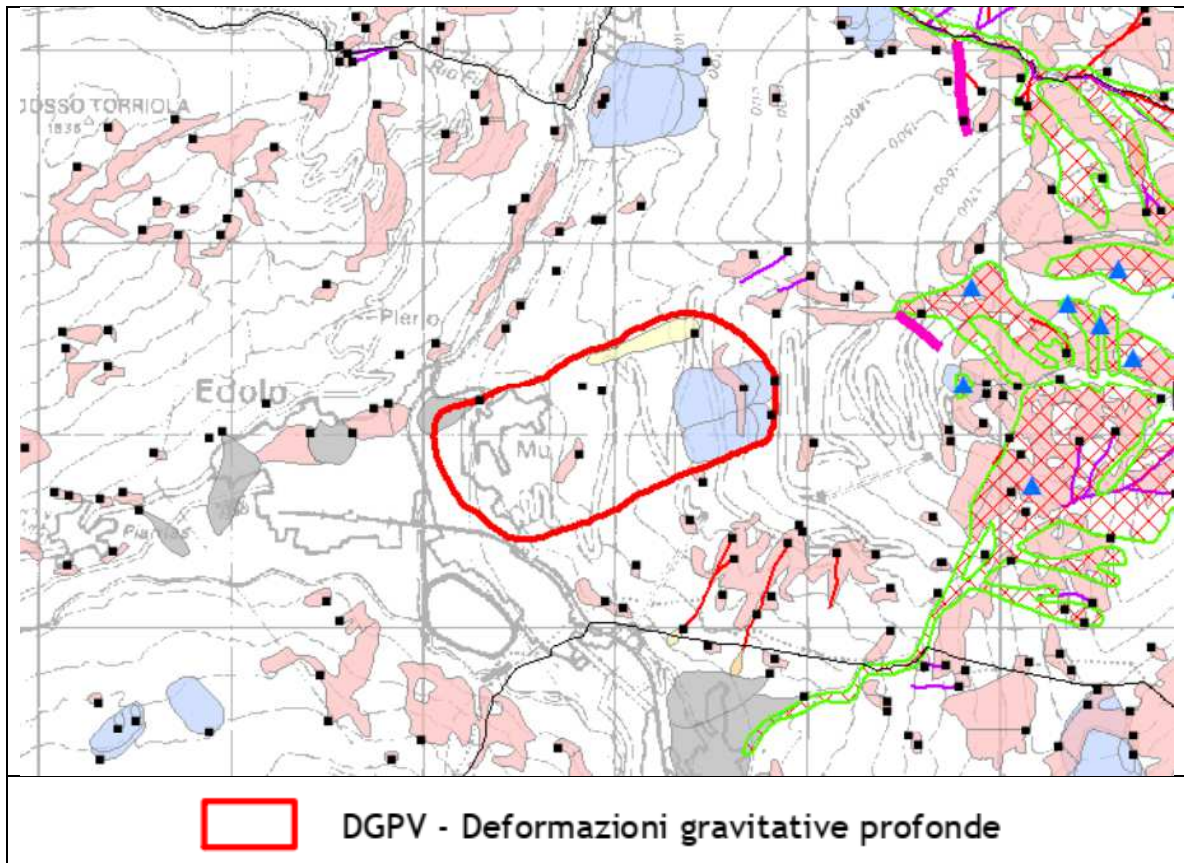


Figura 32: Estratto dalla Tav.3.2 “Inventario dei dissesti” (scala 1:50.000) allegata al Piano Territoriale Coordinamento Provinciale della Provincia di Brescia (2014) relativo alla zona in esame.

Da informazioni fornite dai responsabili del progetto Slow2Fast risulta che la DGPV è stata identificata e mappata solo su base geomorfologica (Google Earth, ortofoto multitemporali, DEM 5m, stereofoto), ma data l'elevata copertura vegetazionale dell'area, il grado di incertezza circa la sua effettiva presenza è elevato. Dall'analisi integrata di velocità cinematica e densità di morfostrutture risulta un indice di attività molto basso e di conseguenza la DGPV è stata considerata inattiva o senza implicazioni di rischio significative.

I dati ricavati con tecniche interferometriche delle immagini radar satellitari nel periodo dal 1992 al 2014 (Figura 34) non forniscono informazioni utili sull'eventuale presenza di una DGPV, anche perché la stessa potrebbe essere in una condizione “stabile”. Tali dati evidenziano spostamenti discretamente diffusi nel settore sommitale del versante (a quota più elevata del perimetro della DGPV), ma i punti-bersaglio (*Permanent Scatterer*) sono per gran parte localizzati in falde di detrito e sono riferibili a movimenti superficiali.

Entro il perimetro della presunta DGPV, nella parte alta è individuato un unico punto interessato da uno spostamento significativo, ma è probabilmente riferibile ad una situazione di dissesto locale. Per la restante parte i pochi PS presenti non mostrano segni di attività (i movimenti sono prossimi al range di errore di $\pm 2\text{mm/yr}$ per Sentinel 1.-Disc). Al piede solo pochi punti hanno velocità esterne a tale range, ma quasi sicuramente sono legati ad attività antropiche.

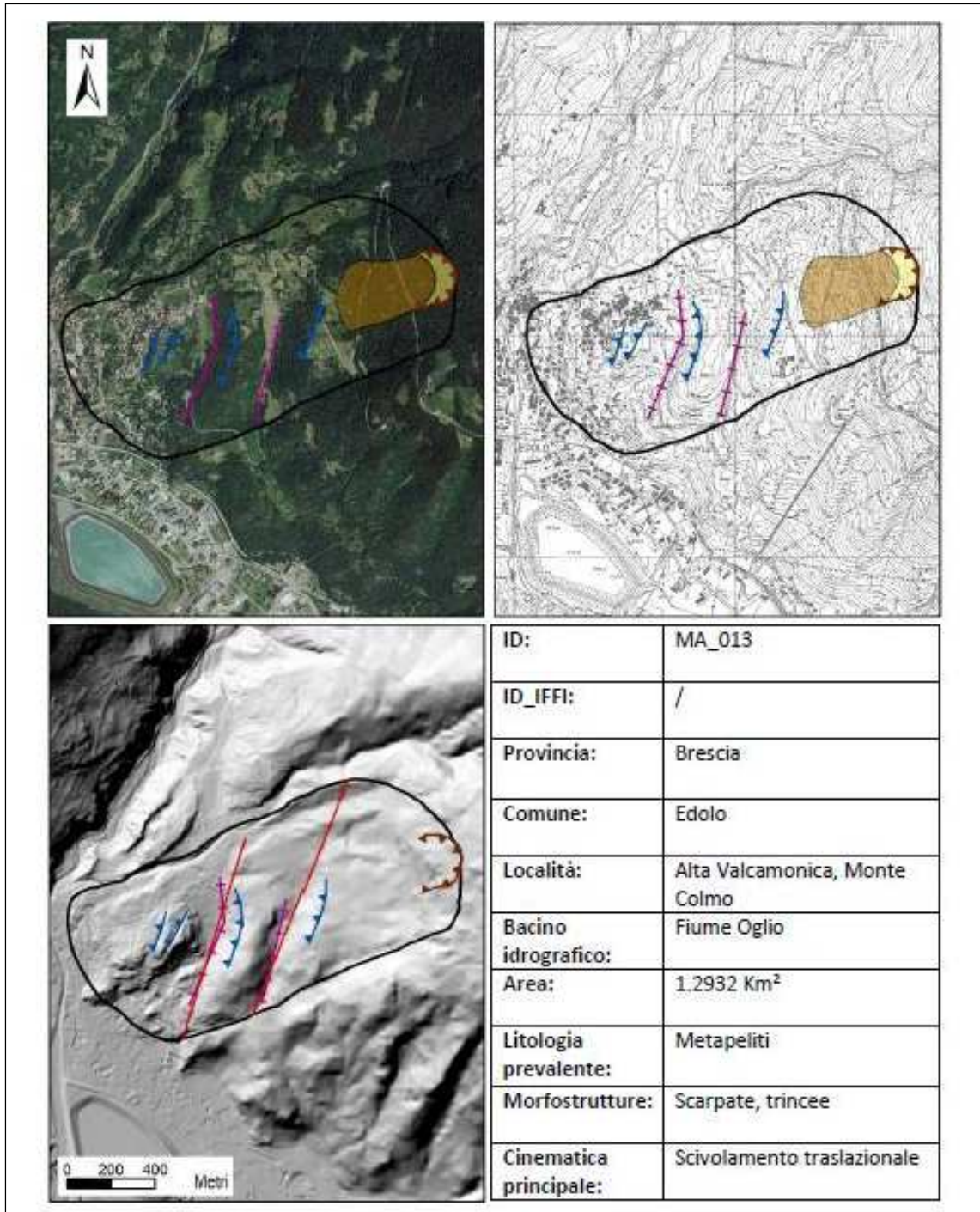


Figura 33: Scheda tecnica della DGPV di Edolo contenuta nel “WP1 - Geodatabase delle grandi frane in roccia” del progetto “Long-term activity, damage and collapse potential of large, slow-moving landslides in rock in Lombardia (Slow2Fast)” – Dipartimento di Scienze della Terra e dell’Ambiente dell’Università degli Studi Milano-Bicocca.

Sebbene da fotointerpretazione emergano indizi morfologici che potrebbero essere facilmente riferiti ad una DGPV, in sito non sono stati rilevati elementi certi per confermarne tale genesi. Inoltre, i dati forniti dai sondaggi geognostici e dalle prove eseguite in foro non hanno evidenziato uno stato fessurativo degli ammassi rocciosi tale da poterli ritenere coinvolti in un movimento gravitativo. In particolare, le prove Lugeon hanno fornito valori di permeabilità

molto bassi anche nei tratti dove, sulla base dell'indice RQD, gli ammassi rocciosi sono interessati da un discreto numero di discontinuità. Ciò non risulta compatibile con un ammasso che, se fosse stato coinvolto in un importante fenomeno gravitativo, dovrebbe essere rilasciato per i movimenti subiti e, quindi, con porzioni caratterizzate da fratture aperte.

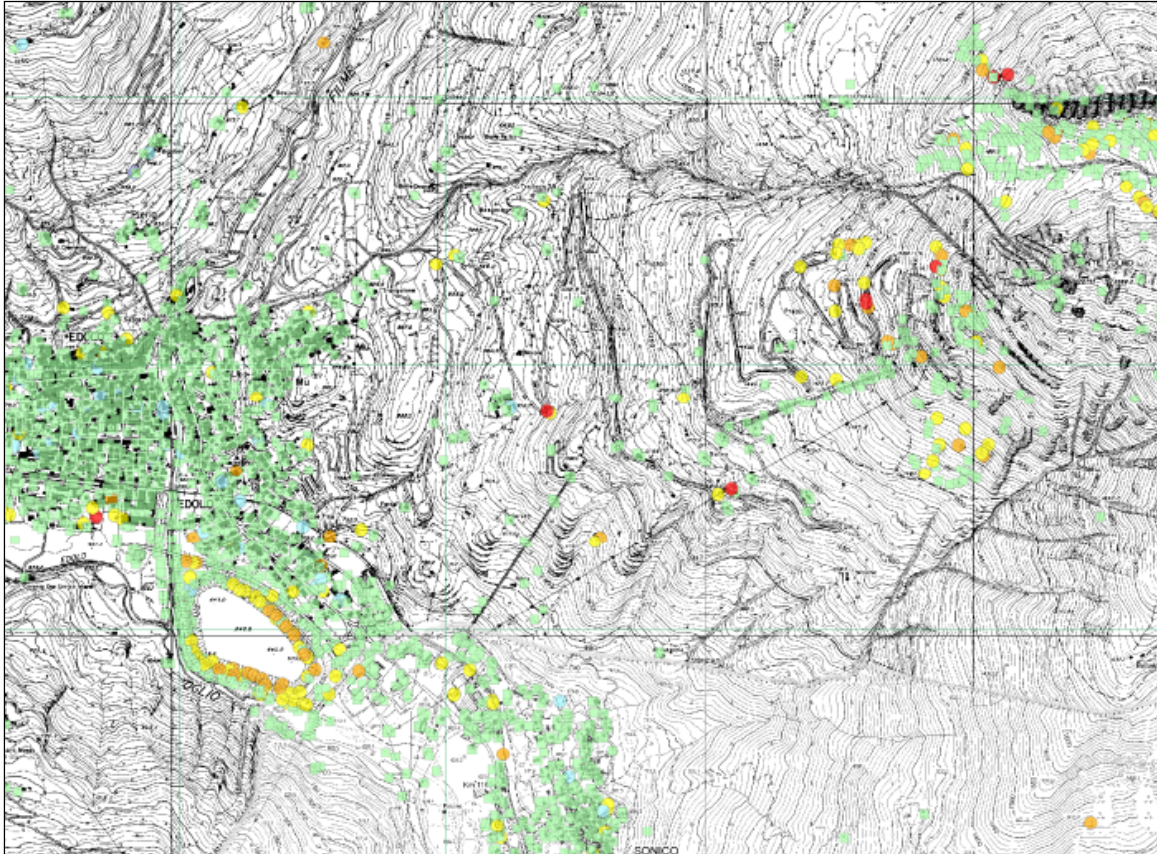


Figura 34: Estratto dal Geoportale regionale della mappa con i dati di interferometria radar relativo alla zona in esame.

9. IDROGEOLOGIA

Alla definizione dell'assetto idrogeologico dell'area interessata dall'attraversamento del tracciato in esame hanno concorso diversi punti di osservazione. In aggiunta alla consultazione delle ricerche bibliografiche in argomento, sono stati di specifico ausilio l'osservazione del sito durante il rilievo geologico di dettaglio, incrociata con le risultanze delle indagini geognostiche delle due fasi progettuali a tutt'oggi eseguite, unitamente alla lettura dei livelli piezometrici negli strumenti installati.

Stanzialmente i settori fisiografici peculiari, interessati dall'opera, sono:

- l'ambiente di fondovalle costituito da un riempimento di sedimenti di natura e spessore non del tutto noti, suturato da sedimenti alluvionali olocenici, su cui trovano sede le opere dell'imbocco sud;
- il *talweg*, l'alveo ed i connessi depositi alluvionali recenti del Fiume Oglio in corrispondenza dell'imbocco nord e, più diffusamente,
- i circuiti idrici sotterranei intercettati dai 1467,50m del cavo della galleria naturale.

I dati piezometrici disponibili sono riferiti alla falda contenuta nei depositi granulari interessati dagli scavi di imbocco sud e fanno riferimento all'osservazione da febbraio 2020 (inizio lavori) a dicembre 2020 (fine lavori). Si nota che la soggiacenza nei tre piezometri SD01PZ, SD02PZ e SD03PZ si attesta nell'intorno dei 7m da piano campagna, con un'oscillazione di massimi 17cm nell'arco del periodo di osservazione ed un coefficiente di permeabilità K di ordine compreso tra $10^{-5} \div 10^{-6}$ m/sec (da prove di permeabilità *Lefranc*).

I valori misurati nei piezometri installati durante la campagna indagini sono riportati nella seguente tabella:

| | SD01-Pz | SD02-Pz | SD03-Pz |
|-----------|---------|---------|---------|
| 21-feb-20 | 7.28 | | 7.53 |
| 01-lug-19 | 7.31 | | 7.55 |
| 10-lug-20 | 7.32 | | 7.53 |
| 24-lug-20 | 7.34 | | 7.55 |
| 05-ago-20 | 7.34 | | 7.55 |
| 18-ago-20 | 7.34 | | 7.56 |
| 31-ago-20 | 7.35 | | 7.56 |
| 15-set-20 | 7.32 | | 7.54 |
| 24-set-20 | 7.31 | | 7.53 |
| 28-ott-20 | 7.27 | | 7.50 |
| 11-dic-20 | 7.21 | | 7.43 |
| 21-dic-20 | 7.18 | 7.38 | 7.40 |

Per quanto concerne l'area di imbocco nord ed il tratto di galleria naturale, sono disponibili le

osservazioni piezometriche rilevate nel corso delle perforazioni riassunte nella seguente tabella:

| Sondaggio | Livello piezometrica in foro |
|-----------|----------------------------------|
| SD04 | 7,12m |
| SD05 | 3,65m |
| SD06 | 15,8m |
| SD07 | 7,42 |
| SD08 | 6,21m (da prova <i>Lefranc</i>) |

Per l'area di imbocco nord, il sondaggio SD08 evidenzia la presenza di una coltre alluvionale di riempimento del fondo valle di almeno 25m. La morfologia incassata dell'alveo e l'elevato spessore dei depositi alluvionali accertano l'azione drenante del corso d'acqua, attestandone il livello quale quota di base della piezometrica dell'imbocco nord.

Nel merito dell'idrogeologia di profondità che caratterizza il complesso delle litofacies dei micascisti, l'interpretazione è articolata e trova argomentazioni prevalentemente sullo stato di fessurazione posto in evidenza sia dai sondaggi (carote, *BHTV*, prove di permeabilità di tipo *Lugeon*) che dal rilievo geologico di superficie, unitamente agli *stop* geostrutturali. Si tratta infatti di permeabilità secondaria per fessurazione e sono appunto le caratteristiche fisiche di discontinuità e lineamenti a condizionarne la conducibilità di ammasso.

Nella generalità dei casi osservati le discontinuità in carota presentano i lembi chiusi, spesso serrati o con aperture minime. Questo aspetto trova conferma diretta negli assorbimenti delle prove di permeabilità *Lugeon*, sempre esigui (K compresi tra 10^{-8} e 10^{-10} m/s). Anche i tratti di sondaggio sottoposti a rilievi ottici e sonici rivelano analogo aspetto da cui ne consegue analogo comportamento di conducibilità. Anche l'osservazione di superficie orienta verso una interpretazione analoga, pur meno rigorosa, in quanto le fratture, soprattutto le più persistenti, manifestano geometrie con effetti da detensionamento. Si è osservato che anche i fenomeni di fagliazione, spesso presenti e visibili alla piccola-media scala, presentano riempimenti di faglia a struttura cataclastica, non predisponenti quindi l'infiltrazione.

Si presume pertanto che l'ammasso roccioso sia caratterizzato da una bassa permeabilità, in diminuzione con la profondità determinando, alla quota dell'opera di progetto, condizioni idrauliche umide, con alternanza di tratti asciutti e tratti con gocciolamenti. Possibili e locali venute d'acqua di maggior entità potranno essere possibili all'intersezione con i lineamenti di maggior importanza. Queste eventuali venute sono verosimilmente associate all'accumulo dell'acqua meteorica in tempi geologici all'interno delle discontinuità stesse, perciò avranno un carattere temporaneo con la tendenza ad una progressiva diminuzione di portata.

Per quanto riguarda la componente idrogeologica è stata redatta una carta idrogeologica [7] che distingue nell'area in esame le seguenti tre principali classi di permeabilità:

PERMEABILITA' ELEVATA

Caratterizza i depositi alluvionali del Fiume Oglio sia di piena ordinaria che fluvio-glaciali antichi. Si tratta di litofacies poligeniche, eterometriche, costituite da prevalenti ghiaie con sabbie e minoritari limi e blocchi. La costituzione litologica è mista, con commistione sia di scisti che elementi tonalitici. Con la profondità diminuisce la taglia granulometrica con passaggio a sabbie e limi di origine lacustre per genesi da lago di sbarramento del Fiume Oglio. Si tratta di un acquifero con permeabilità primaria per porosità, con profondità superiore ai 40m,

verosimilmente frazionato in acquitardi per la presenza di livelli limosi, sede di una falda permanente con soggiacenza di qualche metro e soggetta ad escursioni stagionali di modesta entità. La conducibilità idraulica è mediamente elevata ($k \cong 10^{-3}$ m/s nelle porzioni superficiali grossolane), pur presentando comunque sensibili variazioni in funzione della disponibilità di granulometrie fini ($k \cong 10^{-5}$ m/s nelle posizioni stratigrafiche più profonde)

PERMEABILITA' MEDIA

Caratterizza le coltri detritiche di versante costituite da litofacies clastiche-detritiche, poligeniche, eterometriche, costituite da prevalenti ghiaie e blocchi, debolmente coesive per la minoritaria presenza di granulometrie fini. La genesi è mista, con depositi colluvio-eluviali prevalentemente nelle porzioni di versante più elevate, passante a glaciale rimaneggiato (presenza di elementi tonalitici) nelle porzioni meno elevate, interessate dalle dinamiche glaciali. Si tratta di permeabilità primaria per porosità con acquifero principale recettore delle acque meteoriche, di spessore molto variabile, mediamente intorno ai 7-10m ma con locali estensioni sino ad oltre 30m (10^{-4} m/s $<k<10^{-6}$ m/s).

PERMEABILITA' BASSA

Caratterizza le litofacies affioranti della Formazione degli Scisti di Edolo costituite da prevalenti micascisti quarzoso feldspatici, grigio plumbei, con foliazione da ben evidente a poco marcata, generalmente definita dall'alternanza di sottili letti lepidoblastici micaceo-cloritici, e letti granoblastici quarzoso-feldspatici. Minoritariamente sono rappresentate litofacies quarzitiche e quarzoscistose, ed intercalazioni rare di micascisti filladici. Si tratta di permeabilità secondaria per fratturazione; la condizione serrata delle fratture determina una conducibilità idraulica molto limitata, anche laddove sale il valore dell'indice RQD, come accertato dalle prove di permeabilità di tipo Lugeon eseguite nella campagna indagini. Escludendo i valori estremi, le permeabilità misurate registrano 10^{-8} m/s $<K<10^{-9}$ m/s. Si presume una maggior permeabilità in corrispondenza delle discontinuità principali identificate anche se verosimilmente in riduzione con la profondità.

10.INDAGINI GEOGNOSTICHE

10.1 Indagini in fase di progetto preliminare

In sede di Progetto Preliminare sono state eseguite le seguenti indagini in sito:

- 3 sondaggi geognostici con prove SPT (2 agli imbocchi con lunghezza 20 metri e 1 in corrispondenza del viadotto lungo 30 m);
- 4 pozzetti esplorativi;
- 3 profili sismici;
- 1 prova down hole in corrispondenza del sondaggio S3.

La planimetria di ubicazione delle indagini è riportata nella figura che segue.

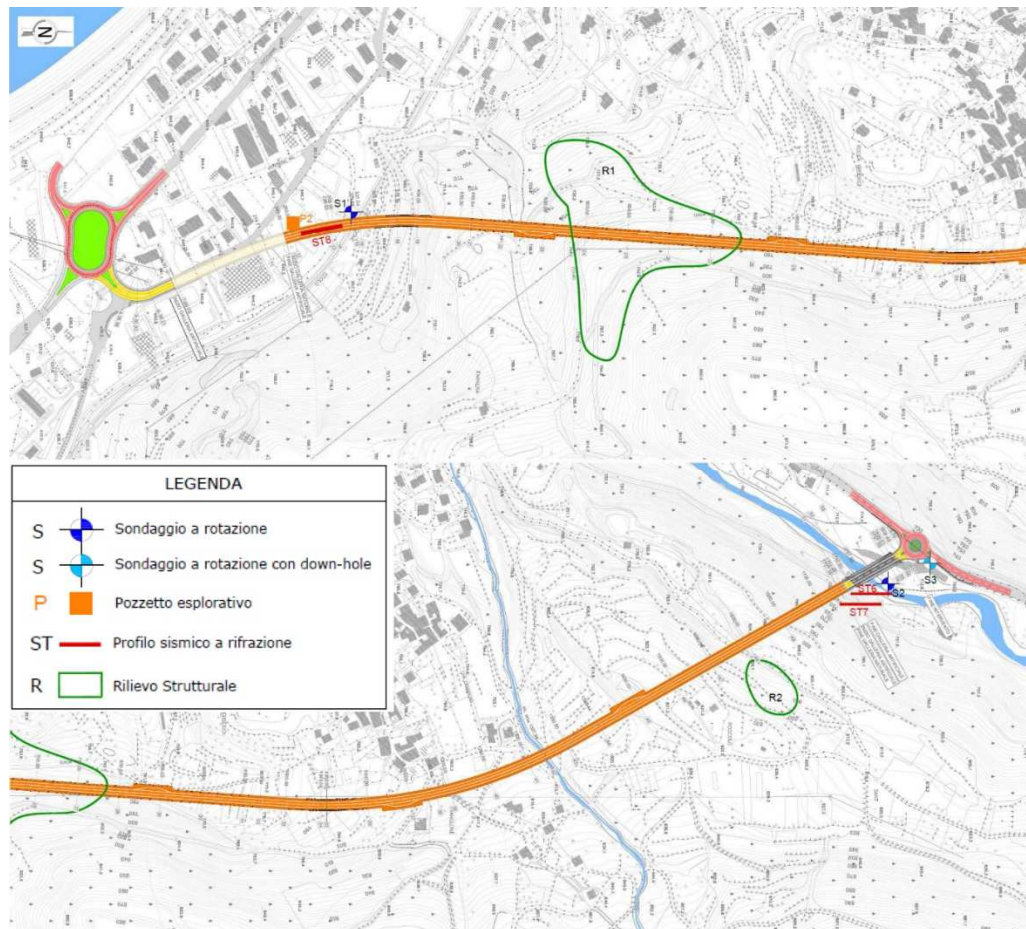


Figura 35 - Ubicazione delle indagini eseguite per il Progetto Preliminare

I livelli di falda misurati sono stati i seguenti:

| Sondaggio | Profondità m p.c. |
|-----------|-------------------|
| S1 | 10,70 |
| S2 | 5,50 |
| S3 | 10,50 |

10.2 Indagini in fase di progetto definitivo

Nell'ambito del progetto definitivo è stata effettuata una campagna di indagini geognostiche finalizzata alla determinazione delle caratteristiche geotecniche e alla definizione stratigrafica in chiave geolitologica.

La campagna di indagine geognostica è stata così articolata:

- n. 4 sondaggi geognostici verticali a carotaggio continuo, spinti sino a max 35 m dal p.c., di cui n. 3 condizionati con piezometro a tubo aperto;
- n. 4 sondaggi geognostici verticali eseguiti in parte a distruzione di nucleo ed in parte a carotaggio continuo, spinti sino ad un max di 135 m dal p.c.;
- n. 24 prove penetrometriche SPT;
- n. 7 prove di permeabilità Lefranc;

- n. 18 prove di permeabilità Lugeon;
- n. 241 prelievi di campioni, di cui n. 4 indisturbati, n. 41 rimaneggiati, n. 196 litoidi, da sottoporre a prove di laboratorio geotecnico;
- n. 29 prove dilatometriche nei sondaggi profondi;
- n. 4 log ottici, acustici e sonici nei sondaggi profondi;
- georeferenziazione dei punti di indagine.

Sono state realizzate inoltre:

- n. 4 prospezioni sismiche a rifrazione;
- n. 3 prospezioni sismiche MASW.

La figura che segue riporta l'ubicazione delle indagini geognostiche eseguite e sopra descritte.

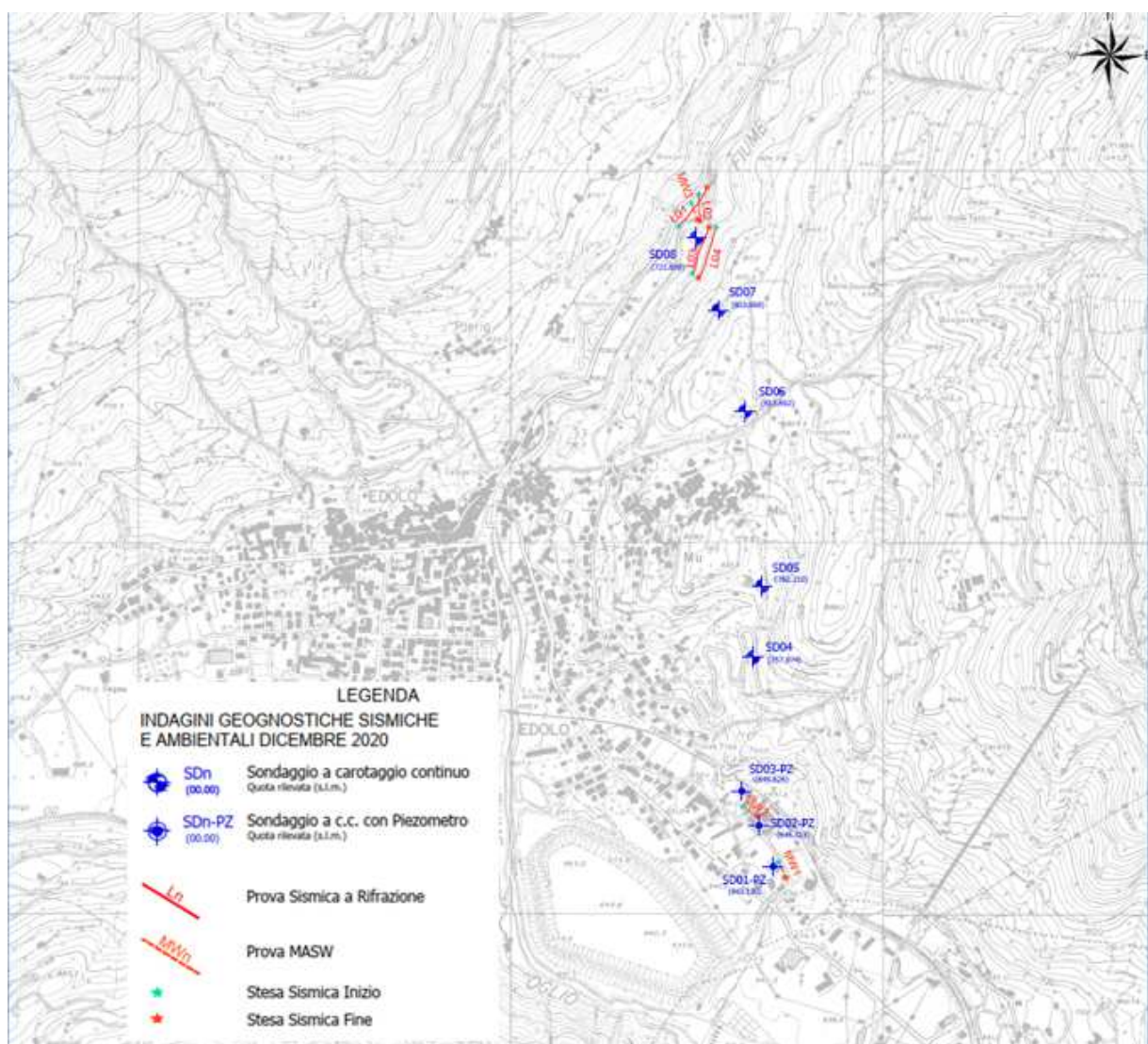


Figura 36 Ubicazione delle indagini geognostiche eseguite per il Progetto Definitivo

Sono stati installati 3 piezometri a tubo aperto in corrispondenza delle verticali SD01-PZ, SD02-PZ e SD03-PZ finalizzati alla misura dei livelli di falda.

Le letture eseguite durante la campagna di indagine, in termini di soggiacenza dalla testa tubo,

sono riportate in Tabella 2.

| | SD01-PZ | SD02-PZ | SD03-PZ |
|------------|---------|---------|---------|
| 21/02/2020 | 7.28 | - | 7.53 |
| 01/07/2020 | 7.31 | - | 7.55 |
| 10/07/2020 | 7.32 | - | 7.53 |
| 24/07/2020 | 7.34 | - | 7.55 |
| 05/08/2020 | 7.34 | - | 7.55 |
| 18/08/2020 | 7.34 | - | 7.56 |
| 31/08/2020 | 7.35 | - | 7.56 |
| 15/09/2020 | 7.32 | - | 7.54 |
| 24/09/2020 | 7.31 | - | 7.53 |
| 28/10/2020 | 7.27 | - | 7.50 |
| 11/12/2020 | 7.21 | - | 7.43 |
| 21/12/2020 | 7.18 | 7.38 | 7.40 |

Tabella 2 Campagna geonostica del definitivo - Letture piezometriche

Per tradurre le soggiacenze in quote assolute si riportano nel seguito le quote delle teste tubo:

| | SD01-PZ | SD02-PZ | SD03-PZ |
|-----------------------|---------|---------|---------|
| Quota t.t. (m l.m.m.) | 642.972 | 646.476 | 649.645 |

Tabella 3 Quote assolute testa tubo

Le quote assolute dei livelli di falda risultano quindi:

| | SD01-PZ | SD02-PZ | SD03-PZ |
|------------|---------|---------|---------|
| 21/02/2020 | 635.692 | - | 642.115 |
| 01/07/2020 | 635.662 | - | 642.095 |
| 10/07/2020 | 635.652 | - | 642.115 |
| 24/07/2020 | 635.632 | - | 642.095 |
| 05/08/2020 | 635.632 | - | 642.095 |
| 18/08/2020 | 635.632 | - | 642.085 |
| 31/08/2020 | 635.622 | - | 642.085 |
| 15/09/2020 | 635.652 | - | 642.105 |
| 24/09/2020 | 635.662 | - | 642.115 |
| 28/10/2020 | 635.702 | - | 642.145 |
| 11/12/2020 | 635.762 | - | 642.215 |
| 21/12/2020 | 635.792 | 639.096 | 642.245 |

Tabella 4 Quote assolute del livello di falda misurato

11. GEOMECCANICA DEGLI AMMASSI ROCCIOSI

11.1 Indagini per la caratterizzazione geomeccanica degli ammassi rocciosi

11.1.1 Rilievi geostrutturali

Per definire l'assetto geostrutturale degli ammassi rocciosi interessati dallo scavo della galleria e le caratteristiche geometrico-geomeccaniche dei sistemi di discontinuità presenti sono state eseguite n.3 stazioni di rilievo geomeccanico, la cui ubicazione è riportata in Figura 37.

Relativamente alla caratterizzazione geomeccanica dei sistemi di discontinuità, sono state seguite le raccomandazioni ISRM (International Society for Rock Mechanics)

I parametri considerati e definiti sono stati i seguenti: orientazione, spaziatura, lunghezza della traccia, apertura, riempimento, alterazione delle pareti del giunto, resistenza delle superfici, rugosità a piccola scala e ondulazione del giunto a grande scala (andamento).

Per quanto riguarda l'orientazione, ogni sistema è stato individuato con il valore di giacitura del punto di massima concentrazione dei poli, ricavato mediante analisi con il software Dips 5.1 della Rocscience.Inc. Il valore della giacitura è stato espresso come immersione/inclinazione.

Per quanto riguarda la spaziatura e la lunghezza della traccia, i dati raccolti sono stati sintetizzati in istogrammi di frequenza delle classi previste da ISRM.

Per quanto riguarda il riempimento, l'alterazione e l'ondulazione dei giunti, sono stati forniti i valori che compaiono con maggiore frequenza e, in alcuni casi, anche altri meno frequenti ma ugualmente significativi, quali ad esempio quelli riguardanti i giunti di maggiori dimensioni.

Relativamente all'apertura sono state fornite unicamente notizie di carattere descrittivo. Per quanto riguarda la rugosità, è stato fornito l'intervallo di classi di valori di JRC (Joint Roughness Coefficient), ottenuto per confronto visivo con i profili campione di Barton.

Per quanto riguarda la resistenza delle pareti dei giunti, è stato fornito il range di valori medi di JCS (Joint Compressive Strength) ottenuto, per ciascun sistema di discontinuità, da almeno 3 serie di 10 misure con il martello di Schmidt (sclerometro).

Al fine di individuare quali sono i trend delle principali orientazioni delle discontinuità, tutti i dati giacitureali campionati durante i rilievi (208 discontinuità) sono stati riportati nei diagrammi equiareali di Schmidt complessivi di Figura 38.

La distribuzione dei poli delle discontinuità avviene secondo cinque orientazioni preferenziali, corrispondenti ad altrettanti sistemi, le cui giaciture medie sono riassunte nella Tabella 5.

Il sistema principale, denominato Ks, è caratterizzato da una marcata dispersione dei valori giacitureali poiché è quello impostato sulla foliazione (scistosità) e sulle strutture che, a varia scala, la deformano (crenulazioni, fianchi delle micropieghe, lineazioni d'intersezione).

| Sistema | Immersione (Dip direction) | Inclinazione (Dip) |
|---------|----------------------------|--------------------|
| Ks | 312° | 61° |
| K1 | 216° | 89° |
| K2 | 125° | 73° |
| K3 | 148° | 23° |
| K4 | 173° | 82° |

Tabella 5: Valori medi di giacitura delle orientazioni preferenziali delle discontinuità campionate nelle stazioni di rilievo geomeccanico.

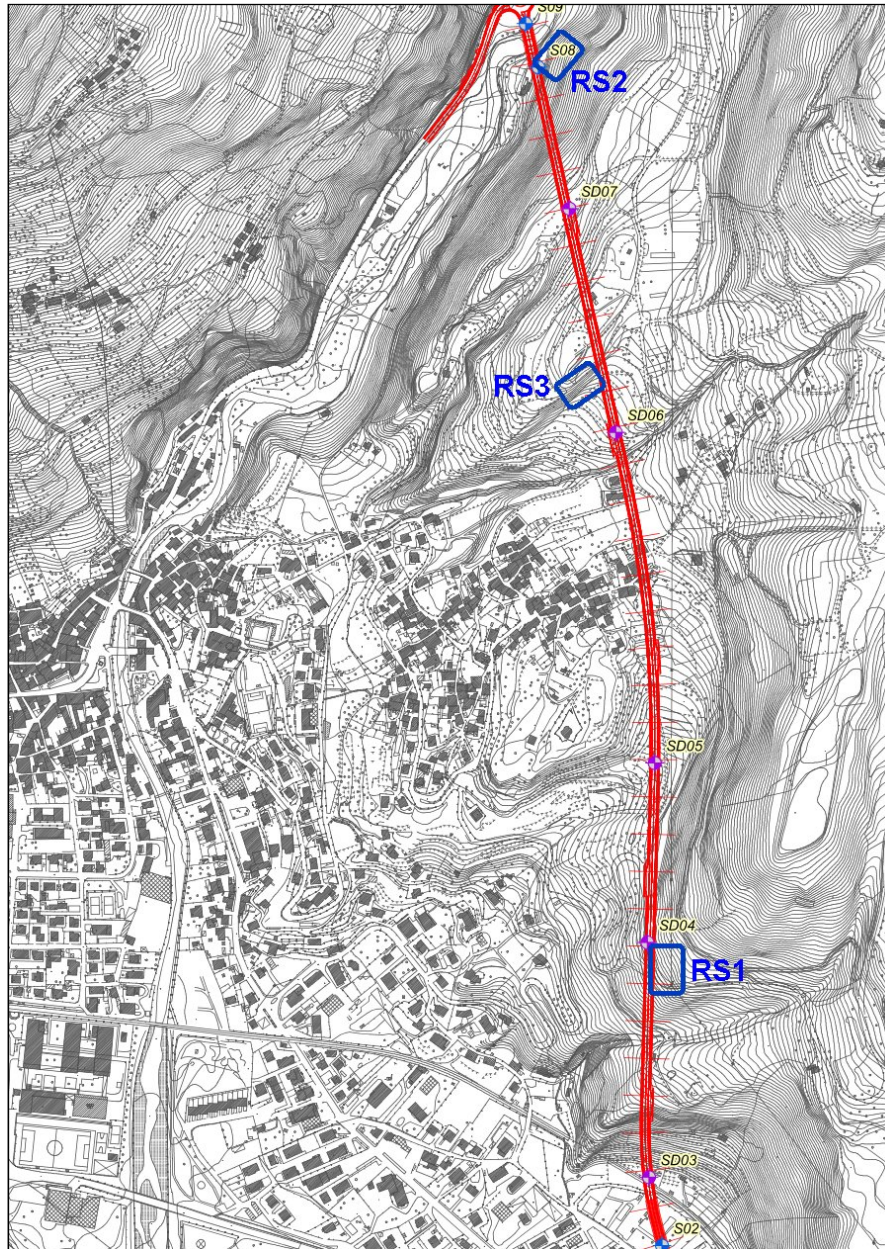


Figura 37: Ubicazione stazioni di rilievo geomeccanico.

| Sistema | Giacitura |
|---------|-----------|
| Ks | 312°/61° |
| K1 | 216°/89° |
| K2 | 125°/73° |
| K3 | 148°/23° |

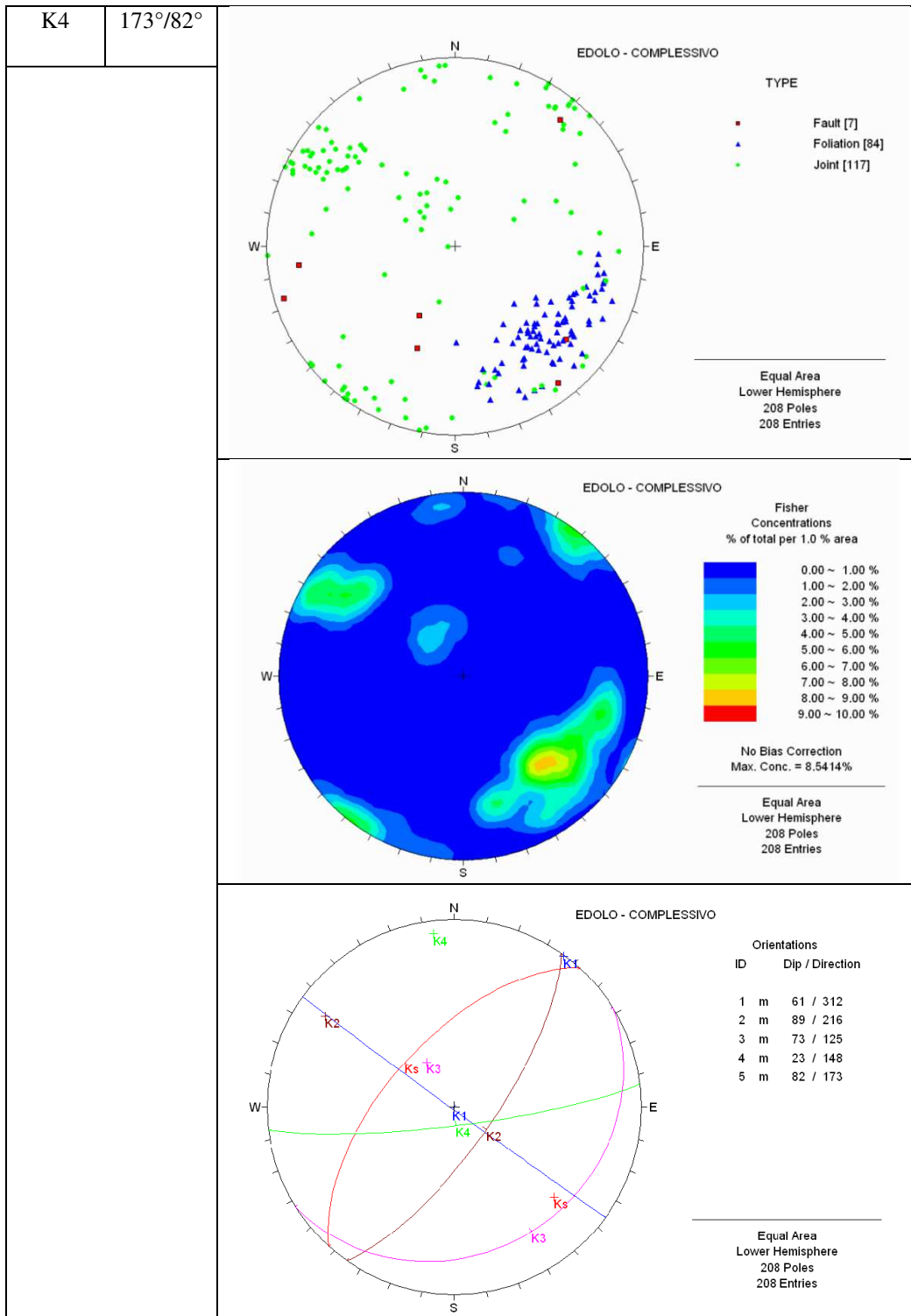


Figura 38: Stereogrammi con riportati i poli di tutti i dati giacaturali campionati nelle stazioni di rilievo geomeccanico, la loro analisi con le curve di isodensità (contour) e le ciclografiche delle orientazioni preferenziali.

11.1.2 Stazione R.S.1

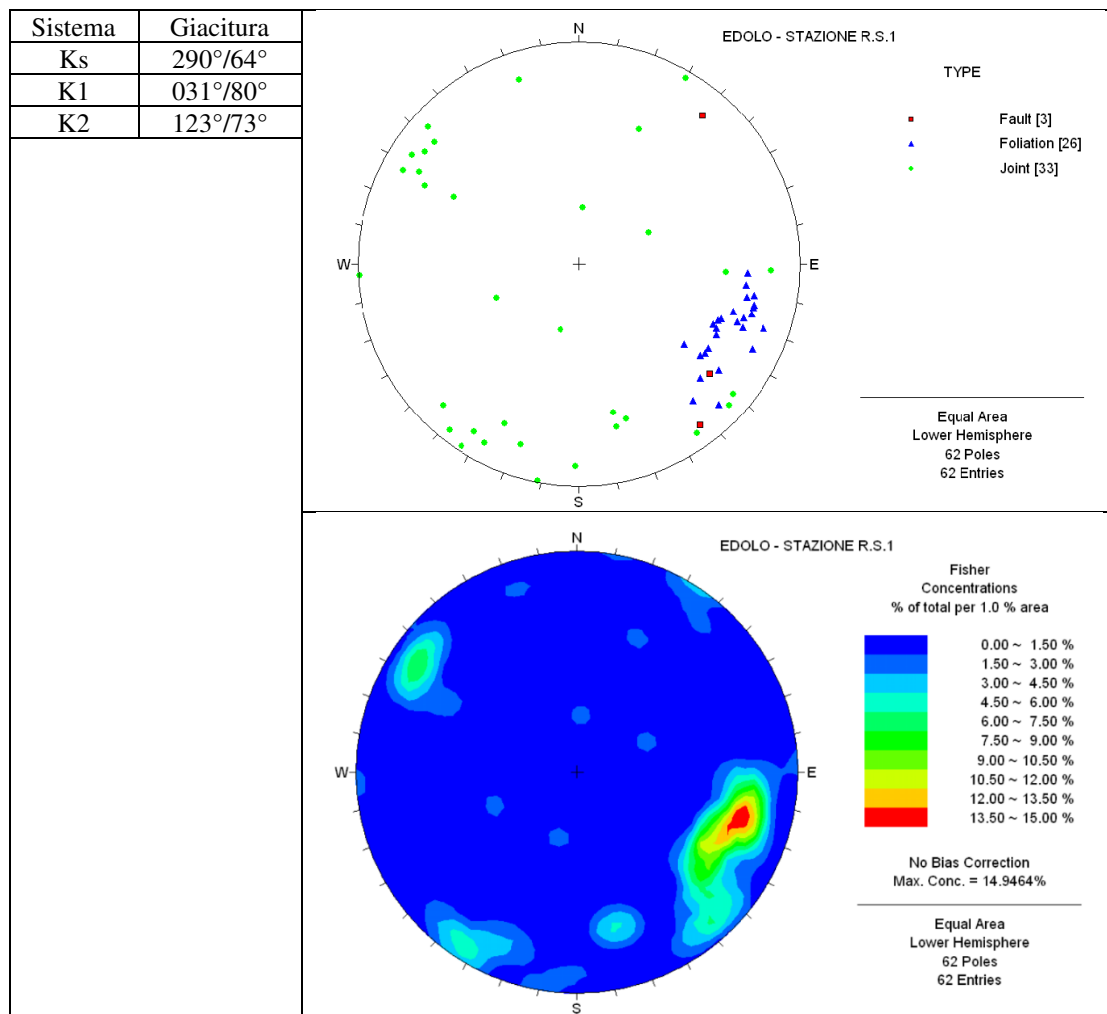
Affioramento: scarpata stradale artificiale, lunghezza 30 m, altezza variabile da 6 a 10 m,

giacitura $264^{\circ}/70^{\circ}$.

Litofacies: micascisti con foliazione prevalentemente poco marcata e ad andamento discretamente regolare (locali pieghe e/o crenulazioni).

Sistemi di discontinuità: la distribuzione dei poli delle discontinuità avviene secondo tre orientazioni preferenziali, corrispondenti ad altrettanti sistemi. Il sistema principale, denominato Ks, è caratterizzato da una discreta dispersione dei valori giacaturali poiché è quello impostato sulla foliazione (scistosità) e sulle strutture che, a varia scala, la deformano (crenulazioni, fianchi delle micropieghe, lineazioni d'intersezione).

Gli altri due sistemi di discontinuità presenti, K1 e K2, sono subortogonali a Ks. Il sistema K1 immerge nel verso opposto a quello definito con l'analisi di tutti i dati campionati durante i rilievi. Sono inoltre presenti diverse discontinuità non sistematiche (random).



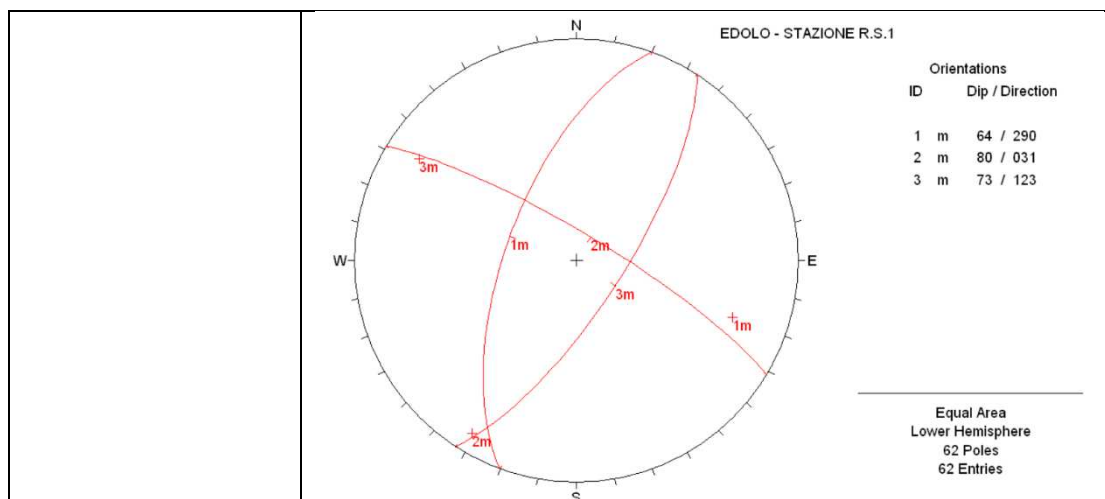


Figura 39: Stereogrammi con riportati i poli di tutti i dati giacaturali campionati nella stazione R.S.1, la loro analisi con le curve di isodensità (contour) e le ciclografiche delle orientazioni preferenziali.

Caratteristiche geometrico-geomeccaniche: nella tabella e negli istogrammi seguenti sono riassunti i dati relativi alle caratteristiche geometrico-geomeccaniche delle discontinuità campionate.

| Sistema | Apertura | Riempimento | Andamento | JRC | Alterazione |
|---------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------|------|----------------------|
| Ks | solo per rilascio superficiale | assente, loc. roccia laminata | ondulato levigato | 4-8 | leggermente alterate |
| K1 | solo per rilascio superficiale | assente | ondulato o planare liscio | 6-10 | leggermente alterate |
| K2 | solo per rilascio superficiale | assente | ondulato o planare liscio | 6-10 | leggermente alterate |
| random | solo per rilascio superficiale | assente, loc. roccia laminata | ondulato o planare liscio | - | leggermente alterate |

Tabella 6: Caratteristiche geometrico-geomeccaniche dei sistemi di discontinuità individuati nella stazione R.S.1.

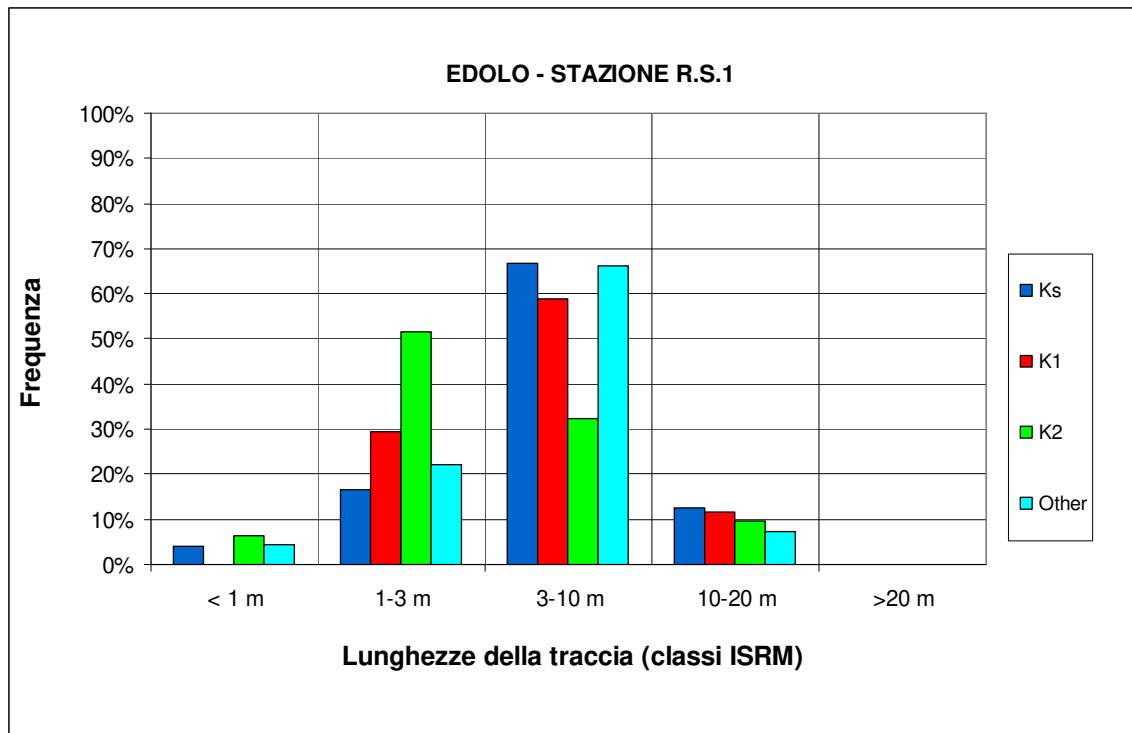


Figura 40: Istogramma delle lunghezze delle tracce campionate nella stazione R.S.1.

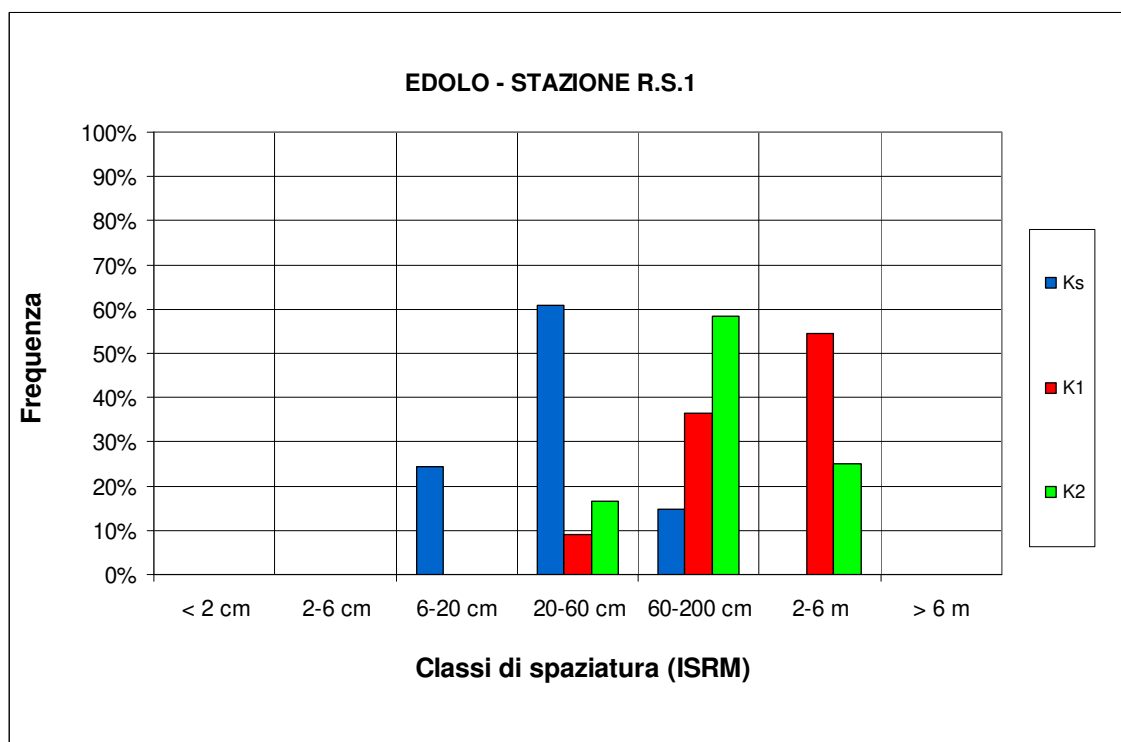


Figura 41: Istogramma delle spaziature campionate nella stazione R.S.1.

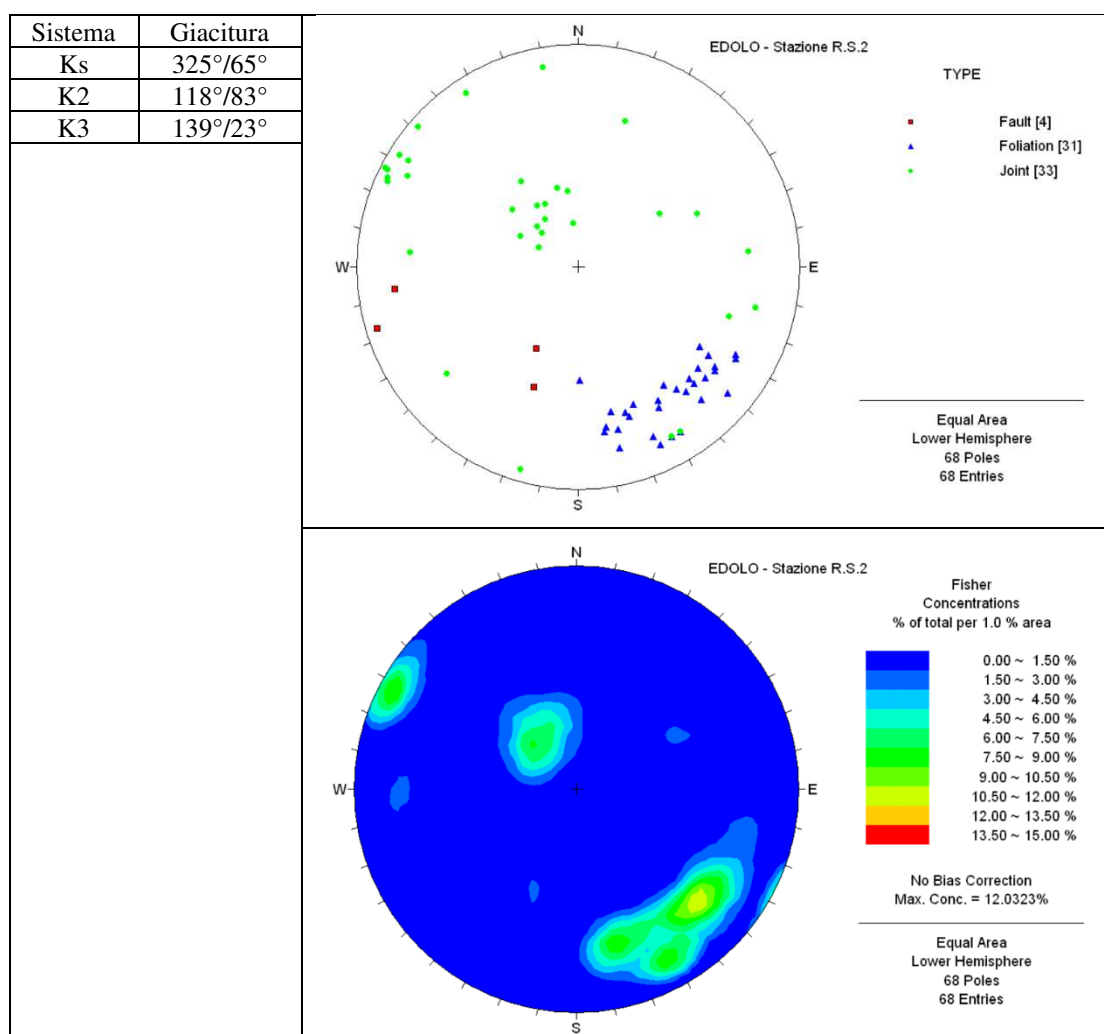
11.1.3 Stazione R.S.2

Affioramento: scarpata stradale artificiale, lunghezza 25 m, altezza variabile da 4 a 8 m, giacitura $303^{\circ}/80^{\circ}$.

Litofacies: micascisti con foliazione prevalentemente ben marcata e ad andamento nel complesso regolare, ma con frequenti pieghe e crenulazioni.

Sistemi di discontinuità: la distribuzione dei poli delle discontinuità avviene secondo tre orientazioni preferenziali, corrispondenti ad altrettanti sistemi (sugli affioramenti investigati il sistema principale K1 non è presente con discontinuità di dimensioni significative). Il sistema principale, denominato Ks, è caratterizzato da una discreta dispersione dei valori giaciturali poiché è quello impostato sulla foliazione (scistosità) e sulle strutture che, a varia scala, la deformano (crenulazioni, fianchi delle micropieghe, lineazioni d'intersezione).

Sono inoltre presenti diverse discontinuità non sistematiche (random).



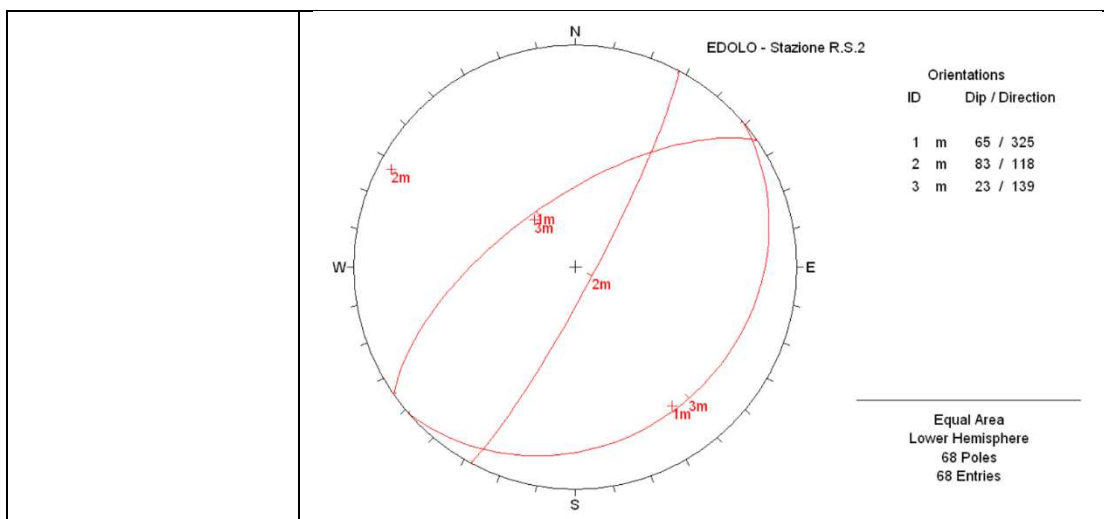


Figura 42: Stereogrammi con riportati i poli di tutti i dati giacaturali campionati nella stazione R.S.2, la loro analisi con le curve di isodensità (contour) e le ciclografiche delle orientazioni preferenziali.

Caratteristiche geometrico-geomeccaniche: nella tabella e negli istogrammi seguenti sono riassunti i dati relativi alle caratteristiche geometrico-geomeccaniche delle discontinuità campionate.

| Sistema | Apertura | Riempimento | Andamento | JRC | Alterazione |
|---------|--------------------------------|-------------------------------|---------------------------|------|----------------------|
| Ks | solo per rilascio superficiale | assente, loc. roccia laminata | ondulato levigato | 4-8 | leggermente alterate |
| K2 | solo per rilascio superficiale | assente | ondulato o planare liscio | 6-10 | leggermente alterate |
| K3 | solo per rilascio superficiale | assente | ondulato o planare liscio | 6-10 | leggermente alterate |
| random | solo per rilascio superficiale | assente, loc. roccia laminata | ondulato o planare liscio | - | leggermente alterate |

Tabella 7: Caratteristiche geometrico-geomeccaniche dei sistemi di discontinuità individuati nella stazione R.S.2.

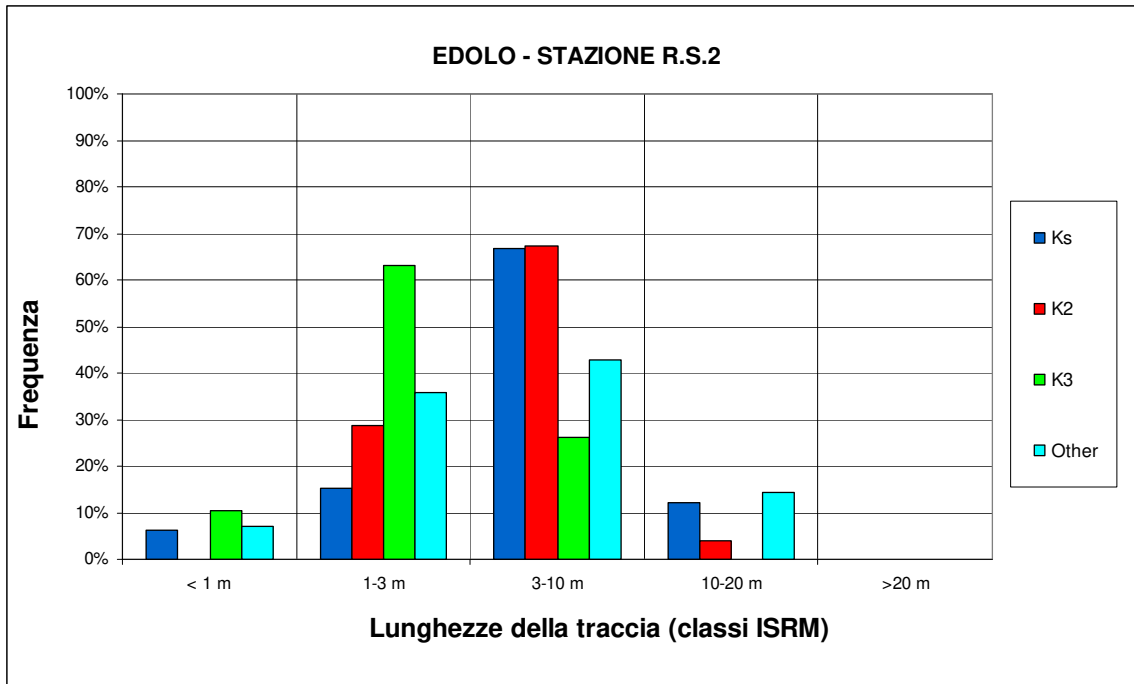


Figura 43: Istogramma delle lunghezze delle tracce campionate nella stazione R.S.2.

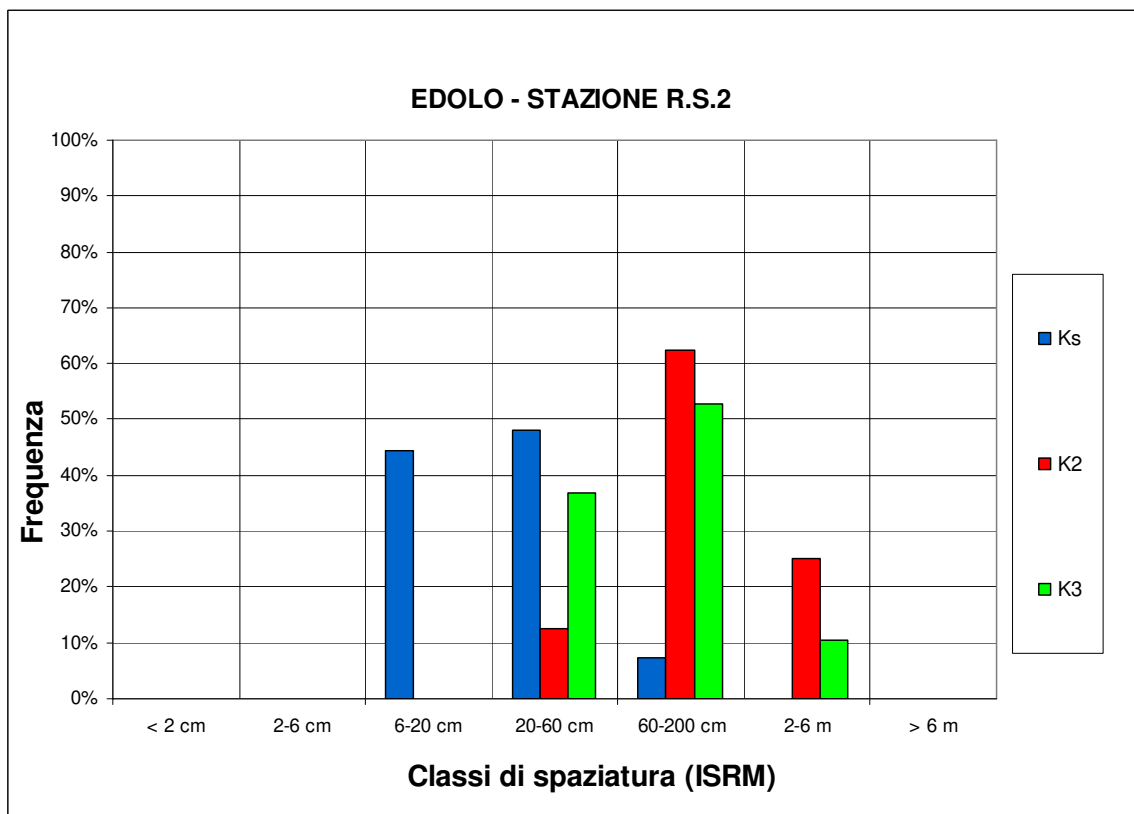


Figura 44: Istogramma delle spaziature campionate nella stazione R.S.2.

11.1.4 Stazione R.S.3

Affioramento: balze rocciose naturali, lunghezza 26 m, altezza variabile da 3 a 6 m, giacitura $135^{\circ}/65^{\circ}$ (Foto 1).

Litofacies: micascisti con foliazione prevalentemente ben marcata e ad andamento molto regolare, solo localmente si osservano pieghe di dimensioni decimetriche.



Foto 1 – Vista su parte degli affioramenti della stazione R.S.3.

Sistemi di discontinuità: la distribuzione dei poli delle discontinuità avviene secondo quattro orientazioni preferenziali, corrispondenti ad altrettanti sistemi. Rispetto a quanto riscontrato nelle precedenti stazioni, il sistema principale Ks, impostato sulla foliazione (scistosità), è caratterizzato da una bassa dispersione dei valori giacitureali poiché l'ammasso roccioso è interessato da un numero limitato di strutture plicative a piccola scala.

Degli altri tre sistemi di discontinuità presenti, solo K1 e K2 sono subortogonali a Ks. È presente un numero limitato di discontinuità non sistematiche (random).

| Sistema | Giacitura |
|---------|--------------------------|
| Ks | $318^{\circ}/51^{\circ}$ |
| K1 | $219^{\circ}/84^{\circ}$ |
| K2 | $127^{\circ}/63^{\circ}$ |
| K4 | $174^{\circ}/83^{\circ}$ |

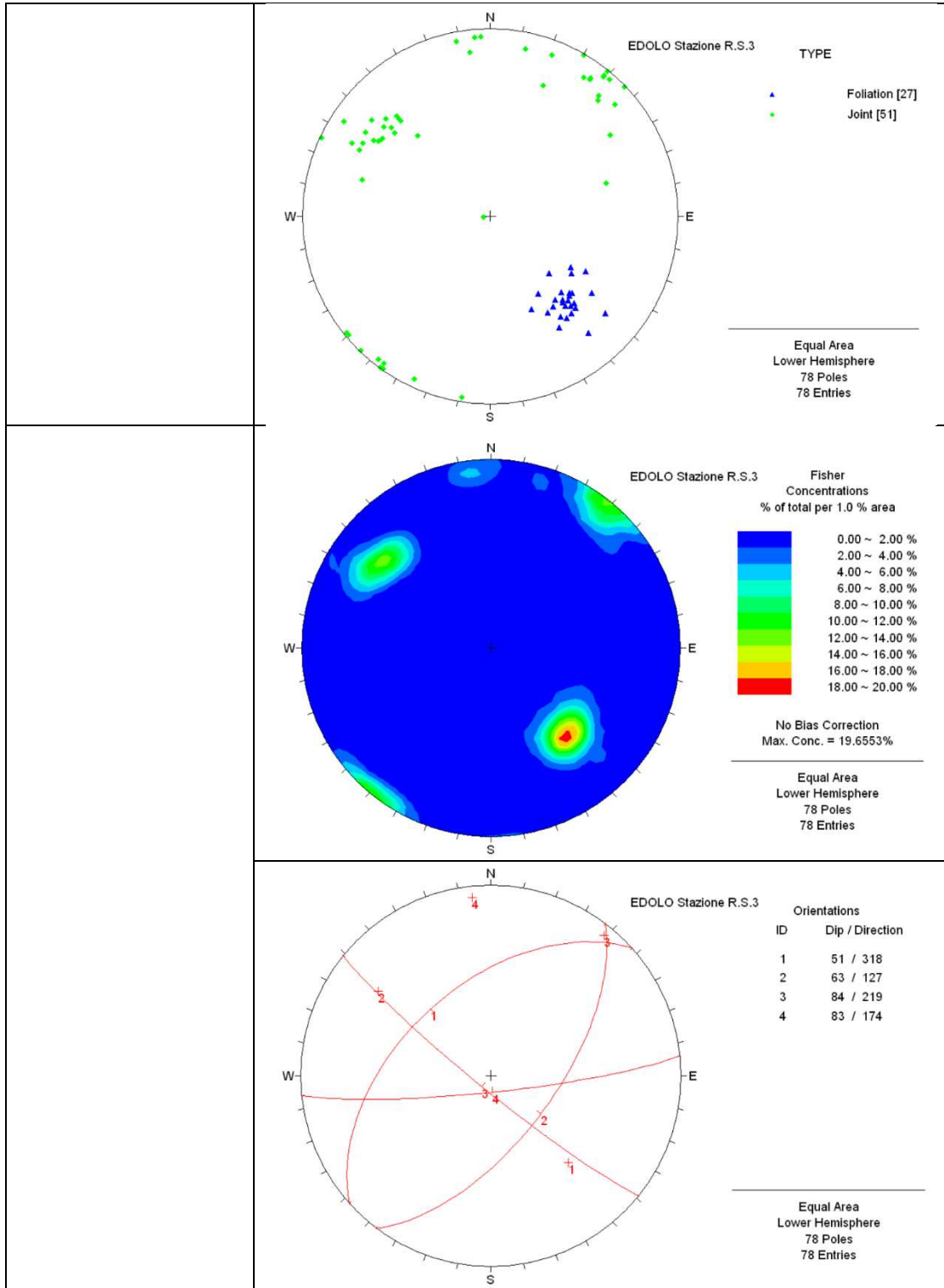


Figura 45: Stereogrammi con riportati i poli di tutti i dati giacaturali campionati nella stazione R.S.3, la loro analisi con le curve di isodensità (contour) e le ciclografiche delle orientazioni preferenziali.

Caratteristiche geometrico-geomeccaniche: nella tabella e negli istogrammi seguenti sono riassunti i dati relativi alle caratteristiche geometrico-geomeccaniche delle discontinuità

campionate.

| Sistema | Apertura | Riempimento | Andamento | JRC | Alterazione |
|---------|--------------------------------|-------------|---------------------------|------|----------------------|
| Ks | solo per rilascio superficiale | assente | ondulato levigato | 6-8 | leggermente alterate |
| K1 | solo per rilascio superficiale | assente | ondulato o planare liscio | 8-10 | leggermente alterate |
| K2 | solo per rilascio superficiale | assente | ondulato o planare liscio | 8-10 | leggermente alterate |
| K4 | solo per rilascio superficiale | assente | ondulato o planare liscio | 8-12 | leggermente alterate |
| random | solo per rilascio superficiale | assente | ondulato o planare liscio | - | leggermente alterate |

Tabella 8: Caratteristiche geometrico-geomeccaniche dei sistemi di discontinuità individuati nella stazione R.S.3.

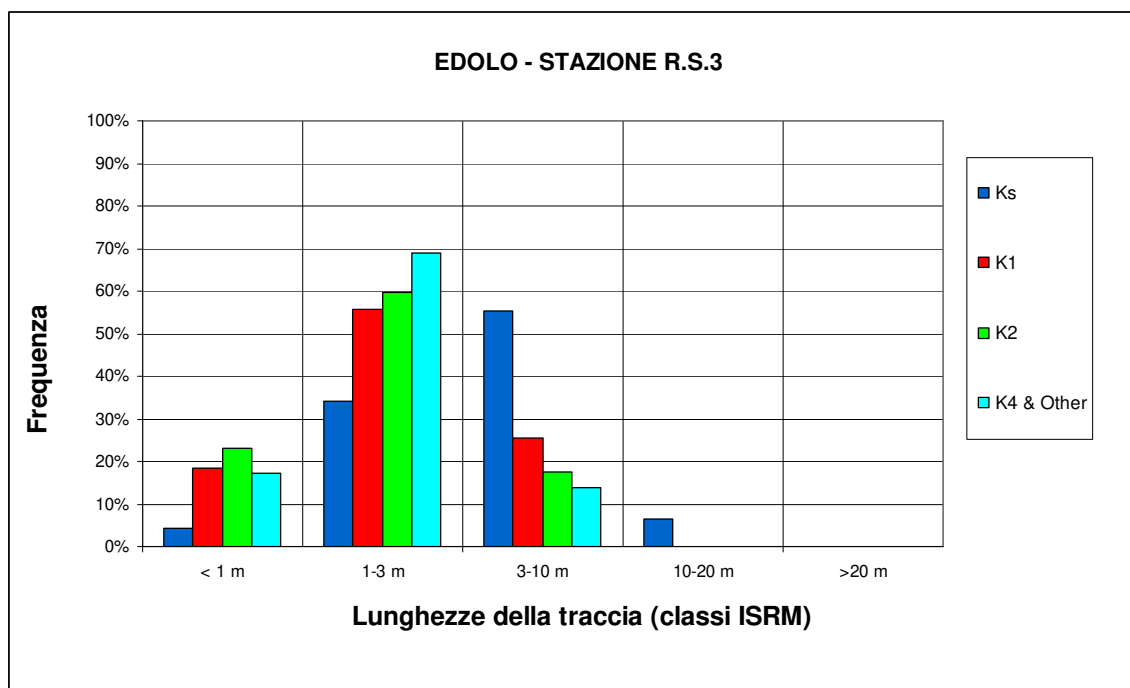


Figura 46: Istogramma delle lunghezze delle tracce campionate nella stazione R.S.3.

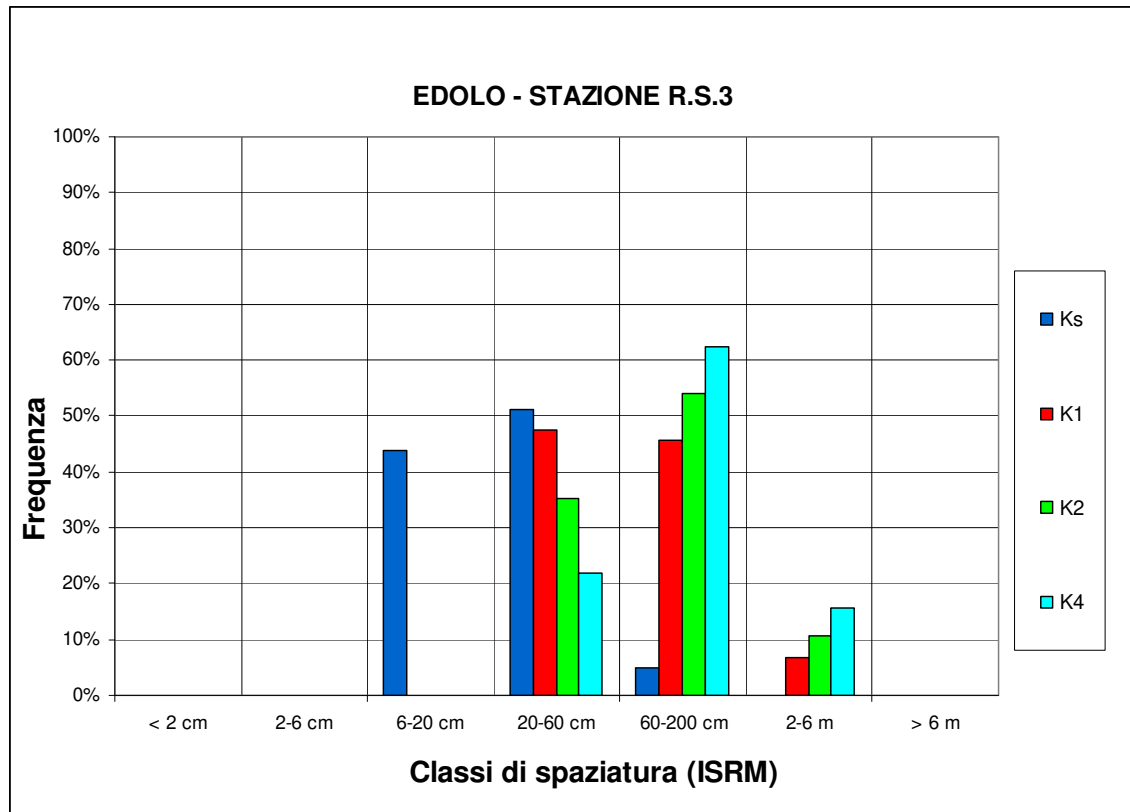


Figura 47: Istogramma delle spaziature campionate nella stazione R.S.3.

11.2 Sondaggi geognostici

Per la caratterizzazione degli ammassi rocciosi, oltre ai dati ricavati dai n.4 sondaggi geognostici realizzati in asse alla galleria (SD04, SD05, SD06, SD07), sono stati utilizzati anche quelli del sondaggio eseguito in prossimità dell'imbocco sud (SD03 PZ), poiché ha interessato il substrato roccioso per un discreto tratto.

Tali sondaggi sono stati oggetto di un'analisi di dettaglio per quanto riguarda la stratigrafia, l'RQD e le condizioni delle discontinuità.

11.2.1 Stratigrafia e condizioni di fratturazione

Sondaggio SD03 PZ

Il sondaggio dal p.c. a -35.00 m di profondità è stato eseguito a carotaggio continuo. Il substrato roccioso è stato intercettato a partire da -11.20 m dal p.c..

Stratigrafia:

| Profondità | Litologia |
|----------------|--|
| 11.20- 35.00 m | Micascisti grigio-plumbei con plaghe e vene di quarzo fino a 8 cm di spessore. Foliazione poco marcata, con andamento variabile ma prevalentemente subverticale o molto inclinata. |

Condizioni delle discontinuità: le fratture presentano tracce di ossidazione e patine argillose sino a -12 m di profondità, per la restante parte del sondaggio non sono alterate, sono prive di

riempimento e sono da lisce a leggermente rugose (JRC variabile da 2-4 a 6-8).

Livello di falda: -7.40 ÷ -7.56 m dal p.c.

RQD: l'andamento dell'indice con la profondità è riportato nella figura seguente.

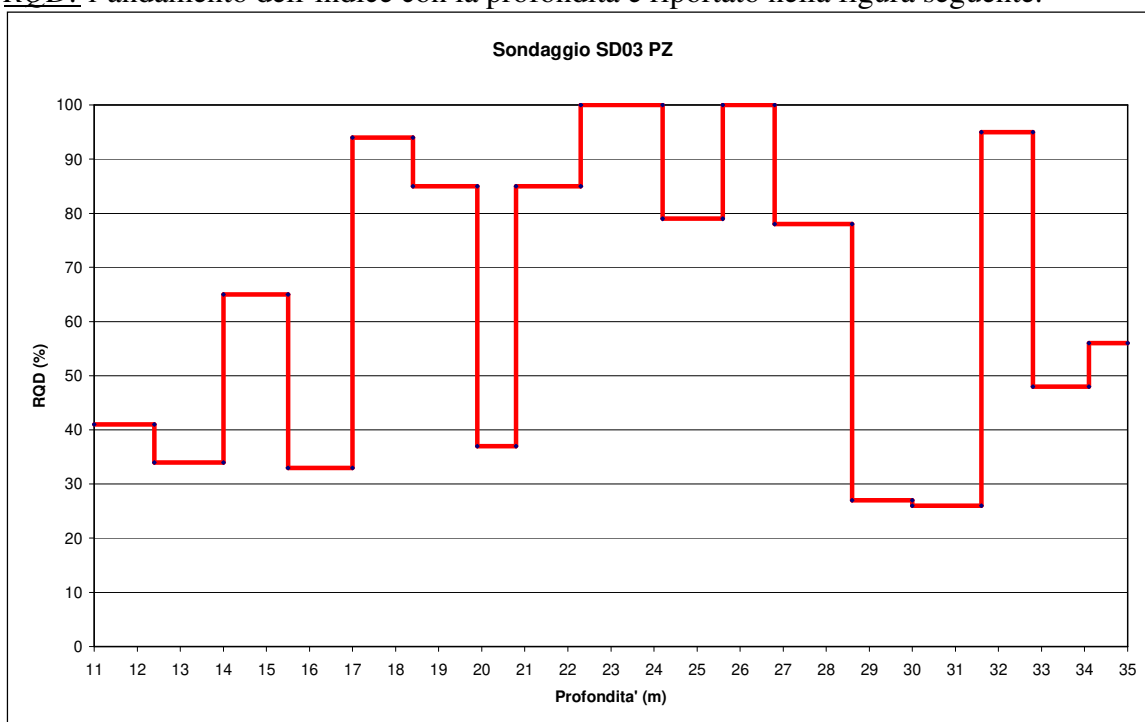


Figura 48: Andamento dell'indice RQD nel sondaggio SD03 PZ.

La suddivisione in classi e la loro distribuzione in termini di frequenza, con il valore medio, il valore medio pesato (in funzione della lunghezza delle singole manovre) e la deviazione standard sono riportati nella figura seguente.

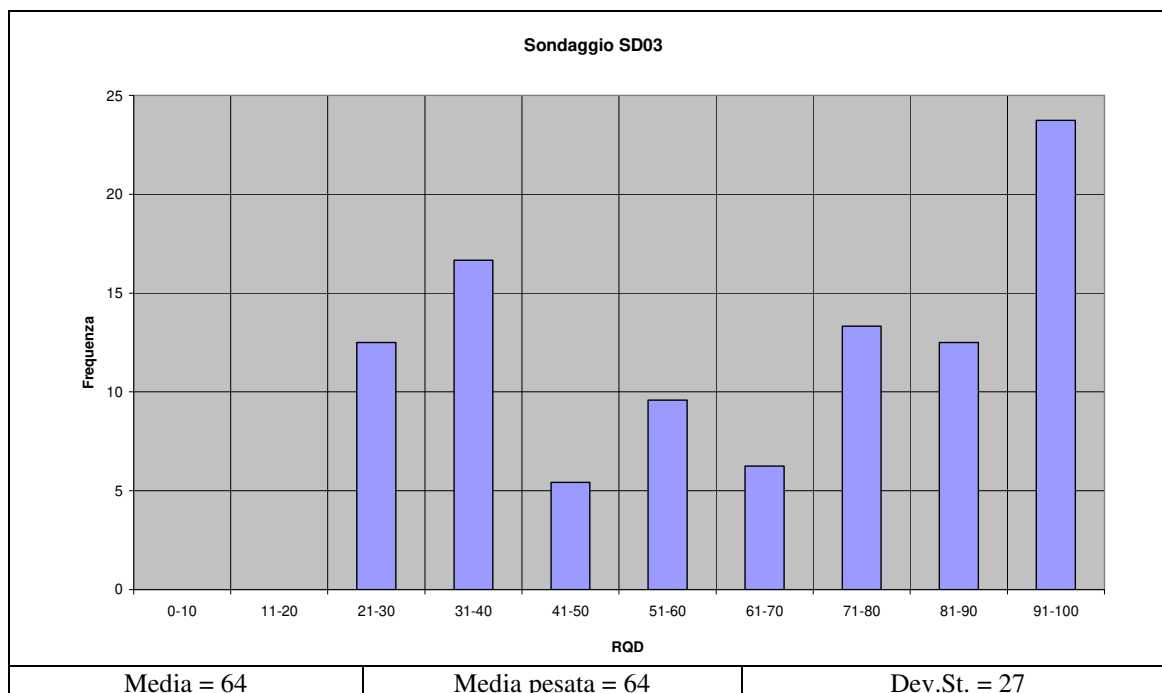


Figura 49: Distribuzione dell'indice RQD nel sondaggio SD03 PZ.

Sondaggio 04

Il sondaggio dal p.c. a -85.00 m di profondità è stato eseguito a distruzione di nucleo, mentre tra -85.00 e -135.00 m a carotaggio continuo. Il substrato roccioso è stato intercettato a partire da -8.60 m dal p.c..

Stratigrafia:

| Profondità | Litologia |
|------------------|---|
| 85.00- 93.00 m | Micascisti grigio-plumbei con una foliazione differenziata e marcata da sottili letti micaceo-cloritici, che si alternano a domini quarzoso-feldspatici. Frequenti plaghe e vene di quarzo fino a 3 cm di spessore. Foliazione generalmente regolare con locali crenulazioni. |
| 93.00- 109.00 m | Micascisti grigio-plumbei con plaghe e vene di quarzo ma con una foliazione meno marcata e ad andamento più irregolare. |
| 109.00- 132.00 m | Micascisti grigio-plumbei con plaghe e vene di quarzo, con una foliazione ben definita dall'alternanza di sottili letti lepidoblastici micaceo-cloritici e letti granoblastici quarzoso-feldspatici. |
| 132.00- 135.00 m | Micascisti filladici grigio-scuri con vene di quarzo, la foliazione è molto ben definita e, localmente, è tagliata da livelli milonitici di colore nerastro. |

Condizioni delle discontinuità: le fratture non sono alterate, sono prive di riempimento e sono da lisce a leggermente rugose (JRC variabile da 2-4 a 6-8).

Livello di falda: - 7.12 m dal p.c..

RQD: l'andamento dell'indice con la profondità è riportato nella figura seguente.

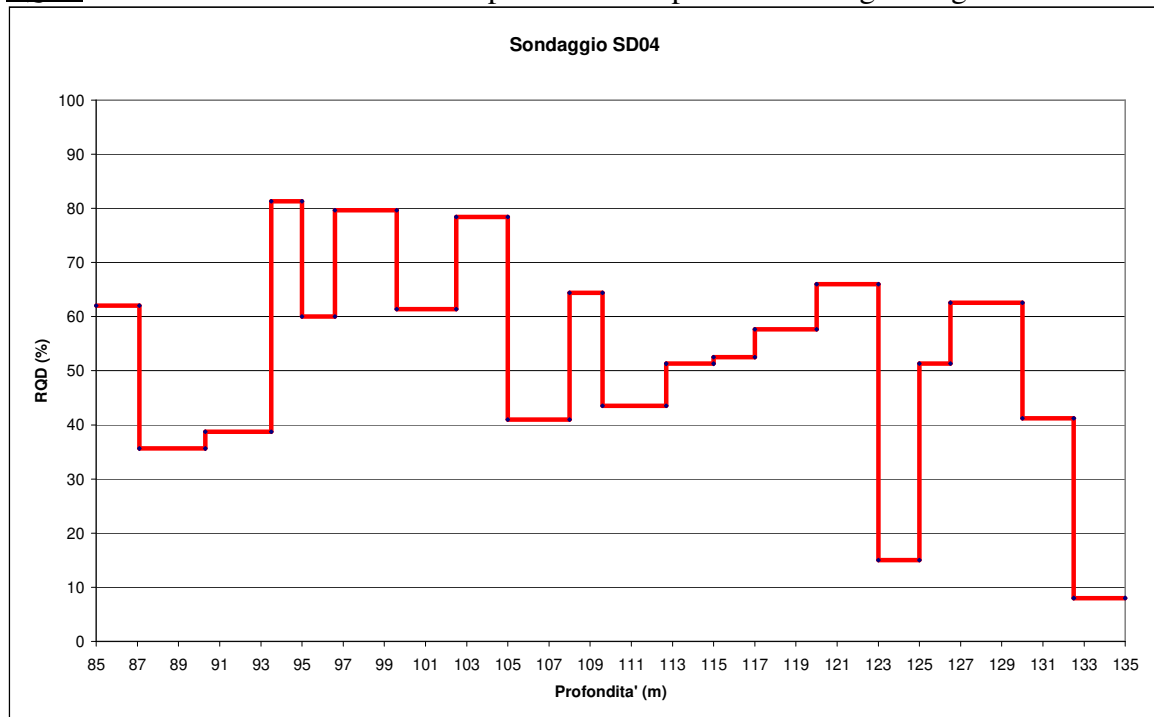


Figura 50: Andamento dell'indice RQD nel sondaggio SD04.

La suddivisione in classi e la loro distribuzione in termini di frequenza, con il valore medio, il valore medio pesato (in funzione della lunghezza delle singole manovre) e la deviazione standard sono riportati nella figura seguente.

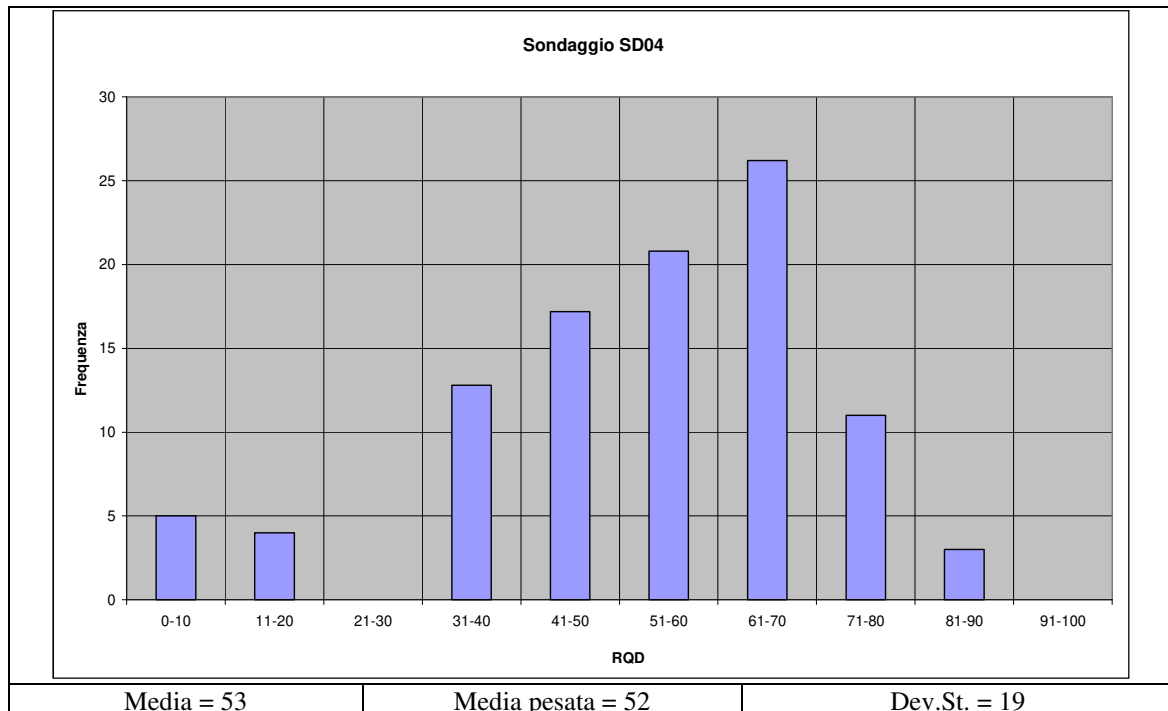


Figura 51: Distribuzione dell'indice RQD nel sondaggio SD04.

Sondaggio 05

Il sondaggio dal p.c. a -70.00 m di profondità è stato eseguito a distruzione di nucleo, mentre tra -70.00 e -120.00 m a carotaggio continuo. Il substrato roccioso è stato intercettato a partire da -8.40 m dal p.c..

Stratigrafia:

| Profondità | Litologia |
|------------------|---|
| 70.00- 78.70 m | Miscisti grigio-plumbei con frequenti plaghe e vene di quarzo fino a 10 cm di spessore. Foliatura poco marcata, prevalentemente molto inclinata ma con locali brusche variazioni dovute a ripiegamenti. |
| 78.70- 86.60 m | Quarzocisti di colore dal grigio al grigio chiaro alternati a miscisti molto ricchi in quarzo. Foliatura poco marcata, prevalentemente molto inclinata ma con locali brusche variazioni dovute a ripiegamenti. |
| 86.60- 94.50 m | Miscisti grigio-plumbei con frequenti plaghe e vene di quarzo fino a 8 cm di spessore. Foliatura poco marcata, prevalentemente molto inclinata ma con locali brusche variazioni dovute a ripiegamenti. |
| 94.50- 99.90 m | Miscisti grigio-plumbei con una foliazione differenziata e marcata da sottili letti micaceo-cloritici, che si alternano a domini quarzoso-feldspatici. Frequenti plaghe e vene di quarzo fino a 3 cm di spessore. Foliatura ben evidente, prevalentemente molto inclinata ma con locali brusche variazioni dovute a ripiegamenti. |
| 99.90- 117.10 m | Miscisti grigio-plumbei con frequenti plaghe e vene di quarzo fino a 10 cm di spessore. Foliatura poco marcata, prevalentemente molto inclinata ma con locali brusche variazioni dovute a ripiegamenti. |
| 117.10- 118.70 m | Miscisti grigio-plumbei con una foliazione differenziata e marcata da sottili letti micaceo-cloritici, che si alternano a domini quarzoso-feldspatici. Frequenti plaghe e vene di quarzo fino a 2 cm di spessore. Foliatura ben evidente, prevalentemente molto inclinata ma con locali brusche variazioni dovute a ripiegamenti. |

| | |
|------------------|---|
| 118.70- 120.00 m | Miscisti grigio-plumbei con frequenti plaghe e vene di quarzo fino a 3 cm di spessore. Foliazione poco marcata, prevalentemente molto inclinata ma con locali brusche variazioni dovute a ripiegamenti. |
|------------------|---|

Condizioni delle discontinuità: le fratture non sono alterate, sono prive di riempimento e sono da lisce a leggermente rugose (JRC variabile da 2-4 a 6-8).

Livello di falda: - 3.65 m dal p.c..

RQD: l'andamento dell'indice con la profondità è riportato nella figura seguente.

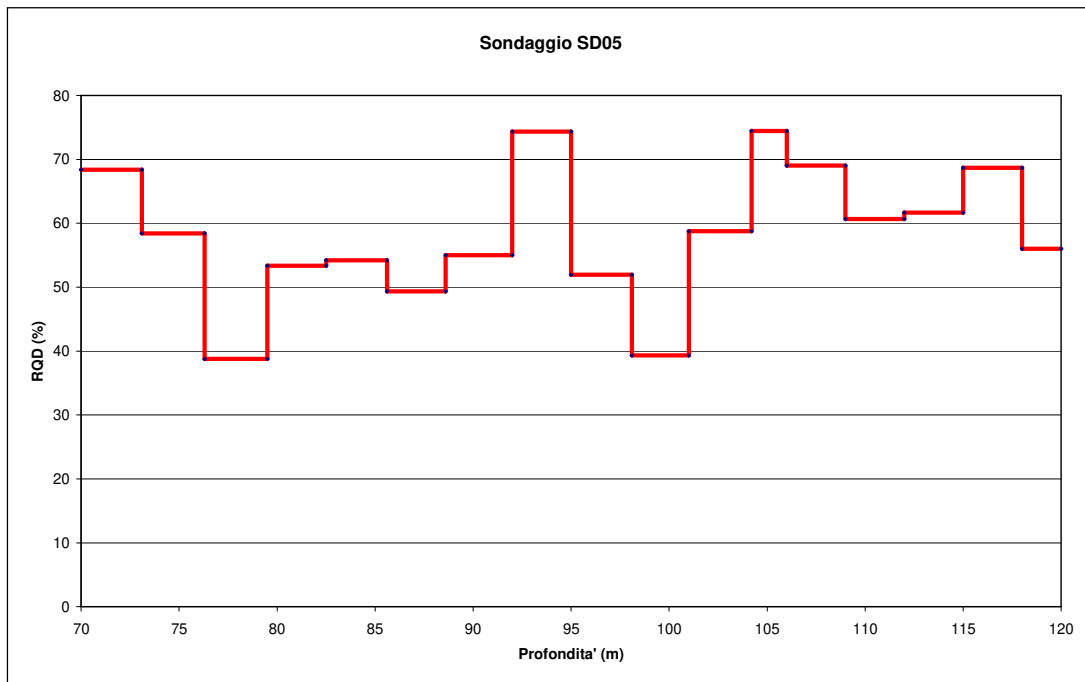


Figura 52: Andamento dell'indice RQD nel sondaggio SD05.

La suddivisione in classi e la loro distribuzione in termini di frequenza, con il valore medio, il valore medio pesato (in funzione della lunghezza delle singole manovre) e la deviazione standard sono riportati nella figura seguente.

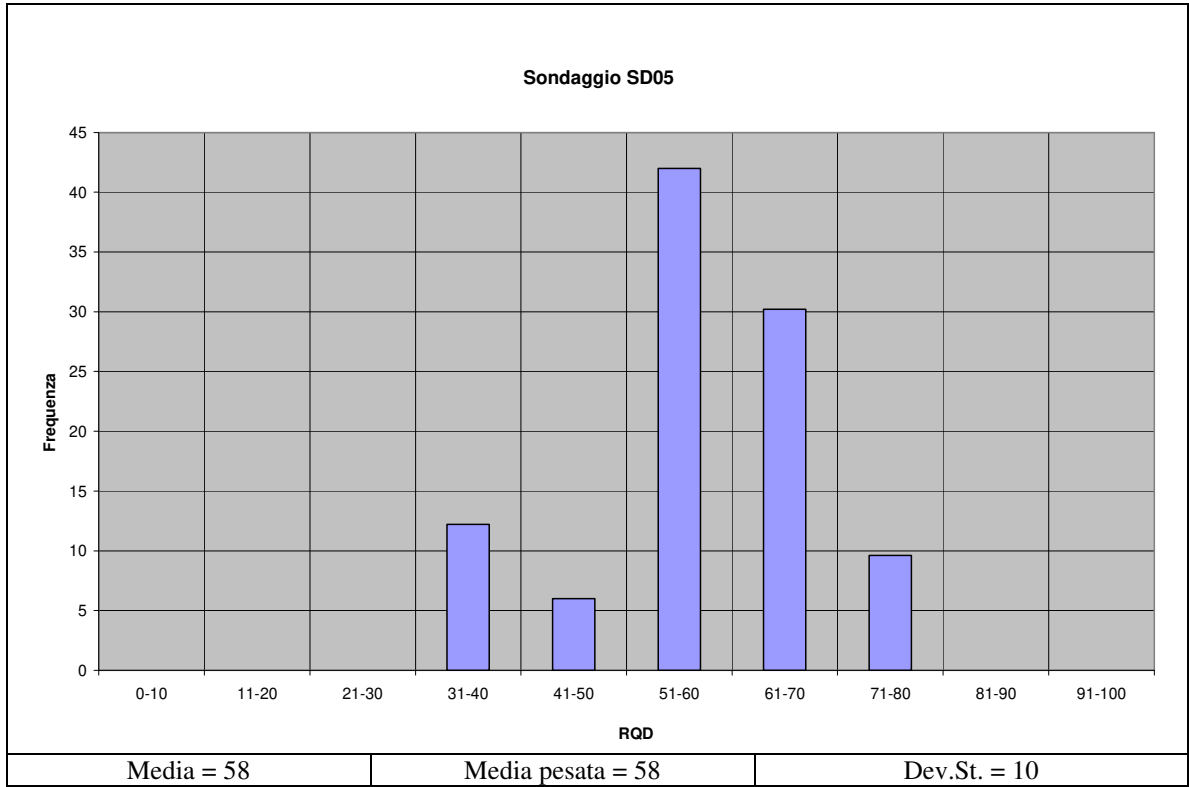


Figura 53: Distribuzione dell'indice RQD nel sondaggio SD05.

Sondaggio 06

Il sondaggio dal p.c. a -75.00 m di profondità è stato eseguito a distruzione di nucleo, mentre tra -75.00 e -125.00 m a carotaggio continuo. Il substrato roccioso è stato intercettato a partire da -38.40 m dal p.c..

Stratigrafia:

| Profondità | Litologia |
|------------------|--|
| 75.00- 78.00 m | Micascisti grigio-plumbei con plaghe e vene di quarzo fino a 3 cm di spessore. Foliazione poco marcata, con andamento regolare (solo locali crenulazioni). |
| 78.00- 80.40 m | Micascisti grigio-plumbei con una foliazione differenziata e marcata da sottili letti micaceo-cloritici, che si alternano a domini quarzoso-feldspatici. Foliazione ad andamento variabile per frequenti crenulazioni. |
| 80.40- 81.00 m | Quarzoscisti grigi con foliazione ripiegata. |
| 81.00- 83.30 m | Micascisti grigio-plumbei con plaghe e vene di quarzo. Foliazione poco marcata, con andamento irregolare per pieghe e crenulazioni. |
| 83.30- 84.60 m | Quarziti di colore da biancastro a verde chiaro, con tessitura prevalente massiva, granoblastica, solo a tratti si riconosce una debole foliazione. |
| 84.60- 85.00 m | Micascisti grigio-plumbei con plaghe e vene di quarzo. Foliazione poco marcata e ad andamento variabile con andamento irregolare per pieghe e crenulazioni. |
| 85.00- 90.50 m | Quarzoscisti grigio chiari alternati a quarziti a tessitura massiva. |
| 90.50- 93.40 m | Micascisti grigio-plumbei con una foliazione differenziata e marcata da sottili letti micaceo-cloritici, che si alternano a domini quarzoso-feldspatici. Foliazione ad andamento variabile per frequenti crenulazioni. |
| 93.40- 93.80 m | Micascisti filladici da grigio-scuri a neri, con vene di quarzo, la foliazione è molto ben definita. |
| 93.80- 97.40 m | Micascisti grigio-plumbei con plaghe e vene di quarzo. Foliazione poco marcata ad andamento prevalentemente subverticale. |
| 97.40- 100.10 m | Micascisti grigio-plumbei con una foliazione differenziata e marcata da sottili letti micaceo-cloritici, che si alternano a domini quarzoso-feldspatici. Foliazione ad andamento variabile per frequenti pieghe e crenulazioni. |
| 100.10- 101.80 m | Micascisti grigio-plumbei con una foliazione ben marcata, alternati a micascisti filladici da grigio-scuri a neri. |
| 101.80- 107.70 m | Quarziti di colore biancastro, a tessitura massiva, alternate a quarzoscisti grigio chiari. |
| 107.70- 112.40 m | Metabasite di colore verde scuro e grana finissima, con ocelli albitici millimetrici e debole foliazione. |
| 112.40- 125.00 m | Micascisti grigio-plumbei con plaghe e vene di quarzo e foliazione poco marcata, con andamento variabile per frequenti pieghe e crenulazioni. Presenza di orizzonti decimetrici con foliazione ben marcata e livelli centimetrici di micascisti filladici. |

Condizioni delle discontinuità: le fratture non sono alterate, sono prive di riempimento e sono da lisce a leggermente rugose (JRC variabile da 2-4 a 6-8)

Livello di falda: - 15.8 m dal p.c.

ROD: l'andamento dell'indice con la profondità è riportato nella figura seguente.

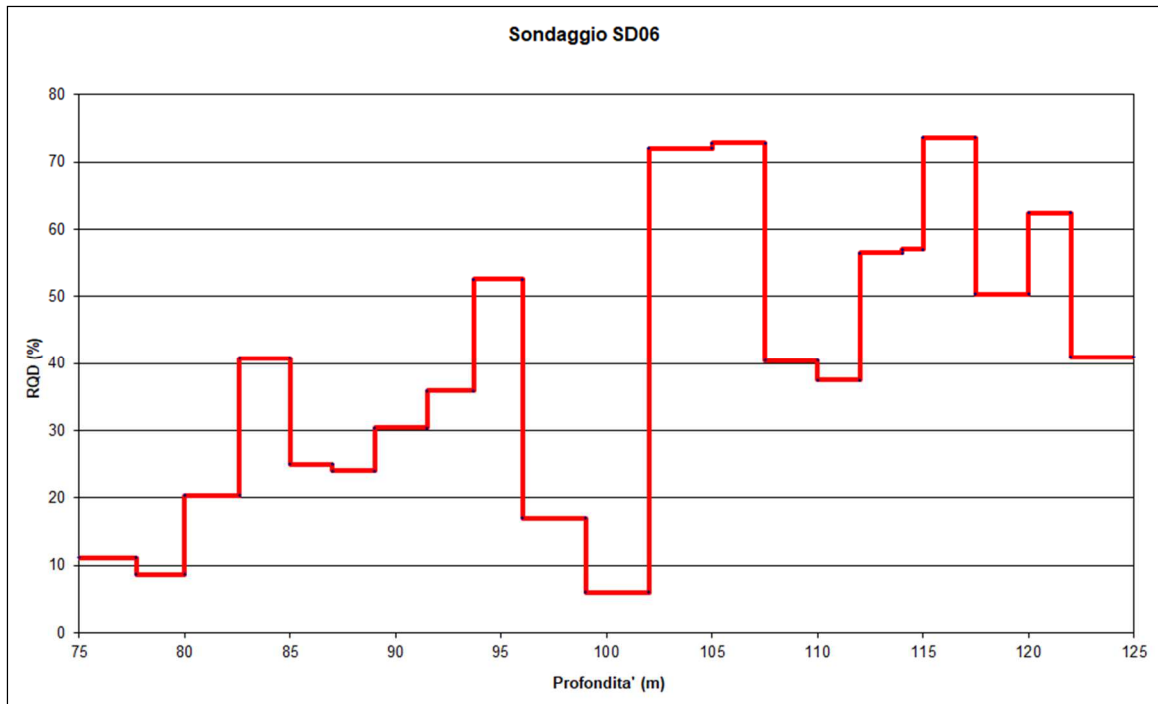


Figura 54: Andamento dell'indice RQD nel sondaggio SD06.

La suddivisione in classi e la loro distribuzione in termini di frequenza, con il valore medio, il valore medio pesato (in funzione della lunghezza delle singole manovre) e la deviazione standard sono riportati nella figura seguente.

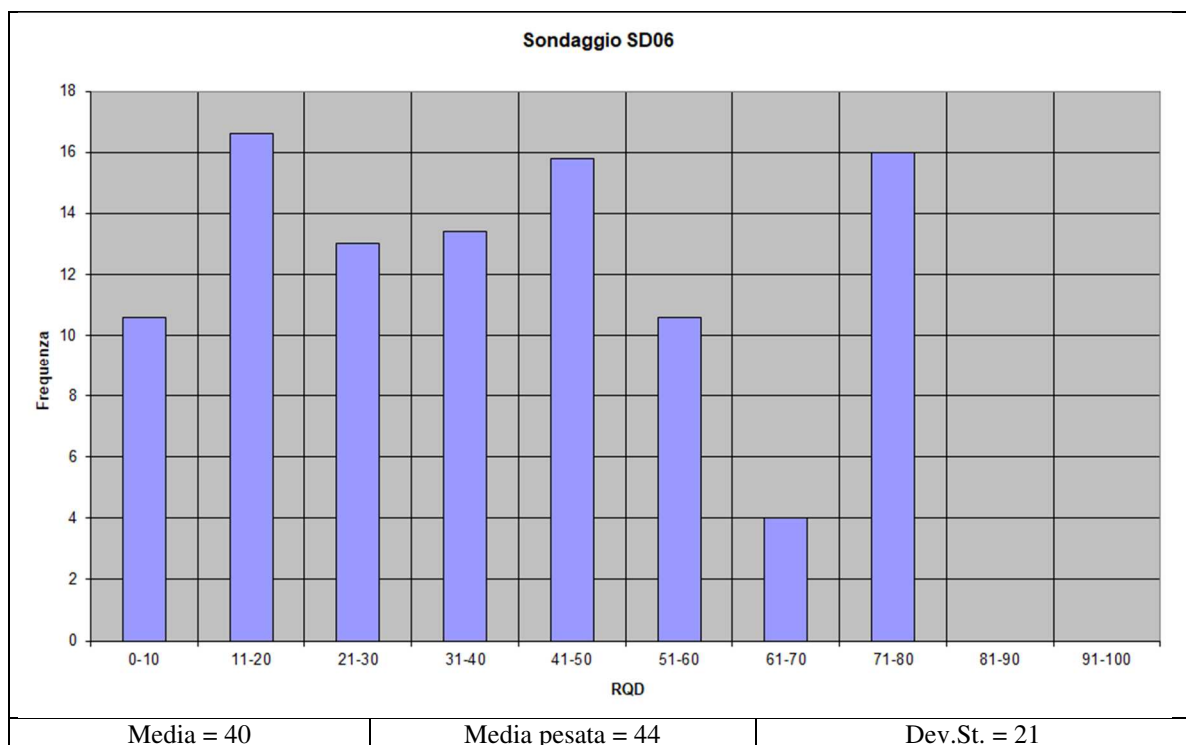


Figura 55: Distribuzione dell'indice RQD nel sondaggio SD06.

Sondaggio 07

Il sondaggio dal p.c. a -60.00 m di profondità è stato eseguito a distruzione di nucleo, mentre tra -60.00 e -105.50 m a carotaggio continuo. Il substrato roccioso è stato intercettato a partire da -7.80 m dal p.c..

Stratigrafia:

| Profondità | Litologia |
|------------------|---|
| 60.00- 67.30 m | Micascisti grigio-plumbei con plaghe e vene di quarzo fino a 4 cm di spessore. Foliazione poco marcata (solo a tratti ben evidente), con andamento prevalentemente regolare (solo locali pieghe evidenziate dall'andamento delle vene di quarzo). |
| 67.30- 81.10 m | Micascisti del tutto simili ai precedenti ma con andamento della foliazione molto irregolare per frequenti pieghe. Tra 79.00÷79.90 e 80.00÷81.00 sono presenti discontinuità tettoniche subverticali con riempimento cataclastico non coesivo di spessore millimetrico. |
| 81.10- 84.40 m | Micascisti grigio-plumbei con plaghe e vene di quarzo fino a 2 cm di spessore. Foliazione poco marcata con andamento prevalentemente regolare (solo locali pieghe). |
| 84.40- 97.70 m | Micascisti del tutto simili ai precedenti ma con andamento della foliazione più irregolare per frequenti pieghe, e con diversi tratti in cui la stessa è subverticale. |
| 97.70- 98.30 m | Quarzoscisti grigio chiari. |
| 98.30- 100.60 m | Micascisti grigio-plumbei con plaghe e vene di quarzo. Foliazione poco marcata e ad andamento con andamento prevalentemente regolare (subverticale) |
| 100.60- 102.50 m | Metabasite di colore nero-verde molto scuro, debolmente foliata. |
| 102.50- 104.40 m | Metabasite di colore nero-verde molto scuro e grana finissima, non foliata. |
| 104.40- 105.30 m | Micascisti grigio-plumbei con plaghe e vene di quarzo fino a 10 cm di spessore. Foliazione poco marcata. |
| 105.30- 107.60 m | Metabasite di colore nero-verde molto scuro e grana finissima, non foliata. |
| 107.60- 108.50 m | Micascisti grigio-plumbei con plaghe e vene di quarzo fino a 3 cm di spessore. Foliazione poco marcata (solo a tratti ben evidente), con andamento irregolare. |
| 108.50- 109.50 m | Metabasite di colore nero-verde molto scuro e grana finissima, da massiva a debolmente foliata. |
| 109.50- 110.50 m | Micascisti grigio-plumbei con plaghe e vene di quarzo fino a 3 cm di spessore. Foliazione poco marcata (solo a tratti ben evidente), con andamento irregolare. |

Condizioni delle discontinuità: le fratture non sono alterate, sono prive di riempimento e sono da lisce a leggermente rugose (JRC variabile da 2-4 a 6-8). Fanno eccezione i due piani di taglio tra 79.00÷79.90 e 80.00÷81.00, con riempimento cataclastico non coesivo di spessore millimetrico.

Livello di falda: - 7.42 m dal p.c.

RQD: l'andamento dell'indice con la profondità è riportato nella figura seguente.

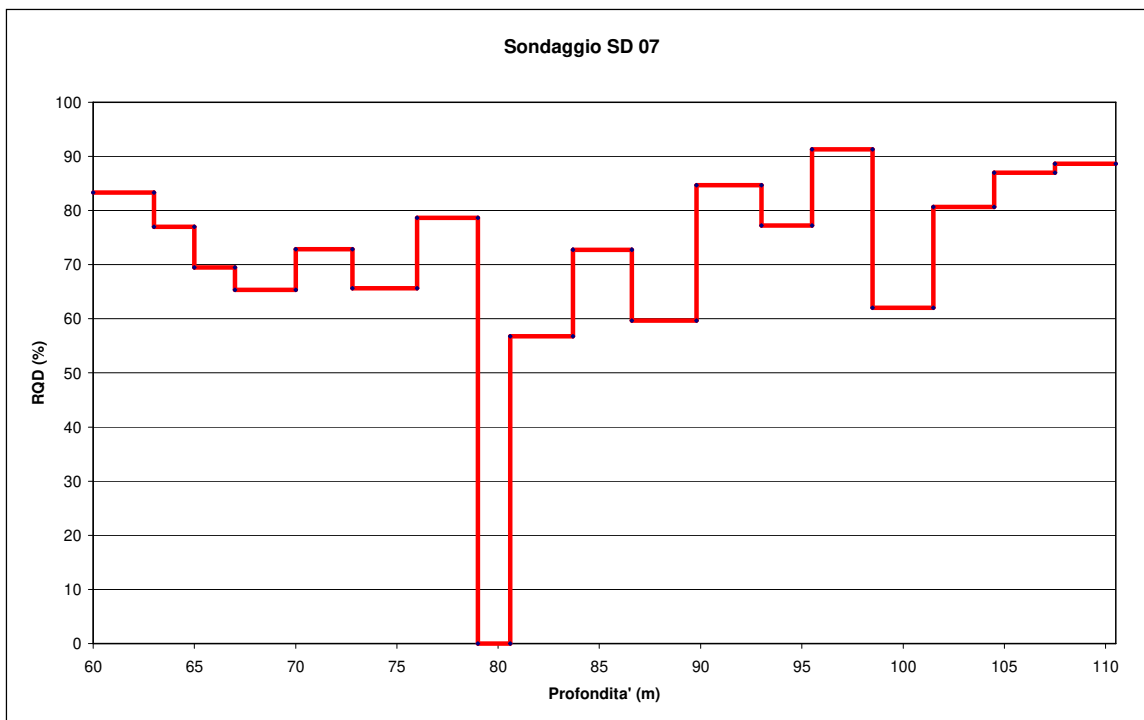


Figura 56: Andamento dell'indice RQD nel sondaggio SD07.

La suddivisione in classi e la loro distribuzione in termini di frequenza, con il valore medio, il valore medio pesato (in funzione della lunghezza delle singole manovre) e la deviazione standard sono riportati nella figura seguente.

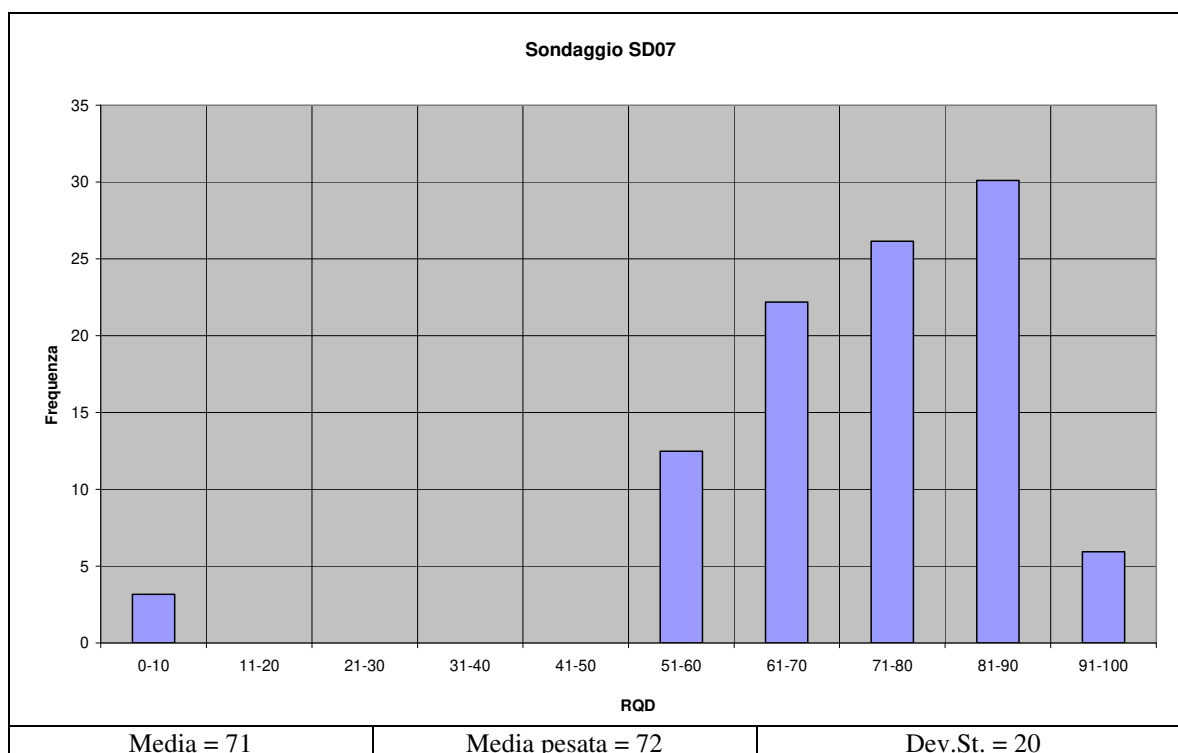


Figura 57: Distribuzione dell'indice RQD nel sondaggio SD07.

11.2.2 Litofacies

Attraverso l'analisi stratigrafica di dettaglio delle casse dei sondaggi geognostici SD03-PZ, SD04, SD05, SD06 e SD07 sono state individuate cinque diverse litofacies, la cui frequenza è riportata in Figura 58 :

1. micascisti di colore grigio con foliazione poco marcata (62.2%);
2. micascisti di colore grigio con foliazione ben evidente (20.5%);
3. micascisti filladici di colore grigio molto scuro o nero (2.3%);
4. quarziti e quarzoscisti di colore dal bianco al grigio chiaro (le due litofacies non sono discriminabili poiché sfumano l'una nell'altra molto gradualmente) (9.7%);
5. metabasiti di colore verde molto scuro sia massive che debolmente foliate (5.3%).

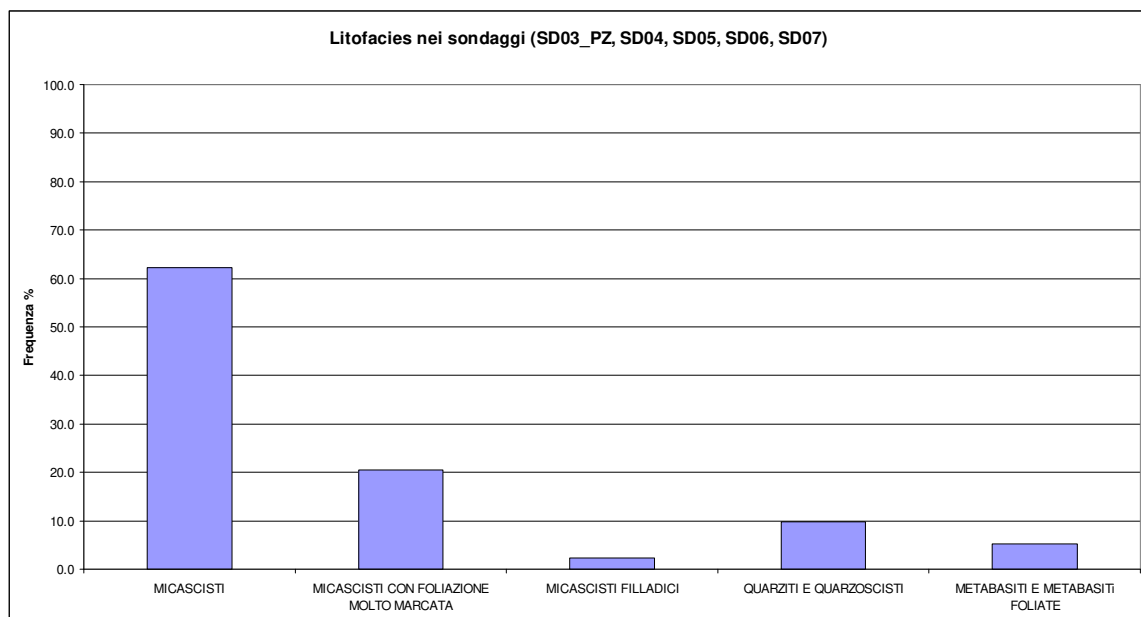


Figura 58: Frequenza delle litofacies definite con l'analisi stratigrafica di dettaglio nei tratti di sondaggio eseguiti a carotaggio continuo.

La transizione tra micascisti con foliazione più o meno marcata è anch'essa molto graduale e, talora, le due tipologie si alternano ripetutamente, con la predominanza ora dell'una, ora dell'altra. Le prove di laboratorio (resistenza alla compressione monoassiale, triassiale, trazione indiretta, peso di volume) non hanno evidenziato alcuna differenza di comportamento geomeccanico tra le due tipologie tessiturali, pertanto le si considerano come un'unica litofacies.

I micascisti, pertanto, costituiscono l'82.7 % degli ammassi rocciosi investigati dai sondaggi a carotaggio continuo, mentre il 9.7 % è costituito da quarziti ed i quarzoscisti, il 5.3% da metabasiti (sia massive che foliate) ed il 2.3 % da micascisti filladici (Figura 59).

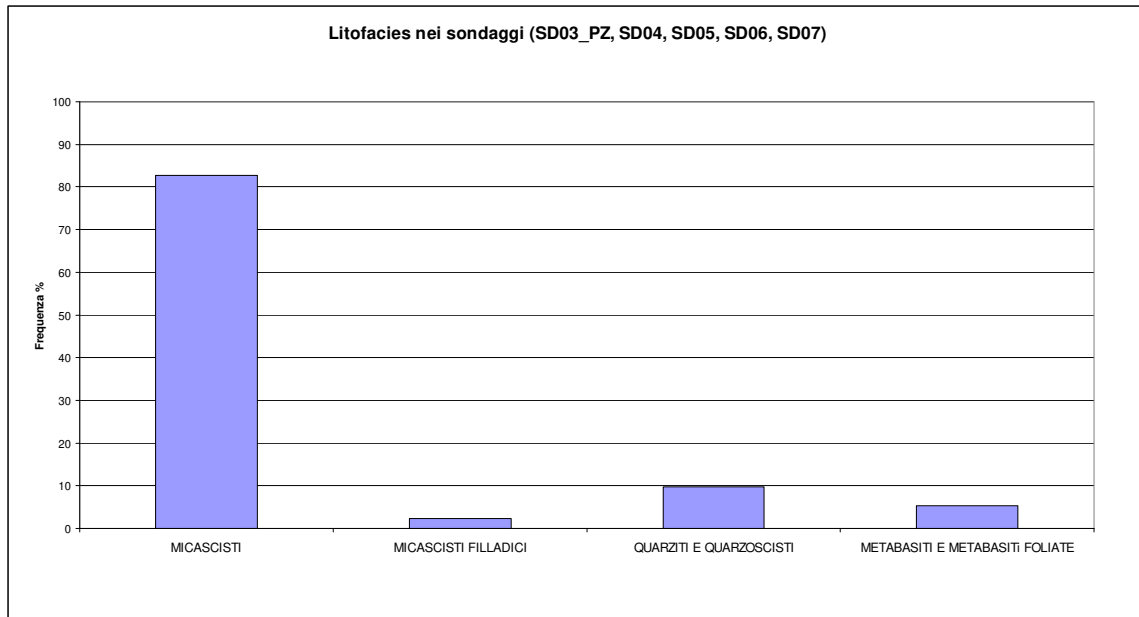


Figura 59: Frequenza delle litofacies a comportamento geomeccanico simile.

11.3 Indagini in foro

Nei fori di sondaggio realizzati per la caratterizzazione degli ammassi rocciosi sono stati eseguiti log ottici, acustici e sonici, prove dilatometriche e di permeabilità (Lugeon). Di seguito si riassumono i risultati di tali indagini.

11.3.1 Log ottici, acustici e sonici

L'ispezione con sonda ottica è stata eseguita unicamente nel foro di sondaggio SD04, l'unico con acqua non torbida che consentiva la visione diretta della parete. Negli altri fori le discontinuità sono state rilevate tramite ispezione con sonda acustica.

Sondaggio SD04

L'analisi dei dati giacaturali delle discontinuità rilevate (Figura 60) ha evidenziato la presenza di tre orientazioni preferenziali. Due di queste ($300^{\circ}/60^{\circ}$ e $340^{\circ}/45^{\circ}$) sono determinate dalle discontinuità impostate sulla foliazione (scistosità) e sulle strutture che la deformano (crenulazioni, fianchi delle micropieghe, lineazioni d'intersezione) ed entrambe corrispondono al sistema principale denominato Ks nei rilievi geostrutturali eseguiti su affioramenti. L'altra orientazione preferenziale ($160^{\circ}/55^{\circ}$), invece, non è stata riscontrata in affioramento.

Il log sonico indica che, nel complesso, l'ammasso roccioso risulta poco fratturato: le velocità delle onde S variano da 1447 a 1603 m/s, mentre le onde P variano da 4947 a 5952 m/s.

Sondaggio SD05

L'analisi dei dati giacaturali delle discontinuità rilevate (Figura 61) ha evidenziato la presenza di due orientazioni preferenziali. La più frequente ($300^{\circ}/60^{\circ} \div 65^{\circ}$) è sempre quella definita dalle discontinuità impostate sulla foliazione e sulle strutture che la deformano (sistema Ks). L'altra orientazione ($120^{\circ}/50^{\circ}$), peraltro definita da un numero di discontinuità limitato e con valori di giacitura discretamente dispersi, non è stata riscontrata in affioramento.

Il log sonico indica che, nel complesso, l'ammasso roccioso risulta poco fratturato: le velocità

delle onde S variano da 1400 a 1638 m/s, mentre le onde P variano da 4447 a 5923 m/s.

Sondaggio SD06

L'analisi dei dati giacitureali delle discontinuità rilevate (Figura 61) ha evidenziato la presenza di tre orientazioni preferenziali. La più frequente ($290^{\circ}/60^{\circ}$) è sempre quella definita dalle discontinuità impostate sulla foliazione e sulle strutture che la deformano (sistema Ks). La seconda in ordine di frequenza ($130^{\circ}/60^{\circ}$) trova corrispondenza nel sistema K2 individuato con i rilievi in affioramento, mentre la terza orientazione ($200^{\circ}/40^{\circ}$) non è stata riscontrata in affioramento.

Il log sonico indica che, nel complesso, l'ammasso roccioso risulta poco fratturato: le velocità delle onde S variano da 1447 a 1603 m/s, mentre le onde P variano da 4338 a 6416 m/s.

Sondaggio SD07

L'analisi dei dati giacitureali delle discontinuità rilevate (Figura 63) ha evidenziato la presenza di due orientazioni preferenziali. La più frequente è caratterizzata da una marcata dispersione dei valori giacitureali, in particolare di quelli d'immersione ($300^{\circ}\div 330^{\circ}/60^{\circ}$) ed è sempre quella definita dalle discontinuità impostate sulla foliazione e sulle strutture che la deformano (sistema Ks). L'altra orientazione ($130^{\circ}/60^{\circ}$), peraltro definita da un numero di discontinuità limitato, trova corrispondenza nel sistema K2 individuato con i rilievi in affioramento.

Il log sonico indica che, nel complesso, l'ammasso roccioso risulta poco fratturato: le velocità delle onde S variano da 1482 a 2113 m/s, mentre le onde P variano da 3310 a 6777 m/s.

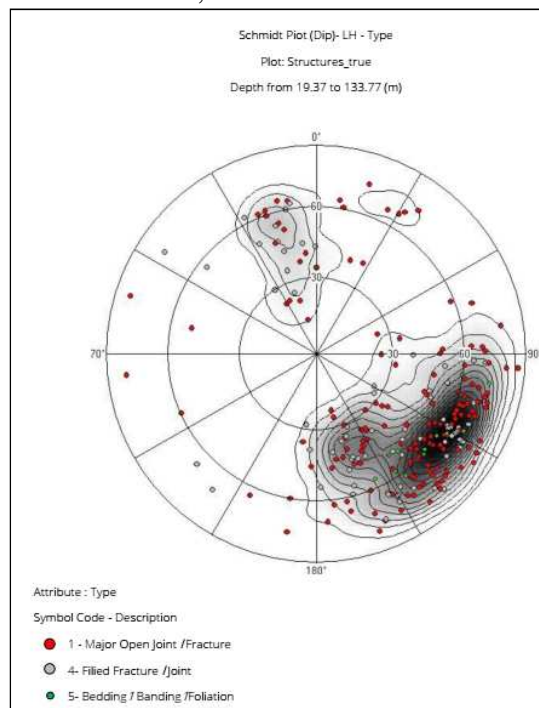


Figura 60: Stereogramma con riportati i poli di tutti i dati giacitureali e le curve di isodensità ricavati con il log ottico nel sondaggio SD04.

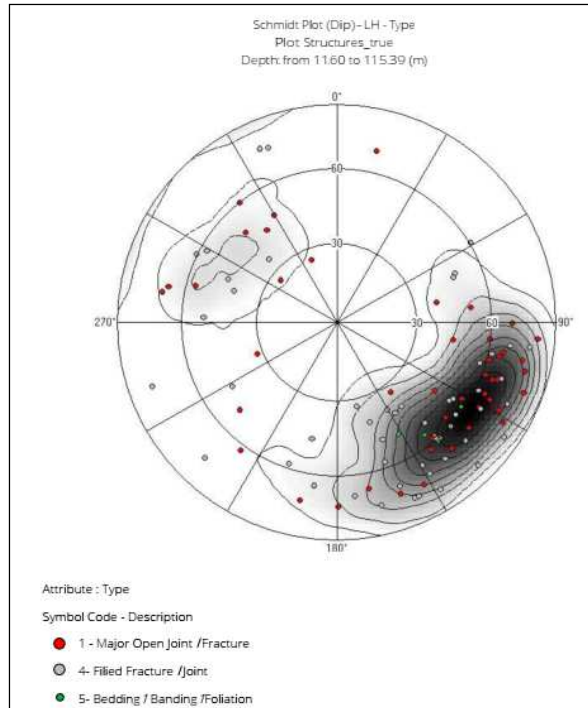


Figura 61: Stereogramma con riportati i poli di tutti i dati giacitureali e le curve di isodensità ricavati con il log acustico nel sondaggio SD05.

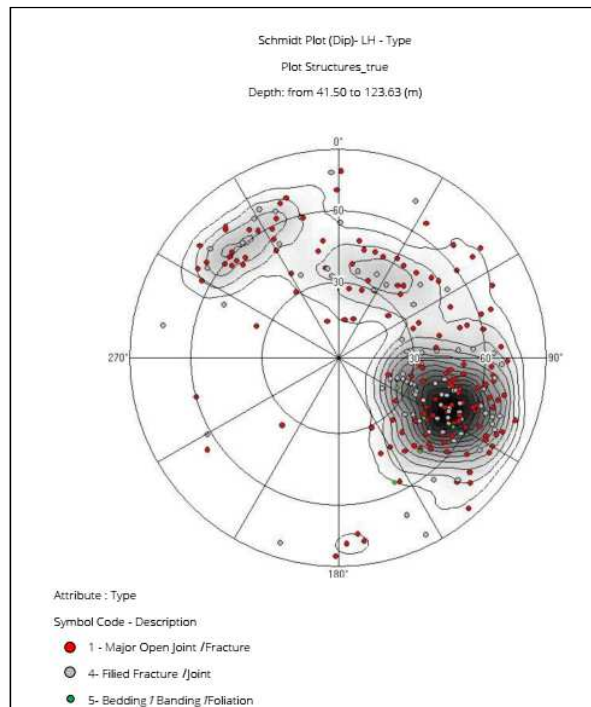


Figura 62: Stereogramma con riportati i poli di tutti i dati giacitureali e le curve di isodensità ricavati con il log acustico nel sondaggio SD06.

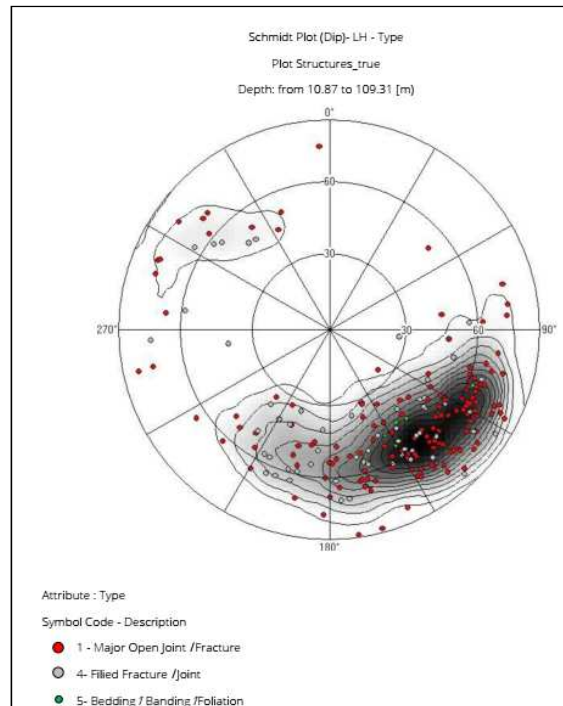


Figura 63: Stereogramma con riportati i poli di tutti i dati giacitureali e le curve di isodensità ricavati con il log acustico nel sondaggio SD07.

11.3.2 Prove dilatometriche DRT

I valori dei moduli ottenuti con le prove dilatometriche sono sintetizzati in Tabella 9, dove sono riportati anche la percentuale di recupero modificato (RQD) e la litofacies che costituisce il volume roccioso investigato.

Per quanto riguarda il modulo di elasticità E_y , nei tratti di ammasso costituiti da micascisti la variabilità dei dati è molto elevata ($1.7 \div 26$ GPa), con un valore medio pari a 9.9 GPa, di circa quattro volte inferiore a quello medio ricavato dalle prove di laboratorio.

La variabilità è molto elevata anche nei tratti costituiti da quarziti e quarzoscisti ($2 \div 19.3$ GPa), con un valore medio pari a 7.2 GPa, di circa sette volte inferiore a quello medio ricavato dalle prove di laboratorio, ma ciò è imputabile al fatto che su un totale di n.6 prove, due hanno interessato tratti di ammasso molto fratturati.

Le metabasiti sono state indagate soltanto da n.2 prove (5.3 GPa e 9.3 GPa), che hanno fornito valori di $5 \div 8$ inferiori a quelli ricavati sui campioni testati in laboratorio.

| Sondaggio e prova | Profondità (m) | E_y (MPa) | T_i^* (MPa) | EGm (MPa) | EGm/ E_y | RQD** (%) | Litotipo |
|-------------------|----------------|-------------|---------------|-----------|------------|-----------|-------------------------|
| SD04 - 1 | 98.50 | 7950 | 1295 | 1197 | 0.16 | 80 | Micascisti |
| SD04 - 2 | 106.50 | 6877 | 1821 | 1121 | 0.26 | 41 | Micascisti |
| SD04 - 3 | 110.50 | 11645 | 2001 | 1469 | 0.17 | 44 | Micascisti |
| SD04 - 4 | 118.50 | 10392 | 1102 | 1323 | 0.11 | 58 | Micascisti |
| SD04 - 5 | 121.50 | 17974 | 1007 | 627 | 0.06 | 66 | Micascisti |
| SD04 - 6 | 124.50 | 2318 | 594 | 553 | 0.26 | 15 | Micascisti |
| SD04 - 7 | 130.50 | 6854 | 1075 | 1394 | 0.20 | 41 | Micascisti |
| SD05 - 1 | 72.50 | 15309 | 4983 | 2375 | 0.16 | 68 | Micascisti |
| SD05 - 2 | 80.50 | 19338 | 6667 | 2662 | 0.14 | 53 | Quarzoscisti prevalenti |

| | | | | | | | |
|----------|--------|-------|-------|------|------|----|-------------------------|
| SD05 - 3 | 82.50 | 5597 | 3524 | 1180 | 0.21 | 53 | Quarzoscisti prevalenti |
| SD05 - 4 | 88.50 | 20046 | 16161 | 1503 | 0.07 | 49 | Micascisti |
| SD05 - 5 | 96.50 | 9663 | 6297 | 837 | 0.09 | 52 | Micascisti |
| SD05 - 6 | 98.50 | 4714 | 1310 | 1781 | 0.38 | 39 | Micascisti |
| SD05 - 7 | 109.50 | 25977 | 2636 | 2903 | 0.11 | 61 | Micascisti |
| SD06 - 1 | 78.50 | 1682 | 1965 | 546 | 0.32 | 9 | Micascisti |
| SD06 - 2 | 85.50 | 2292 | 669 | 71 | 0.14 | 25 | Quarzoscisti e quarziti |
| SD06 - 3 | 87.50 | 2044 | 2752 | 319 | 0.16 | 24 | Quarzoscisti e quarziti |
| SD06 - 4 | 94.50 | 6684 | 846 | 483 | 0.07 | 53 | Micascisti |
| SD06 - 5 | 98.50 | 1920 | 391 | 103 | 0.05 | 17 | Micascisti |
| SD06 - 6 | 105.50 | 6585 | 1361 | 1052 | 0.16 | 73 | Quarziti e quarzoscisti |
| SD06 - 7 | 109.50 | 5300 | 1670 | 652 | 0.12 | 40 | Metabasiti |
| SD06 - 8 | 114.50 | 7114 | 2695 | 897 | 0.13 | 57 | Micascisti |
| SD07 - 1 | 61.00 | 16975 | 1217 | 679 | 0.04 | 83 | Micascisti |
| SD07 - 2 | 68.50 | 6234 | 572 | 514 | 0.08 | 65 | Micascisti |
| SD07 - 3 | 71.50 | 15229 | 938 | 850 | 0.06 | 73 | Micascisti |
| SD07 - 4 | 79.50 | 6792 | 788 | 546 | 0.08 | 0 | Micascisti |
| SD07 - 5 | 82.50 | 6411 | 2078 | 729 | 0.11 | 57 | Micascisti |
| SD07 - 6 | 93.00 | 9742 | 1025 | 935 | 0.10 | 77 | Micascisti |
| SD07 - 7 | 100.50 | 8336 | 385 | 486 | 0.06 | 62 | Micascisti e metabasiti |

* Il valore del modulo di deformabilità è quello riferito al terzo ciclo di carico (T3).

** Il valore riportato è quello riferito al tratto compreso tra due manovre di recupero e non al singolo tratto di prova.

Tabella 9: Riassunto dei dati delle prove dilatometriche.

11.3.3 Prove Lugeon

I valori di permeabilità ricavati dalle prove eseguite sono sintetizzati in Tabella 10, dove sono riportati anche la percentuale di recupero modificato (RQD) e la litofacies che costituisce il volume roccioso investigato.

Le prove nei sondaggi geognostici realizzati in asse alla galleria (SD04, SD05, SD06, SD07) hanno fornito valori del coefficiente di permeabilità K_e compresi tra 10^{-8} e 0, che stanno ad indicare che le porzioni d'ammasso investigate hanno una permeabilità molto bassa o sono praticamente impermeabili, anche nei tratti dove, sulla base dell'indice RQD, sono interessate da un discreto numero di discontinuità.

Le due prove eseguite nel sondaggio in prossimità dell'imbocco sud (SD03 PZ), invece, hanno fornito valori del coefficiente di permeabilità K_e compresi tra 10^{-5} e 10^{-6} . Dall'analisi del materiale roccioso carotato da tale sondaggio si ritiene che l'elevata permeabilità ottenuta sia da mettere in relazione alla presenza di diverse discontinuità con apertura millimetrica.

| Prova | Profondità (m) | UL | K_e (m/s) | RQD % | Litotipo |
|-------------|----------------|-------|-------------|-------|--|
| SD03 PZ - 1 | 13.50-15.50 | 51.85 | 2.01E-05 | 34÷65 | Micascisti |
| SD03 PZ - 2 | 30.00-35.00 | 13.89 | 2.96E-06 | 26÷95 | Micascisti |
| SD04 - 1 | 90.00-95.00 | 0 | 0 | 36÷81 | Micascisti |
| SD04 - 2 | 100.00-105.00 | 0 | 0 | 61÷80 | Micascisti |
| SD04 - 3 | 112.00-117.00 | 0.12 | 2.32E-08 | 44÷53 | Micascisti |
| SD04 - 4 | 123.00-128.00 | 0.05 | 1.16E-08 | 15÷66 | Micascisti |
| SD05 - 1 | 74.50-79.50 | 0 | 0 | 39÷68 | Micascisti |
| SD05 - 2 | 83.60-88.90 | 0.01 | 4.19E-09 | 49÷54 | Micascisti e quarzoscisti |
| SD05 - 3 | 90.00-95.00 | 0.03 | 1.26E-08 | 49÷74 | Micascisti |
| SD05 - 4 | 101.00-106.00 | 0.01 | 4.68E-09 | 39÷74 | Micascisti |
| SD06 - 1 | 80.00-85.00 | 0.14 | 1.46E-08 | 9÷41 | Alternanze micascisti, quarziti e quarzoscisti |
| SD06 - 2 | 88.70-93.70 | 0.04 | 3.57E-09 | 25÷38 | Alternanze micascisti, quarziti e quarzoscisti |
| SD06 - 3 | 100.00-105.00 | 0.01 | 6.40E-10 | 6÷72 | Alternanze micascisti, quarziti e quarzoscisti |
| SD06 - 4 | 109.00-114.00 | 0.17 | 1.74E-08 | 38÷73 | Alternanze micascisti, metabasiti |
| SD07 - 1 | 62.00-67.00 | 0.02 | 3.66E-09 | 9÷41 | Micascisti |
| SD07 - 2 | 74.00-79.00 | 0.02 | 3.67E-09 | 25÷38 | Micascisti |
| SD07 - 3 | 84.00-89.00 | 0.01 | 1.38E-09 | 6÷72 | Micascisti |
| SD07 - 4 | 93.50-98.50 | 0.01 | 5.65E-10 | 38÷73 | Micascisti |

Tabella 10: Riassunto dei dati delle prove Lugeon.

11.4 Prove di laboratorio sulla matrice lapidea

Micascisti

I provini di tali litofacies, previa determinazione del peso di volume, sono stati sottoposti alle seguenti prove:

- n.28 compressioni monoassiali con determinazione del modulo elastico
- n.15 compressioni triassiali
- n.112 trazioni indirette
- n.74 Point load test

Quattro prove di compressione monoassiale hanno fornito valori anomali, molto bassi, poiché i provini presentavano microfratture latenti (dato riportato nella descrizione di laboratorio pre-rottura), quindi non sono state considerate nell'elaborazione dei dati.

I risultati delle prove considerate valide sono sintetizzati nella tabella seguente.

| γ (KN/m ³) | σ_c (MPa) | σ_c (MPa) | m_i | σ_t (MPa) | E_t (GPa) | E_s (GPa) | ν | $I_{S(50)}$ (MPa) |
|----------------------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Valore medio prove | Valore medio prove | Da criterio di Hoek & Brown | Da criterio di Hoek & Brown | Valore medio prove | Valore medio prove | Valore medio prove | Valore medio prove | Valore medio prove |
| 27.2 | 41.6 | 40.9 | 16 | 4.1 | 37.3 | 38.3 | 0.35 | 2.2 |

Tabella 11: Caratteristiche gomeccaniche dei micascisti.

L'analisi dei dati evidenzia una notevole variabilità dei valori di resistenza alla compressione monoassiale (da 12.3 MPa a 98.8 MPa) (Figura 64) e del modulo elastico (E_t 13.8÷89.2 GPa, E_s 16.5÷84.2 GPa) poiché il comportamento di tali litofacies è anisotropo, essendo influenzato dalla foliazione che induce rotture su piani preferenziali.

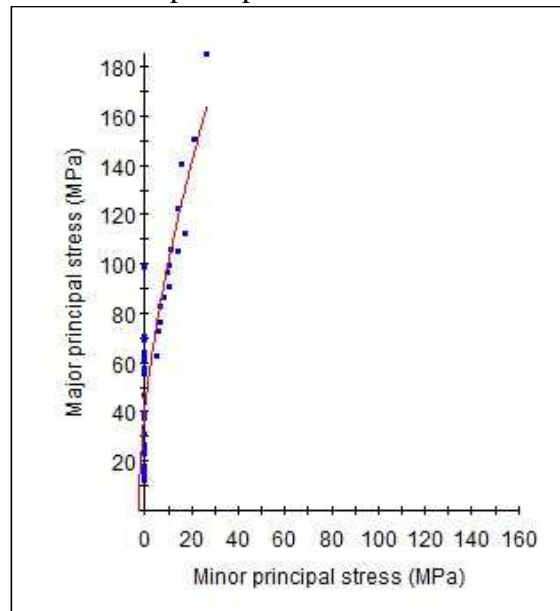


Figura 64: Involuppo di rottura secondo il criterio di Hoek & Brown per i micascisti.

I valori dell'indice di punzonamento I_s ottenuti sono molto dispersi ($I_{S(50)} = 0.4\div 7.3$ MPa), ma tale tipo di prova risente maggiormente dell'angolo di applicazione del carico rispetto all'orientazione della foliazione. Se si adotta il coefficiente moltiplicativo K pari a come 24 suggerito dall'ISRM si ottiene un valore medio di $\sigma_c = 52.6$ MPa, superiore a quelli medi ottenuti con le prove di compressione monoassiale e con il criterio di Hoek & Brown. Il coefficiente moltiplicativo suggerito dall'ISRM tuttavia, seppur comunemente impiegato, appare troppo elevato per tali litotipi, come evidenziato da studi di vari Autori (es. BRUSCHI¹ propone 19 per micascisti e tra 16 e 19 per rocce metamorfiche a medio metamorfismo). Utilizzando un K di 19 si ottiene un valore medio di $\sigma_c = 41.7$ MPa, pressoché simile a quello ottenuto con le altre prove.

La costante m_i risulta leggermente più elevata rispetto ai valori reperibili in bibliografia per

¹ BRUSCHI A. - *Meccanica delle Rocce nella pratica geologica ed ingegneristica*. D.Flaccovio Ed., Prima Edizione settembre 2004, ISBN 9788877585820

litofacies simili a quelle testate (9÷15).

Micascisti filladici

Di tali litofacies non è stato possibile prelevare provini di dimensioni idonee da sottoporre a prove di laboratorio per l'elevata sfaldabilità lungo foliazione. Utilizzando come riferimento la classificazione qualitativa proposta da ISRM (Figura 65), per le porzioni più compatte si stima un valore della resistenza alla compressione monoassiale tra 25 e 50 MPa, simile a quello dei micascisti, mentre per livelli milonitici si stima un valore di 5 MPa.

| | |
|--|---------------|
| La roccia si incide con l'unghia o si sbriciola con le mani | 0,25 – 1 MPa |
| Si sbriciola sotto i colpi della punta, lastre sottili si rompono con facilità con le mani | 1 – 5 MPa |
| La punta lascia deboli buchi, lastre sottili si rompono con forti pressioni delle mani | 5 – 25 MPa |
| La roccia si frattura con un colpo | 25 – 50 MPa |
| Si frattura dopo due-tre colpi | 50 – 100 MPa |
| Si frattura solo dopo molti colpi | 100 – 200 MPa |
| Si scheggia solamente | > 200 MPa |

Figura 65: Classificazione qualitativa della resistenza a compressione della roccia proposta dall'ISRM.

Quarziti e quarzoscisti

I provini di tali litofacies, previa determinazione del peso di volume, sono stati sottoposti alle seguenti prove:

- n.9 compressioni monoassiali con determinazione del modulo elastico
- n.4 compressioni triassiali
- n.10 trazioni indirette
- n.12 Point load test

I risultati delle prove sono sintetizzati nella tabella seguente.

| γ (KN/m ³) | σ_c (MPa) | σ_c (MPa) | m_i | σ_t (MPa) | E_t (GPa) | E_s (GPa) | ν | $I_s(50)$ (MPa) |
|----------------------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Valore medio prove | Valore medio prove | Da criterio di Hoek & Brown | Da criterio di Hoek & Brown | Valore medio prove | Valore medio prove | Valore medio prove | Valore medio prove | Valore medio prove |
| 27.0 | 70.9 | 66.4 | 10 | 6.26 | 49.6 | 43.5 | 0.30 | 2.6 |

Anche in questo caso si riscontra una notevole variabilità dei valori di resistenza a compressione monoassiale e del modulo elastico in quanto si tratta di litofacies il cui comportamento è influenzato dalla foliazione, che può essere da molto marcata a debole (nei sondaggi eseguiti i livelli di quarziti massive, entro le quali visivamente non si riconosce alcuna orientazione preferenziale sono nettamente subordinati). I quarzoscisti con foliazione pervasiva e non ripiegata sono fortemente anisotropi, ed hanno caratteristiche di resistenza e deformabilità pressoché simili a quelle dei micascisti, mentre le facies meno foliate o con foliazione ripiegata hanno valori più omogenei ed elevati.

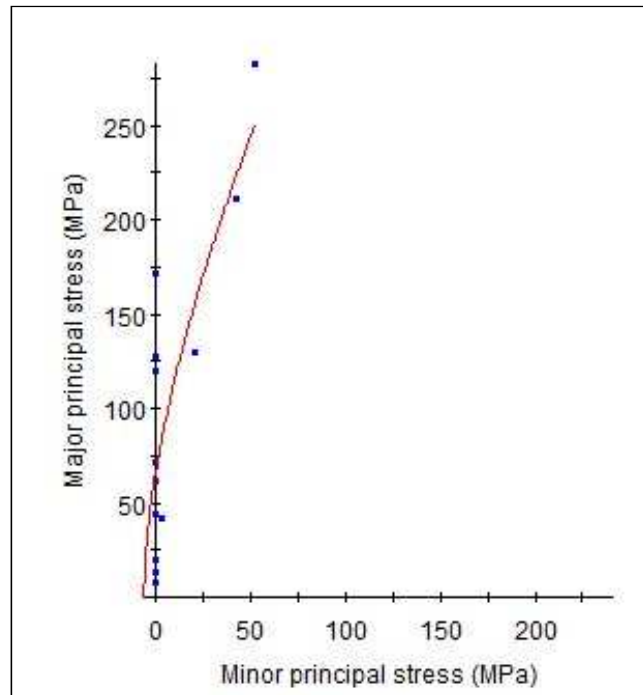


Figura 66: Involuppo di rottura secondo il criterio di Hoek & Brown per quarziti e quarzoscisti.

Anche i valori dell'indice di punzonamento I_s ottenuti sono dispersi ($I_{s(50)} = 1.13 \div 4.46$ MPa), ma tale tipo di prova risente maggiormente dell'angolo di applicazione del carico rispetto all'orientazione della foliazione. Per tali litofacies non sono disponibili in letteratura valori del coefficiente moltiplicativo K , pertanto, adottando quello suggerito dall'ISRM pari 24, si ottiene un valore medio di $\sigma_c = 62.4$ MPa, di poco inferiore a quello ottenuto con le prove di compressione monoassiale e triassiale.

La costante m_i risulta inferiore rispetto ai valori reperibili in bibliografia per quarziti massive ($17 \div 23$).

Metabasiti e metabasiti foliate

I provini di tali litofacies, previa determinazione del peso di volume, sono stati sottoposti alle seguenti prove:

- n.6 compressioni monoassiali con determinazione del modulo elastico
- n.20 trazioni indirette
- n.7 Point load test

I risultati delle prove sono sintetizzati nella tabella seguente.

| γ (KN/m ³) | σ_c (MPa) | σ_c (MPa) | m_i | σ_t (MPa) | E_t (GPa) | E_s (GPa) | ν | $I_{s(50)}$ (MPa) |
|----------------------------------|---------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|----------------------|
| Valore medio prove | Valore medio prove | Da criterio di Hoek & Brown | Da criterio di Hoek & Brown | Valore medio prove | Valore medio prove | Valore medio prove | Valore medio prove | Valore medio prove |
| 27.7 | 44.3 | - | - | 7.04 | 41.8 | 54.8 | 0.34 | 2.4 |

In queste litofacies i valori di resistenza e deformabilità risultano più omogenei poiché anche laddove è presente una foliazione, questa o è molto ripiegata (a scala centimetrica) o non risulta particolarmente pervasiva.

Le prove di point load, invece, hanno fornito valori dell'indice di punzonamento I_s molto

variabili ($I_{s(50)} = 0.6 \div 4.87$ MPa). Anche per tali litofacies non sono disponibili in letteratura valori del coefficiente moltiplicativo K, quindi, adottandolo pari a 24, si ottiene un valore medio di $\sigma_c = 58.4$ MPa, superiore a quello ottenuto mediando le prove di compressione monoassiale.

11.5 Classificazione geomeccanica degli ammassi rocciosi

Per la classificazione degli ammassi rocciosi sono stati utilizzati il “Rock Mass Rating (RMR) System” di Bieniawski nella versione del 1989 (Figura 67) ed il Geological Strength Index (GSI) di Hoek.

| A. CLASSIFICATION PARAMETERS AND THEIR RATINGS | | | | | | | | | | |
|---|--------------------------------------|---|-----------------------|--------------------------|-------------------------|--|--|-----------|---------|--|
| Parameter | | Range of values | | | | | | | | |
| A1 | 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 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 | |
| A2 | Drill core Quality RQD | | 90% - 100% | 75% - 90% | 50% - 75% | 25% - 50% | < 25% | | | |
| | | Rating | 20 | 17 | 13 | 8 | 3 | | | |
| A3 | Spacing of discontinuities | | > 2 m | 0.6 - 2 . m | 200 - 600 mm | 60 - 200 mm | < 60 mm | | | |
| | | Rating | 20 | 15 | 10 | 8 | 5 | | | |
| A4 | Condition of discontinuities (See E) | | Very rough surfaces | Slightly rough surfaces | Slightly rough surfaces | Slickensided surfaces | Soft gouge >5 mm thick or Separation > 5 mm | | | |
| | | | Not continuous | Separation < 1 mm | Separation < 1 mm | or Gouge < 5 mm thick or Separation 1-5 mm | Continuous | | | |
| | | | No separation | Slightly weathered walls | Highly weathered walls | Continuous | | | | |
| | | | Unweathered wall rock | | | | | | | |
| | | | Rating | 30 | 25 | 20 | 10 | 0 | | |
| A5 | Groundwater | 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 | | |
| B. RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATIONS (See F) | | | | | | | | | | |
| Strike and dip orientations | | | Very favourable | Favourable | Fair | Unfavourable | Very Unfavourable | | | |
| Ratings | Tunnels & mines | | 0 | -2 | -5 | -10 | -12 | | | |
| | Foundations | | 0 | -2 | -7 | -15 | -25 | | | |
| | Slopes | | 0 | -5 | -25 | -50 | | | | |
| C. ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RATINGS | | | | | | | | | | |
| Rating | | 100 ← 81 | 80 ← 61 | 60 ← 41 | 40 ← 21 | < 21 | | | | |
| Class number | | I | II | III | IV | V | | | | |
| Description | | Very good rock | Good rock | Fair rock | Poor rock | Very poor rock | | | | |
| D. MEANING OF ROCK CLASSES | | | | | | | | | | |
| Class number | | I | II | III | IV | V | | | | |
| Average stand-up time | | 20 yrs for 15 m span | 1 year for 10 m span | 1 week for 5 m span | 10 hrs for 2.5 m span | 30 min for 1 m span | | | | |
| Cohesion of rock mass (kPa) | | > 400 | 300 - 400 | 200 - 300 | 100 - 200 | < 100 | | | | |
| Friction angle of rock mass (deg) | | > 45 | 35 - 45 | 25 - 35 | 15 - 25 | < 15 | | | | |
| E. GUIDELINES FOR CLASSIFICATION OF DISCONTINUITY CONDITIONS | | | | | | | | | | |
| Discontinuity length (persistence) | | < 1 m | 1 - 3 m | 3 - 10 m | 10 - 20 m | > 20 m | | | | |
| Rating | | 6 | 4 | 2 | 1 | 0 | | | | |
| Separation (aperture) | | None | < 0.1 mm | 0.1 - 1.0 mm | 1 - 5 mm | > 5 mm | | | | |
| Rating | | 6 | 5 | 4 | 1 | 0 | | | | |
| Roughness | | Very rough | Rough | Slightly rough | Smooth | Slickensided | | | | |
| Rating | | 6 | 5 | 3 | 1 | 0 | | | | |
| Infilling (gouge) | | None | Hard filling < 5 mm | Hard filling > 5 mm | Soft filling < 5 mm | Soft filling > 5 mm | | | | |
| Rating | | 6 | 4 | 2 | 2 | 0 | | | | |
| Weathering | | Unweathered | Slightly weathered | Moderately weathered | Highly weathered | Decomposed | | | | |
| Rating | | 6 | 5 | 3 | 1 | 0 | | | | |
| F. EFFECT OF DISCONTINUITY STRIKE AND DIP ORIENTATION IN TUNNELLING** | | | | | | | | | | |
| Strike perpendicular to tunnel axis | | Strike parallel to tunnel axis | | | | | | | | |
| Drive with up - Dip 45 - 90° | Drive with up - Dip 20 - 45° | Dip 45 - 90° | Dip 20 - 45° | | | | | | | |
| Very favourable | Favourable | Very unfavourable | Fair | | | | | | | |
| Drive against dip - Dip 45-90° | Drive against dip - Dip 20-45° | Dip 0-20 - Irrespective of strike* | | | | | | | | |
| Fair | Unfavourable | Fair | | | | | | | | |

* Some conditions are mutually exclusive . For example, if infilling is present, the roughness of the surface will be overshadowed by the influence of the gouge. In such cases use A.4 directly.
** Modified after Wickham et al (1972).

Figura 67: Sistema di classificazione RMR nella versione del 1989.

L'indice di qualità GSI è stato ricavato secondo il metodo quantitativo proposto da Hoek, Carter & Diederichs (2013), riassunto in Figura 68. Tale metodo si basa sulla determinazione di due parametri: l'RQD che tiene conto del grado di fratturazione, e il JCond₈₉ (Joint Condition rating), corrispondente al parametro A4 della classificazione RMR nella versione del 1989, che

dipende dalle condizioni delle discontinuità e si ricava dalla tabella E di Figura 67.

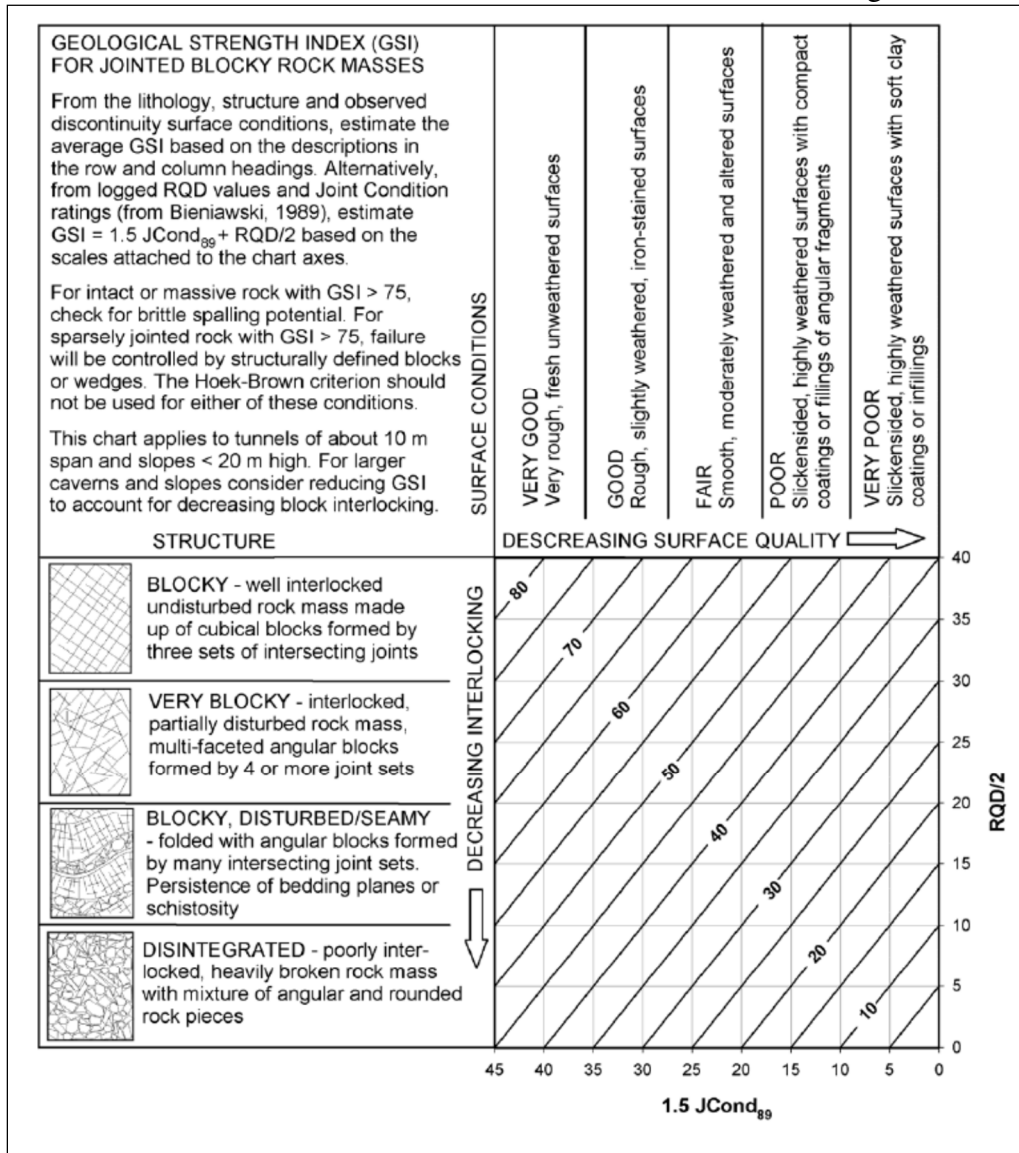


Figura 68: Grafico di quantificazione del GSI dai parametri RQD e Joint Condition.

La stima dei valori di RMR è stata condotta considerando:

- il valore di σ_c ricavato dalle prove di laboratorio con il criterio di Hoek & Brown relativo ai soli micascisti, che costituiscono l'82.7% degli ammassi rocciosi investigati con i sondaggi a carotaggio continuo. Ciò in quanto quarziti, quarzoscisti e metabasiti, che costituiscono il 15% di tali ammassi rocciosi, hanno caratteristiche di resistenza superiori o molto simili. Ai micascisti filladici, che rappresentano il 2.3% delle litofacies investigate, è stato assegnato lo stesso valore di resistenza alla compressione monoassiale dei micascisti, mentre i livelli milonitici che li intersecano, molto meno resistenti, sono stati considerati come riempimento di discontinuità (riempimento compatto di spessore superiore a 5 mm), diminuendo in tal modo il valore numerico derivato dalle condizioni dei giunti;
- il valore di RQD fornito dai sondaggi, definendo un valore medio "pesato" (in funzione delle lunghezze delle singole manovre) ed un range ottenuto sommando e sottraendo da

questo lo scarto quadratico medio;

- la spaziatura delle discontinuità impostate sulla foliazione (scistosità) e sulle strutture che a varia scala la deformano (crenulazioni, fianchi delle micropieghe, lineazioni d'intersezione) poiché, da quanto ricavato dalle stazioni di rilievo geomeccanico e dall'analisi dei sondaggi, risulta inferiore a quella del reticolo fessurativo;
- la condizione dei giunti desunta dagli stop geostrutturali e dall'analisi dei sondaggi;
- una condizione idraulica "umida" per tutta la lunghezza della galleria;
- un'orientazione "mediocre" della foliazione e delle strutture che a varia scala la deformano (ritenute essere la principale famiglia di discontinuità) rispetto al tracciato dell'opera, assumendo una direzione di avanzamento dello scavo dall'imbocco sud verso quello nord.

Nella seguente tabella sono riassunti i valori considerati per ciascun parametro della classificazione ed i relativi rating utilizzati.

| Parametro | Valore o caratteristiche | Rating | | | | |
|-----------|----------------------------------|---|---------------|---------|----|----|
| | | Medio | Minimo | Massimo | | |
| A1 | σ_c | 40.9 MPa | 5 | 5 | 5 | |
| A2 | RQD | SD03 PZ | 64 % (37÷91%) | 13 | 8 | 18 |
| | | SD04 | 52 % (33÷71%) | 10 | 7 | 14 |
| | | SD05 | 58 % (48÷68%) | 12 | 9 | 13 |
| | | SD06 | 44 % (23÷65%) | 9 | 6 | 13 |
| | | SD07 | 72 % (52÷92%) | 14 | 10 | 18 |
| A3 | Spaziatura | 0.15÷0.5 m | 9 | 8 | 10 | |
| A4 | Persistenza | 1÷10 m | 2 | 2 | 4 | |
| | Apertura | da completamente chiuse ad aperte 0.1÷1 mm | 5÷6 | 4 | 6 | |
| | Rugosità | da lisce a leggermente rugose | 2÷3 | 1 | 3 | |
| | Alterazione | da non alterate a leggermente alterate | 6 | 5 | 6 | |
| | Riempimento | da assente a compatto sia < 5 mm che > 5 mm | 4÷6 | 2 | 6 | |
| A5 | Condizioni idrauliche | umida | 10 | 10 | 10 | |
| A6 | Orientazione delle discontinuità | mediocre | -5 | -5 | -5 | |

Tabella 12: Valori e rating dei parametri considerati per la stima di RMR.

Per la stima del GSI sono stati considerati sia i medesimi valori di RQD (valore medio "pesato" e minimi e massimi ottenuti dallo scarto quadratico medio), sia le stesse condizioni dei giunti ricavate dagli stop geostrutturali e dall'analisi dei sondaggi.

Sulla base dei dati disponibili, la classificazione degli ammassi rocciosi lungo il tracciato della galleria è riportata nella tabella seguente.

| Progressiva | Rock Mass Rating System (1989) | | | | GSI | |
|-------------------|--------------------------------|------------|--------|------------|--------------|------------|
| | Indice RMR | | Classe | | Valore medio | Variazione |
| | Valore medio | Variazione | Media | Variazione | | |
| 0+492.00÷0+742.00 | 50 | 42÷57 | III | III | 59 | 41÷75 |
| 0+742.00÷0+770.00 | 44 | 38÷52 | III | IV÷III | 47 | 32÷64 |
| 0+770.00÷1+486.00 | 50 | 41÷61 | III | III÷II | 57 | 39÷73 |
| 1+486.00÷1+520.00 | 44 | 38÷52 | III | IV÷III | 47 | 32÷64 |
| 1+520.00÷1+934.00 | 53 | 44÷63 | III | III÷II | 66 | 48÷83 |

Tabella 13: Classificazione degli ammassi rocciosi lungo il tracciato della galleria.

12. CARATTERISTICHE GEOLOGICHE LUNGO IL TRACCIATO DELLE OPERE

Nei paragrafi seguenti viene proposta una sintesi riepilogativa delle caratteristiche geologiche salienti che interessano i 1950m circa del tracciato in progetto nella sua veste definitiva.

12.1.1 *Imbocco Sud*

La tratta che caratterizza l'imbocco sud prevede una prima parte a cielo aperto sino alla Progr. 0+150.00m per proseguire in galleria artificiale sino alla Progr. 0+492.00m, da cui inizia il segmento in galleria naturale.

Dal punto di vista geologico – stratigrafico, l'area interessata dal tracciato è stata indagata nella recente campagna indagini con i tre sondaggi SD01PZ, SD02PZ e SD03PZ, attrezzati ciascuno con piezometro e con 2 stendimenti MASW. È stato altresì utilizzato uno stendimento sismico a rifrazione eseguito nella precedente campagna indagini (Stendimento ST1 - Progetto Preliminare, 2015), sul quale sussiste un certo grado di incertezza nel merito dell'effettiva localizzazione. Con riferimento al profilo geologico geotecnico [5] si può osservare che le opere in progetto interesseranno la porzione di depositi alluvionali e lacustri che compongono la copertura recente del basamento metamorfico, basamento che in questo tratto non è interessato dalle lavorazioni, se non forse marginalmente in corrispondenza del passaggio galleria artificiale / galleria naturale. A questo proposito occorre tener conto di eventuali imprecisioni connesse alla distanza di circa 30m del sondaggio SD03PZ dal tracciato, data la presenza del tratto ferroviario che ne impedisce un'ubicazione più adeguata.

Dal punto di vista litologico i carotaggi, la sismica e gli affioramenti disponibili lungo il versante, hanno posto in evidenza come il complesso metamorfico degli scisti di Edolo tenda a ridurre la sua pendenza al di sotto del piano campagna raggiungendo progressivamente un angolo medio apparente nell'intorno dei 20°.

Il materiale che lo ricopre è riconducibile a due distinte fasi deposizionali. Una prima, più antica, ha contribuito all'accumulo di sedimenti lacustri, sabbioso-limosi con subordinate lenti di argilla e passate ghiaiose. La genesi di tali depositi è imputata alla formazione, probabilmente in più riprese, di un lago di sbarramento creatosi a seguito degli eventi di trasporto solido della Valle Rabbia di Sonico (verosimilmente simili a quello del 27 luglio 2012) con apporti episodici di materiale alluvionale più grossolano. Una seconda fase deposizionale più recente, olocenica, ha suturato la precedente con depositi più grossolani, torrentizi, di natura alluvionale caratterizzati da prevalenti ghiaie eterometriche sabbiose, con blocchi anche di grandi dimensioni. Di ciò dovrà essere tenuto conto nella realizzazione delle palificazioni progettualmente previste a sostegno degli scavi.

Come esaurientemente trattato nel documento [9], le differenze di queste due litofacies si traducono geotecnicamente nella distinzione di due livelli: uno superiore (Livello A) di spessore medio intorno ai 12m ed uno inferiore (Livello B) di spessore massimo indefinito (superiore ai 35m nell'area indagata), ad aumentare in allontanamento dal versante. Le differenze litologiche dei due livelli sono macroscopicamente evidenti nelle figure seguenti: in Figura 69 è rappresentato l'aspetto tipo del Livello A nella sua parte più sommitale, con ghiaie torrentizie in scarsa matrice sabbiosa e presenza di blocco di tonalite di altezza quasi un metro. In Figura 70 si osserva l'aspetto tipo del Livello B, con ghiaie medie ocracee passanti a sabbie fini, limose, grigie. Ovviamente possono presentarsi variazioni sul tema litologico in ragione della

dinamica dell'ambiente deposizionale, con locale prevalenza di una *facies* granulometrica. Il motivo comunque caratteristico è la riduzione di granulometria con l'aumentare della profondità. Ciò determina una variazione dell'angolo di attrito ϕ da oltre 45° (Livello A) a 36° (Livello B)



Figura 69 – Livello A; ghiaie torrentizie con ciottoli, sabbiose con blocco di tonalite.



Figura 70 - Livello B; sabbie medie ocracee passanti a sabbie fini limose grigie.

Altra importante conseguenza della riduzione granulometrica con la profondità è la diminuzione della conducibilità idraulica.

La piezometrica si attesta a circa 7m da p.c.. Pertanto, durante la realizzazione della galleria artificiale, compresa tra la Progr. 0+150.00m e la Progr. 0+492.00m, parte dello scavo, raggiunta la profondità di 7m da p.c., avverrà sotto falda. Ciò dovrà essere tenuto in debita considerazione, valutando anche che le permeabilità ricavate sperimentalmente nelle prove di tipo *Lefranc* in foro, definiscono per il Livello A una permeabilità K di $10^{-4}/10^{-5}$ m/sec e per il Livello B una permeabilità K nell'ordine di $10^{-5}/10^{-6}$ m/sec.

I sistemi di impermeabilizzazione dello scavo dovranno essere dimensionati in modo da impedire a sufficienza l'abbassamento della falda esternamente allo scavo stesso, evitando così cedimenti del terreno adiacente il tracciato, con interessamento delle strutture abitative poco distanti. Per analogia cautela, attenzione dovrà essere posta anche nel contenere le vibrazioni da parte dei mezzi di perforazione e di scavo.

12.1.2 Galleria

Il tratto in galleria naturale si sviluppa per complessivi 1443,79m dalla Prog. 0+492.00m alla Progr. 1+935.79m.

A circa 10m dall'attacco dello scavo si incontra il sottoattraversamento della linea ferroviaria (FERROVIENORD S.p.A.).

La ricostruzione dell'assetto geologico in quel punto ha una forte componente interpretativa poiché, come appena accennato, le indagini dirette ed indirette disponibili non sono nelle immediate vicinanze dello scavo. La ricostruzione fatta vede lo scavo impostarsi prevalentemente in materiali granulari in parte costituiti dai depositi alluvionali del Livello A, eteropici con i depositi detritici di versante, non caratterizzabili sperimentalmente. È comunque ragionevole supporre la presenza di pezzature eterometriche, anche di dimensioni ragguardevoli, per il contributo del glaciale rimaneggiato di versante, in aggiunta ai trovanti anche metrici contenuti nelle passate torrentizie del Fiume Oglio.

L'estensione dello scavo con calotta in materiale detritico è funzione ovviamente della potenza del glaciale rimaneggiato di versante che, in questa fase progettuale è solo possibile stimare. Pertanto, la sezione di scavo piena nel substrato metamorfico è stimata a partire dalla Progr.0+509m. Per affinare la stima sarà importante poter disporre, per l'iter esecutivo del progetto, di ulteriori stese sismiche.

A partire dalla stimata Progr. 0+509m sino alla Progr. 1+935.79m, lo scavo della galleria naturale procede integralmente all'interno del basamento metamorfico, costituito dalla Formazione degli scisti di Edolo, come si può osservare nel profilo geologico-geomeccanico [6]. La formazione è stata indagata mediante 4 sondaggi profondi SD04 (135m), SD05 (120m), SD06 (125m), SD07 (110m), con esecuzione di prove di permeabilità *Lugeon*, prove dilatometriche, log ottici, log sonici.

L'ammasso, nel suo insieme è definibile caratterizzato da prevalenti micascisti quarzoso feldspatici, grigio plumbei, con foliazione da poco marcata a ben evidente, generalmente definita dall'alternanza di sottili letti lepidoblastici micaceo-cloritici, e letti granoblastici quarzoso-feldspatici, alternati a subordinati quarzoscisti e quarziti grigi - grigio chiari, da poco foliati a massivi e rari strati di micascisti filladici, grigio molto scuro - neri, con foliazione ben definita. Sono presenti, localmente, subordinati orizzonti di metabasiti di colore verde molto scuro - nero da massive a debolmente foliate. La discontinuità più rappresentata è la foliazione (Figura 71) che presenta una giacitura di immersione relativamente costante in direzione NW,

a favore quindi di scavo, verso il fronte del quale dovrebbe essere prevalente l'assetto reggipoggio o traverpoggio.

Ovviamente non si possono escludere sensibili variazioni sul tema, data la storia tettonometamorfica delle unità che compongono il basamento sudalpino.



Figura 71 – Foliazione ad alto angolo che caratterizza l'ammasso nelle immediate vicinanze dell'imbocco N

Nel dettaglio è stato possibile riconoscere macroscopicamente all'interno della formazione le seguenti cinque litofacies:

- micascisti di colore grigio con foliazione poco marcata (62.2% del totale carotato);



- micascisti di colore grigio con foliazione ben evidente (20.5% del totale carotato);



- micascisti filladici di colore grigio molto scuro o nero (2.3% del totale carotato);



- quarziti e quarzoscisti di colore dal bianco al grigio chiaro (le due litofacies non sono discriminabili poiché sfumano l'una nell'altra molto gradualmente) (9.7% del totale carotato);



- metabasiti di colore verde molto scuro sia massive che debolmente foliate (5.3% del totale carotato).



Ovviamente è aleatorio poter discriminare la successione di litofacies nel corso dell'avanzamento dello scavo ed è stata quindi rappresentata, a titolo semi qualitativo, la percentuale di ciascuna di esse in rapporto alla perforazione a carotaggio eseguita in totale (200m)

Nel merito delle discontinuità, a parte la foliazione, il rilievo geologico di dettaglio ha posto in evidenza la presenza di una diffusa fagliazione che interessa l'ammasso, sia a piccola che media scala ma non sembrano molto frequenti lineamenti con marcata persistenza, almeno limitatamente alle porzioni in affioramento che è stato possibile ispezionare, distribuite prevalentemente lungo i tagli stradali (Figura 72).



Figura 72 – Esempio di fagliazione che interessa il substrato lungo via Monte Colmo

Nel merito delle zone disturbate tettonicamente il profilo riporta due episodi, il primo alla Progr. 0+775m, il secondo alla Progr. 1+500m circa. Entrambe rappresentano il prolungamento di possibili lineamenti osservati in superficie, con evidenza di probabili fasce di disturbo associate. Come già introdotto al capitolo 9, si ritiene che le condizioni generali dello stato di fratturazione con lembi generalmente poco aperti o chiusi, con tendenza a serrarsi in profondità, hanno

portato a concludere che l'intera tratta della galleria naturale sia caratterizzata dall'alternanza di tratti asciutti ed umidi, con sgocciolamento, comunque con venute inferiori a 10 l/min per 10m di galleria (condizioni umide secondo Beniawski 1989).

12.1.3 Imbocco Nord

La terminazione della galleria naturale è posta alla Progr. 1+793.00 m, cui seguono 23m di galleria artificiale (sino alla Progr. 1+816.00 m). L'attraversamento del Fiume Oglio avverrà con un ponte a campata unica, di lunghezza pari a 60m, poggiante su pile di sostegno sul lato nord e sul lato sud.

La Figura 73 ritrae le caratteristiche del versante in corrispondenza dell'imbocco nord. Si nota che gli affioramenti di micascisti che solitamente caratterizzano questa porzione acclive di versante, nel caso specifico lasciano il posto a un detrito indistinto con evidente riduzione della pendenza.



Figura 73 – Coltre detritica di versante in corrispondenza dell'imbocco nord.

A tal proposito sono stati eseguiti due stendimenti sismici a rifrazione L03 ed L04 (cfr. Figura 74, Figura 75, Figura 76) da cui è possibile osservare come, assumendo il contatto roccia/detrito in corrispondenza di $V_s = 800\text{m/sec}$, lo spessore della coltre detritica tenda ad ispessirsi verso monte sino a raggiungere circa 12m in corrispondenza di L04, identificando così un rilascio di materiale da tenere in considerazione per gli interventi di sostegno. Da quanto è possibile osservare in superficie, l'accumulo presenta al suo interno blocchi di dimensioni considerevoli, anche nell'ordine dei metri cubi.

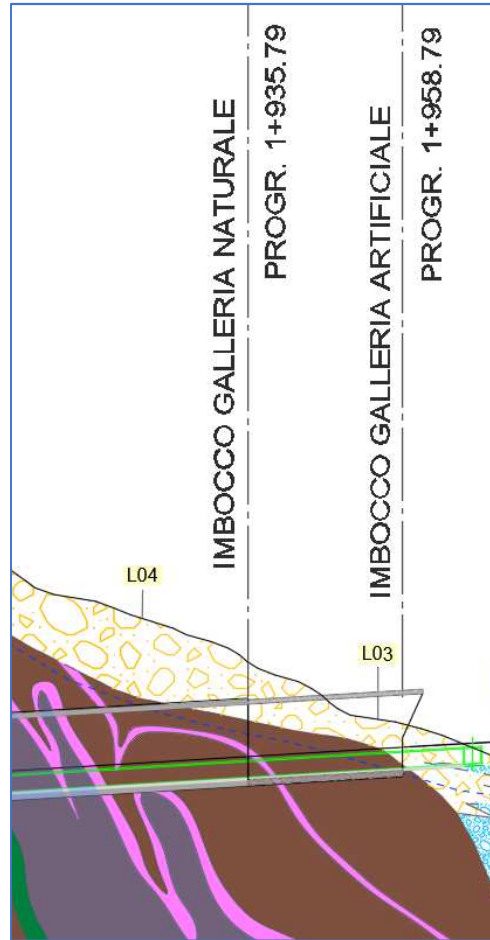


Figura 74 – Profilo geologico in corrispondenza dell’imbocco nord

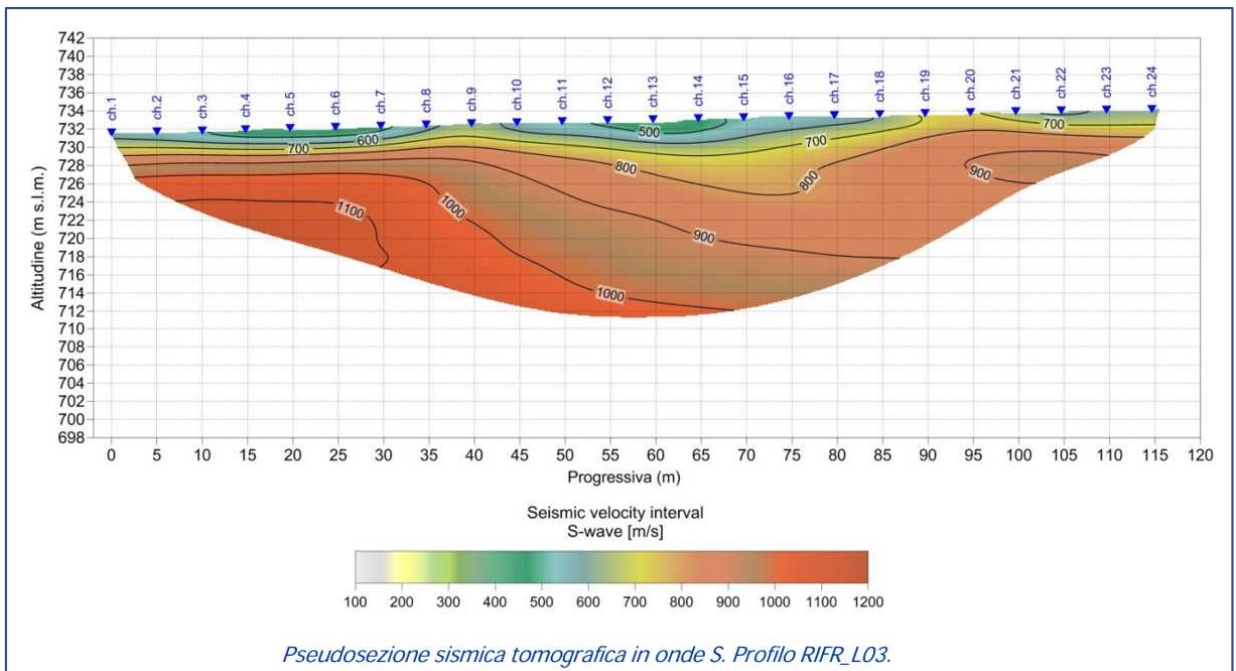


Figura 75 – Sezione sismica L03

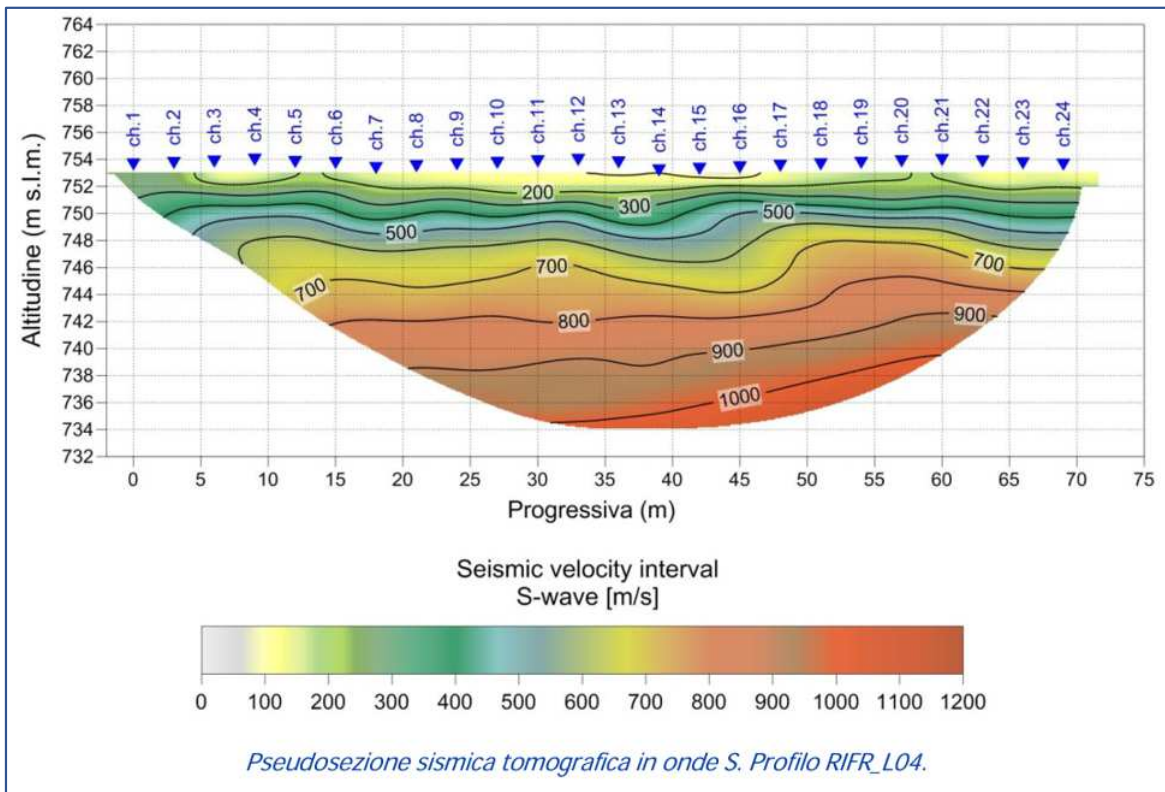


Figura 76 – Sezione sismica L04

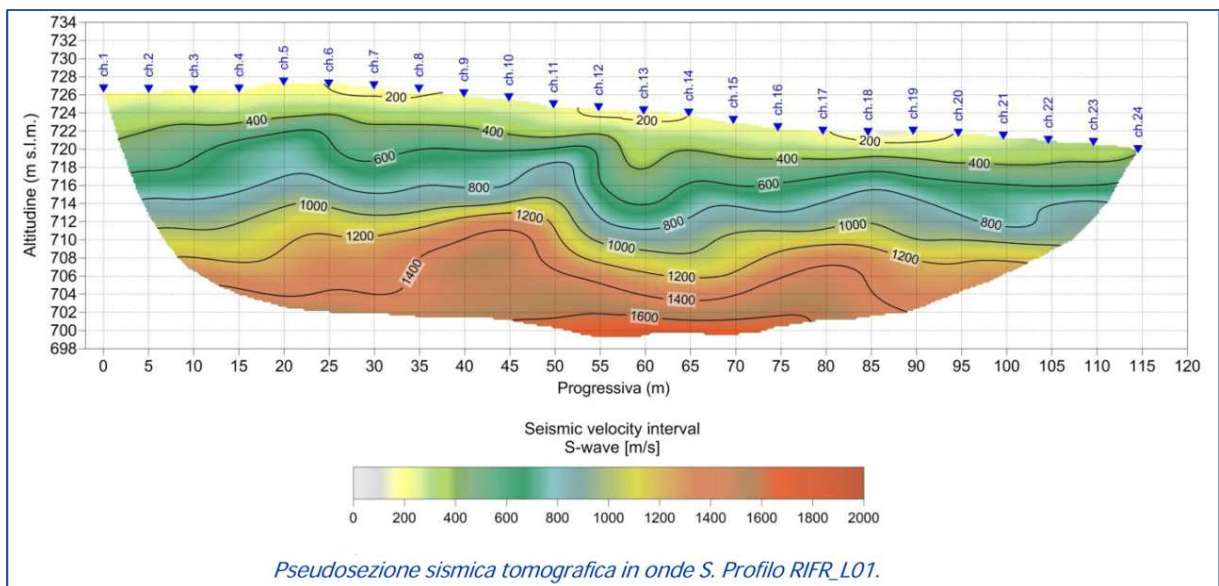


Figura 77 – Sezione sismica L01

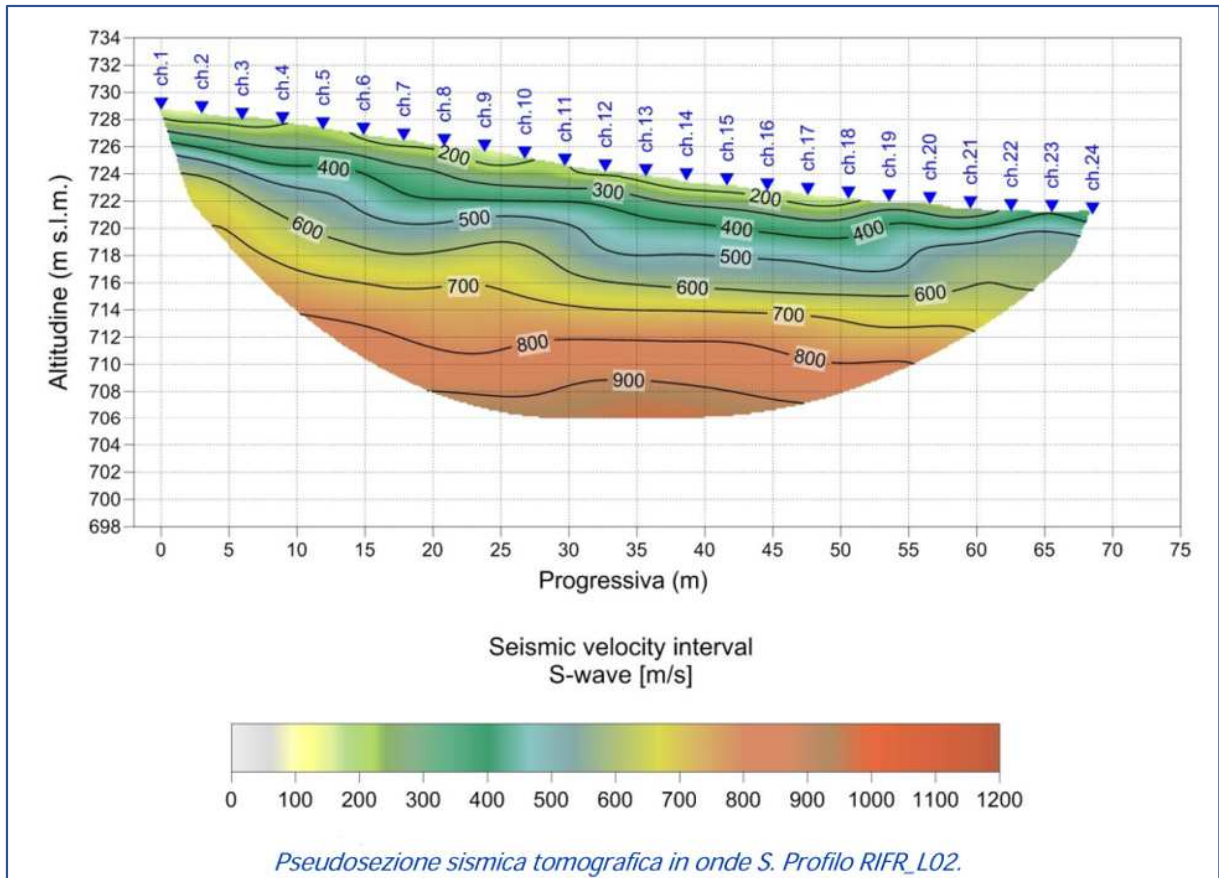
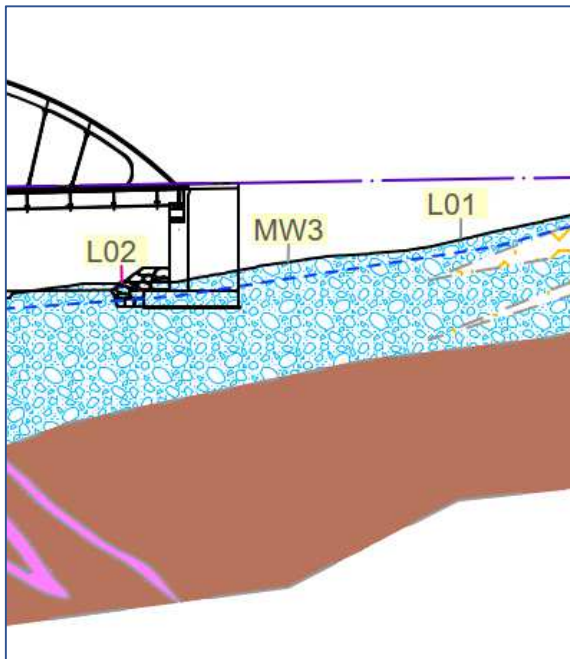


Figura 78 – Sezione sismica L01

Per quanto concerne il sedime di imposta delle fondazioni delle pile di sostegno del ponte, la diagnostica prevedeva, in sede di piano indagini, l'esecuzione di due sondaggi SD08 ed SD09, ed uno stendimento MASW MW3. Ragioni di accessibilità non hanno consentito l'esecuzione di SD09, sostituito con due stendimenti sismici L01 ed L02.



Per quanto concerne le pile lato sud del ponte il sondaggio SD08 ha attraversato 25m di depositi alluvionali prima di incontrare i micascisti del substrato. In sponda destra i profili tomografici di Figura 77 e Figura 78, sempre considerando $V_s=800\text{m/sec}$ il tetto del substrato, lo intercetterebbero alla profondità di circa 11m da p.c. (Figura 79).

Tale profondità richiederà, in un'ottica di massima cautela, l'accertamento del dato mediante un sondaggio geotecnico.

Figura 79 – Ricostruzione dell'andamento del substrato sotto la pila nord del ponte

13.INDAGINI INTEGRATIVE

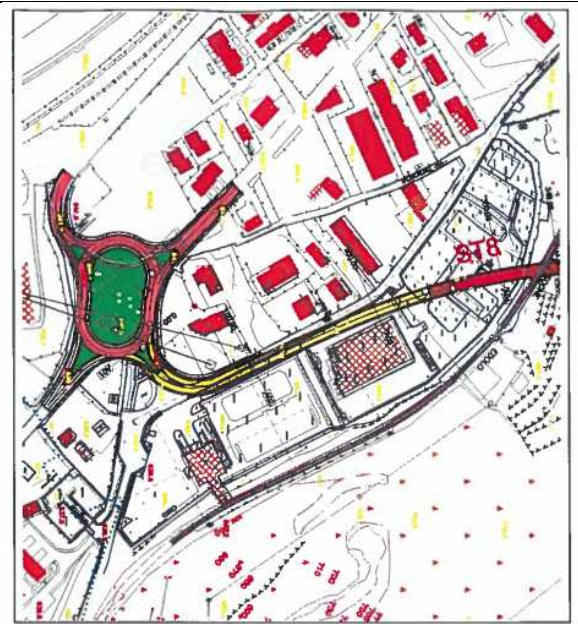
Le evidenze emerse durante l'esecuzione del rilievo geologico di dettaglio hanno posto in evidenza la necessità di approfondimento, per quanto concerne la fase esecutiva dell'iter progettuale, di alcuni aspetti ritenuti particolarmente delicati descritti nel seguito.

13.1 Imbocco sud

Si riterrebbe importante poter affinare la conoscenza dell'andamento del substrato in corrispondenza dell'attraversamento della linea ferroviaria (FERROVIENORD S.p.A.). Sussistono delle incertezze nel merito del posizionamento dello stendimento ST8 eseguito nel corso della campagna indagini del Progetto Preliminare. La Figura 80 e la Figura 81, tratte dal documento "Report relativo l'indagine geognostica nell'ambito del Progetto Preliminare e studio di Prefattibilità Ambientale per l'adeguamento in sede del tratto Berzo Demo . Edolo della SS42 "del Tonale e della Mendola" e per la costruzione della variante Est di Edolo con collegamento in lato sud alla SS39 "del Passo dell'Aprica" Lotto II e Lotto III – 2013 - georicerche, non sembrano chiarire con la necessaria precisione l'esatta ubicazione dello stendimento di 55m



Figura 80 – Ubicazione dello stendimento ST8 eseguito da Georicerche nell'ambito del Progetto Preliminare



UBICAZIONE ST8

Figura 81 Ubicazione dello stendimento ST8 eseguito da Georicerche nell'ambito del Progetto Preliminare

Il posizionamento riportato nella carta geologica del Progetto Preliminare è quello visibile in Figura 82, che risulterebbe di lunghezza pari a 40m. Quest'ultima è stata la posizione assunta nella ricostruzione del profilo geologico [6] ferma restando appunto la differenza di lunghezza e l'incertezza sul posizionamento.

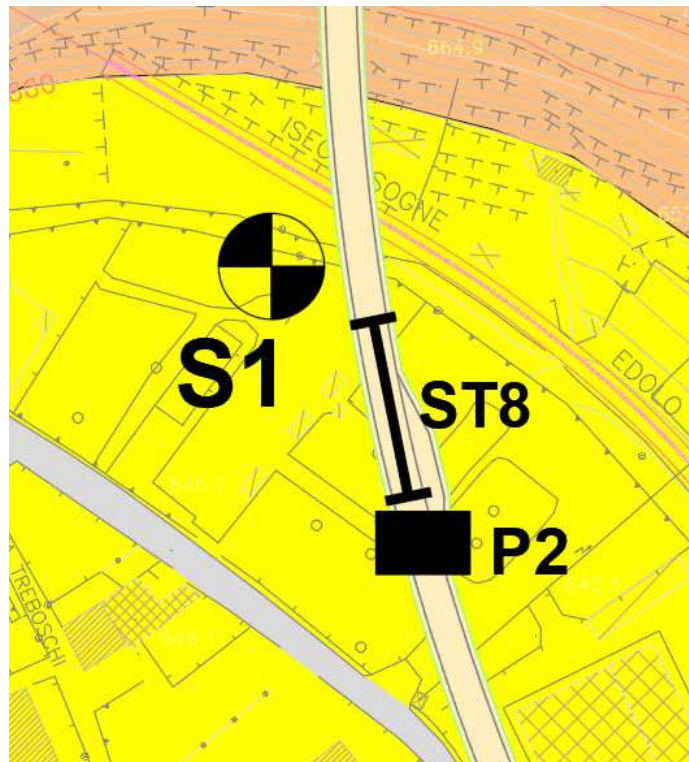


Figura 82 – Posizionamento dello stendimento ST8 da Progetto Preliminare del 2015

Inoltre, uno stendimento parallelo alla linea ferroviaria chiarirebbe meglio lo spessore detritico interessato dal sottoattraversamento.

A seguito della recente rivisitazione del progetto, con spostamento verso sud della rotatoria di inizio della variante stradale e conseguente allungamento del tracciato, si ritiene opportuno un supplemento di indagine mediante la realizzazione di una ulteriore verticale a carotaggio continuo, con installazione di un piezometro, accompagnata da uno stendimento MASW. Ciò consentirebbe di colmare la lacuna di informazioni nel profilo geologico in cui i primi 250m risultano privi di dati oggettivi a supporto dell'interpretazione.

13.2 Imbocco nord

Come già anticipato al paragrafo 12.1.3 in sponda destra del Fiume Oglio, i risultati degli stendimenti tomografici di Figura 77 e Figura 78, utilizzati per definire la profondità del substrato roccioso in funzione del dimensionamento delle fondazioni delle pile nord di sostegno del ponte richiedono, in un'ottica di massima cautela, l'accertamento del dato mediante un sondaggio geotecnico, riproponendo il sondaggio SD09PZ.

14. CONCLUSIONI

L'area prescelta per la realizzazione della variante del tratto *Berzo Demo–Edolo e Variante Est di Edolo* della S.S. 42 è geograficamente collocata nell'Alta Valle Camonica, ed interessa il settore sud-occidentale del Comune di Edolo (BS).

L'area interessata dall'opera ricade geologicamente nella porzione più settentrionale delle Alpi meridionali centrali, che costituiscono una delle porzioni sudvergenti della Catena Alpina, caratterizzata dalla presenza di un assetto a pieghe e sovrascorrimenti.

L'opera in progetto attraversa il basamento Sudalpino, costituito prevalentemente da rocce silicoclastiche pelitico-psammitiche, di supposta età paleozoica, interessate da un metamorfismo di età varisica, con intercalati ortogneiss granitoidi metamorfosati e deformati successivamente dagli eventi ercinici e alpini.

Convenzionalmente le metapeliti del basamento delle Alpi Meridionali vengono raggruppate all'interno di una stessa unità litostratigrafica, nota in letteratura come "*Scisti di Edolo*".

Geomorfologicamente, il sito in esame è posto in corrispondenza del brusco cambio di direzione del ramo vallivo dell'alta Valle Camonica, di probabile controllo strutturale vista la presenza sia di lineamenti tettonici d'importanza regionale (Linea Insubrica), sia di strutture deformative (pieghe, foliazioni) legate alle ultime fasi dell'orogenesi alpina.

All'intersezione tra i tratti vallivi a diversa orientazione e drenaggio si sviluppa l'ampio fondovalle di Edolo, costituito da un riempimento di sedimenti di natura e spessore non del tutto noti, suturato da sedimenti alluvionali olocenici.

I tratti morfologici salienti dell'area in esame sono determinati principalmente da processi fluviali, processi glacigenici e processi legati alla gravità. Relativamente a questi ultimi una DGPV è riportata nella cartografia allegata all'Inventario dei dissesti del Piano Territoriale Coordinamento Provinciale della Provincia di Brescia (2014) e nel "WP1 - Geodatabase delle grandi frane in roccia". Sebbene da fotointerpretazione emergano indizi morfologici che potrebbero essere facilmente riferiti ad una DGPV, sia i rilievi in sito che i dati di perforazione non hanno consentito di rilevare elementi certi per confermarne tale genesi.

Idrogeologicamente si ritiene che l'ammasso roccioso attraversato dal cavo sia caratterizzato da una bassa permeabilità, in diminuzione con la profondità, per la presenza di uno stato di fratturazione caratterizzato da lineamenti generalmente poco aperti, chiusi o serrati, determinando, alla quota dell'opera di progetto, condizioni idrauliche umide, con alternanza di tratti asciutti e tratti con gocciolamenti. I tratti non in galleria, corrispondenti alle aree degli imbocchi sud e nord, interessano invece acquiferi contenuti nei depositi alluvionali e lacustri.

Sismicamente il comune di Edolo è classificato in zona 3 contraddistinto da un parametro di accelerazione massima orizzontale ag compreso nell'intervallo $0,05-0,075 * g$ m/s^2 (valore riferito ad una probabilità di superamento del 10% in 50 anni)

Imbocco sud

Presenta tratti a cielo aperto e in galleria artificiale.

La campagna indagini ha posto in evidenza che l'opera interesserà la copertura alluvionale e lacustre del basamento metamorfico, caratterizzata da una diminuzione granulometrica con la profondità. Sono stati distinti geotecnicamente due livelli: il primo, Livello A, costituito da depositi alluvionali anche a grossi blocchi, fino a 12m di profondità indicativa; il secondo, livello B, di sabbie e limi lacustri. L'acquifero contiene una falda libera a circa 7m da p.c.. La

criticità è principalmente rappresentata dalla vicinanza di strutture abitative, da preservare quindi da effetti di cedimenti legati all'eventuale abbassamento della falda o dalle conseguenze di vibrazioni indotte dalle lavorazioni in prossimità.

Galleria naturale

L'insieme della campagna indagini di sito e di laboratorio ha consentito la distinzione di cinque litofacies differenti all'interno degli *Scisti di Edolo*. La classificazione geomeccanica del basamento metamorfico interessato dall'opera è stata condotta con indice di qualità GSI ricavato secondo il metodo quantitativo proposto da Hoek, Carter & Diederichs (2013). Il profilo geologico geomeccanico riconosce lungo il tratto in galleria naturale tre classi di RMR (II-III-IV) e quattro valori di GSI corrispondenti (47-57-59-66), individuando due situazioni caratterizzate da possibile disturbo tettonico.

L'opera presenta, oltre alle criticità legate all'eventuale attraversamento di zone disturbate tettonicamente, il sottoattraversamento, in corrispondenza della sezione d'imbocco, della linea ferroviaria (FERROVIENORD S.p.A.). Tale criticità suggerisce un supplemento di indagini per valutare l'effettiva profondità del substrato metamorfico.

Imbocco nord

Presenta tratti a cielo aperto e in galleria artificiale.

Le indagini sismiche hanno evidenziato che la galleria artificiale e lo scavo alla sezione d'imbocco, avverrebbero in detrito di versante, anche con blocchi di grosse dimensioni, di cui tener conto per quanto riguarda le opere di sostegno.

Sono state indagate le due sponde del Fiume Oglio su cui verranno poggiate le pile di sostegno del ponte che consentirà al tracciato in progetto di raggiungere la SS42.

Per quanto concerne la sponda sinistra il sondaggio eseguito ha accertato la presenza del substrato metamorfico alla profondità di 25m. In sponda destra il substrato è stato intercettato alla profondità di circa 11m mediante stendimenti sismici a rifrazione. Si tratta pertanto di una informazione indiretta che andrà confermata con l'esecuzione di un sondaggio geotecnico.