

**POLITECNICO DI MILANO**

**Scuola di Ingegneria Civile e Ambientale**

**Corso di Laurea in**

**Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio**



**Caratterizzazione alla macro, meso e micro – scala delle  
rocce di faglia interessate dalla Galleria di Base del  
Brennero nel contesto del Lineamento Periadriatico**

Relatore: Prof.ssa Paola GATTINONI

Tesi di Laurea di:

Stefania SCORCIOLLA Matr. 783256

Anno Accademico 2012 – 2013

29 Aprile 2014

*Al mio papà,  
esempio di dedizione, impegno, coraggio e forza,  
a cui dedico ogni gioia della mia vita.*

---

# Indice

|  |                |
|--|----------------|
| • <b>Abstract</b>  | <b>Pag. 1</b>  |
| • <b>Riassunto</b>   | <b>Pag. 2</b>  |
| • <b>Introduzione</b>  | <b>Pag. 5</b>  |
| • <b>Capitolo 1 - Rocce di faglia</b>  | <b>Pag. 7</b>  |
| 1.1 – Premessa   | Pag. 7         |
| 1.2 – Classificazione delle rocce di faglia  | Pag. 8         |
| 1.3 – Microstruttura e principali meccanismi deformativi delle rocce di faglia                                       | Pag. 17        |
| 1.3.1 – Cataclasi e flusso cataclastico  | Pag. 18        |
| 1.3.2 – Plasticità   | Pag. 19        |
| 1.3.3 – Dissoluzione e riprecipitazione (Pressure solution)  | Pag. 24        |
| 1.4 – Considerazioni conclusive  | Pag. 25        |
| • <b>Capitolo 2 – Il sistema di faglie Pusteria e Sprechenstein intercettato dalla Galleria di Base del Brennero</b> | <b>Pag. 26</b> |
| 2.1 – Inquadramento progettuale della Galleria di Base del Brennero  | Pag. 26        |
| 2.2 – Il Lineamento Periadriatico  | Pag. 28        |
| 2.3 – Il sistema di faglie Sprechenstein e Pusteria  | Pag. 30        |
| 2.4 – Unità geologiche nell'area di influenza della faglia   | Pag. 33        |
| • <b>Capitolo 3 – Caso di studio: caratterizzazione delle rocce di faglia alla macro e meso-scala</b>                | <b>Pag. 35</b> |
| 3.1 – Premessa   | Pag. 35        |
| 3.2 – Sondaggi meccanici in avanzamento nel cunicolo esplorativo   | Pag. 35        |
| 3.2.1 – Sondaggio SAV6   | Pag. 36        |
| 3.2.2 – Sondaggio SAV7   | Pag. 38        |
| 3.3 – Caratterizzazione alla macro-scala: Rock Quality Designation (RQD)   | Pag. 41        |
| 3.4 – Caratterizzazione alla meso-scala: le prove geotecniche  | Pag. 48        |

|   |                 |
|---|-----------------|
| 3.4.1 – Prova di compressione monoassiale   | Pag. 48         |
| 3.4.2 – Prova di trazione indiretta   | Pag. 51         |
| 3.4.3 – Prova a carico concentrato (Point Load Test)  | Pag. 53         |
| 3.4.4 – Velocità di propagazione onde S e P   | Pag. 54         |
| 3.4.5 – Prova di taglio diretto   | Pag. 56         |
| 3.4.6 – Slake Durability Test   | Pag. 57         |
| 3.5 – Considerazioni conclusive   | Pag. 59         |
| • <b>Capitolo 4 – Caratterizzazione alla micro-scala</b>  | <b>Pag. 61</b>  |
| 4.1- Strumentazione   | Pag. 62         |
| 4.2- Standardizzazione dell'analisi petrografica ai fini ingegneristici   | Pag. 66         |
| 4.3- Sezioni sottili delle rocce di faglia del cunicolo esplorativo   | Pag. 67         |
| 4.3.1 – Caratteristiche mineralogiche   | Pag. 67         |
| 4.3.2 – Evidenze di alterazione fisica e chimica  | Pag. 80         |
| • <b>Capitolo 5 – Correlazione tra le caratteristiche microscopiche ed i parametri di resistenza della roccia</b> | <b>Pag. 91</b>  |
| 5.1 – Analisi di immagini digitali con MATLAB®  | Pag. 91         |
| 5.2 – Calcolo della percentuale di vuoti della sezione sottile  | Pag. 92         |
| 5.2.1 – Identificazione dei pixel bianchi e neri  | Pag. 95         |
| 5.2.2 – Effetti di bordo  | Pag. 101        |
| 5.2.3 – Filtraggio dei falsi vuoti  | Pag. 102        |
| 5.2.4 – Validazione dell'algoritmo  | Pag. 110        |
| • <b>Capitolo 6 – Discussione dei risultati e utilizzo applicativo</b>  | <b>Pag. 113</b> |
| 6.1 – Risultati ottenuti  | Pag. 113        |
| 6.2 – Utilizzo applicativo delle grandezze ricavate   | Pag. 119        |
| 6.2.1 – Il criterio di Hoek&Brown: il problema della stima del parametro $m_i$                                    | Pag. 120        |
| • <b>Conclusioni</b>  | <b>Pag. 130</b> |
| • <b>Allegati</b>   | <b>Pag. 134</b> |
| • <b>Bibliografia</b>   | <b>Pag. 150</b> |



# Abstract

The goal of this study is to obtain a complete full-scale characterization of faults rocks involved in the excavation works of Brenner Base Tunnel, which crosses one of the main tectonic alignments of the alpine area, the Periadriatic fault.

The presence of faults along the layout of an underground structure causes significant problems for its realization. Rock masses are often so fractured that they behave like soils and they are usually affected by structural, geological and hydrogeological problems within underground works.

In this study, the characterization was carried out at different scale, from macro to meso and micro scale.

At the macro-scale, the geological survey allowed to recognize the main rocks lithotypes (i.e.: Tonalities, Gneiss, Scists, Cataclasits and Quartzites). Besides, on the strength of advancing drilling, the fracturing degree was evaluated through the RQD index and the global rock mass quality was assessed by reference to RMR and GSI geomechanical classifications.

At the meso-scale, lab tests on several samples collected in the drilling tests were carried out to characterize the geomechanical behavior and strength of the intact rock specimen at different distance from the fault core.

Moving through a micro-scale characterization, thin sections of the fault rocks were analyzed in order to find a correlation between the different scales properties of the rocks. In particular, the voids ratio on the thin section was chosen as a physical feature representative of the micro-scale arrangement, and a mathematical algorithm able to recognize and measure voids on the section was implemented, calibrated and later on validated.

Finally, a relation between the voids ratio at the micro-scale and the fault rocks at the macro scale was pointed out by mean of the Hoek&Brown failure criterion. As a result, using micro-scale properties, whose cost is much lower than the cost of geotechnical tests, good estimation of the fault rock strength was achieved, avoiding quite typical overestimation arising from the use of literature values.

**Keywords:** Brennero Base Tunnel, compressive strength, fault rocks, geomechanical classification, Italy, thin section.

## Riassunto

Scopo della presente tesi è quello di fornire un'esauriente classificazione geomeccanica delle rocce di faglia coinvolte negli scavi della Galleria di Base del Brennero, opera che attraversa il principale lineamento tettonico dell'area alpina, il Lineamento Periadriatico.

La presenza di rocce di faglia lungo il progetto di una galleria è causa di non pochi problemi relativi alla sua realizzazione. Gli ammassi rocciosi sono talvolta così fratturati da comportarsi come terreni sciolti e sono spesso affetti da problemi di natura geologica, strutturale e idrogeologica nel corso della realizzazione degli scavi.

È stata condotta una caratterizzazione di tali rocce di faglia alle differenti scale, dalla macro, alla meso, sino alla micro-scala. In particolare, alla macro-scala, grazie ai sondaggi in avanzamento, è stato possibile identificare i principali litotipi coinvolti (Tonaliti, Scisti, Gneiss, Cataclasiti e Quarziti). Parallelamente, attraverso la resistenza di avanzamento agli scavi degli ammassi rocciosi, è stato possibile valutarne l'indice di qualità RQD.

Alla meso-scala, sono stati analizzati i risultati delle prove geotecniche di laboratorio sui campioni di roccia intatta, al fine di caratterizzarne il comportamento geomeccanico e la resistenza alle varie distanze dalla zona centrale di faglia.

Passando alla micro-scala, sono state analizzate le sezioni sottili del tratto di scavo indagato in modo da ricavare una correlazione tra le diverse grandezze delle rocce di faglia alle differenti scale. In particolare, quale grandezza rappresentativa della micro-scala è stata scelta la percentuale di vuoti nella sezione sottile. A tale proposito, è stato sviluppato un algoritmo di analisi di immagini digitali, calibrato e successivamente validato.

Infine, quale riscontro applicativo, è stata sviluppata una correlazione tra la percentuale di vuoti alla micro-scala e le caratteristiche di resistenza degli ammassi rocciosi, attraverso il criterio di HoekBrown. Come risultato, usare le grandezze rappresentative della scala micro, caratterizzate da costi decisamente inferiori rispetto alle prove geotecniche, è stata ottenuta una buona stima delle resistenze di ammasso, superando le sovrastime tipiche dei valori di letteratura.

**Parole chiavi:** Galleria di Base del Brennero, resistenza alla compressione, rocce di faglia, sezioni sottili, caratterizzazione geomeccanica, Italia.



# Introduzione

La crescente necessità di realizzare opere in sotterraneo ha portato negli ultimi decenni alla realizzazione di gallerie che attraversano contesti geologici estremamente complessi. In particolare nell'area alpina, la costruzione di gallerie implica l'attraversamento di importanti zone di faglia.

Ovviamente, come per la realizzazione di qualsiasi opera di ingegneristica, è quindi necessario pervenire ad una stima affidabile delle caratteristiche di resistenza e deformabilità delle rocce di faglia interessate dal progetto. Per contro, la caratterizzazione del comportamento meccanico delle rocce di faglia è generalmente molto difficile, a causa della difficoltà nel campionamento e nella preparazione dei campioni. Di conseguenza, il comportamento meccanico di queste rocce è ancora oggi poco conosciuto, benché esse condizionino fortemente metodi, tempi e costi di realizzazione dell'opera.

Lo scopo primario della tesi è quello di caratterizzare, da punto di vista geomeccanico e alle differenti scale queste rocce di faglia, con particolare riferimento a quelle connesse al Lineamento Periadriatico dalla Galleria di Base del Brennero.

A questo scopo, la zona di studio verrà caratterizzata da un punto di vista tettonico e strutturale a diverse scale (macro, meso e micro), con l'obiettivo di giungere ad una caratterizzazione meccanica delle rocce di faglia utile ai fini progettuali.

In particolare, grazie alle indagini in avanzamento, al cunicolo esplorativo e ai risultati delle prove di laboratorio, sarà possibile caratterizzare la zona di faglia in termini di

stato di fratturazione e resistenza meccanica, caratterizzando così l'area alla macro e meso-scala.

Successivamente, si passerà allo studio microscopico petrografico e strutturale delle rocce di faglia interessate, grazie all'analisi delle sezioni sottili. Da queste, si ricaverà una grandezza microstrutturale rappresentativa correlabile con le caratteristiche meccaniche delle rocce alla meso e macro-scala.

Dopo aver presentato un confronto tra le caratteristiche alla diversa scala, si farà riferimento al criterio di rottura di Hoek-Brown, ampiamente utilizzato nella pratica ingegneristica negli ultimi decenni per descrivere il comportamento di ammassi rocciosi fratturati. Nello specifico, verranno adottate tre diverse varianti di un parametro empirico coinvolto nel criterio, sulla base di valori di letteratura, prove geotecniche e caratteristiche microscopiche.

# Capitolo 1

## Rocce di faglia

### 1.1 Premessa

Le rocce di faglia rappresentano una particolare tipologia di *rocce deboli*, cioè caratterizzate da una resistenza a compressione variabile tra i 2 e i 20 MPa, stando alla classificazione suggerita dall'ISRM (International Society for Rock Mechanics, 1999).

In particolare, le rocce di faglia sono rocce deboli a causa di fenomeni tettonici. Le sollecitazioni tettoniche, che agiscono su di un ammasso roccioso, possono determinare uno stato di fratturazione e/o alterazione dell'ammasso stesso che dipende dall'entità degli sforzi e dalle caratteristiche litologiche della roccia. Tale stato di alterazione e/o fratturazione comporta un decadimento delle proprietà geomeccaniche del materiale che talvolta può essere causa di significativi problemi nella realizzazione di opere in sotterraneo.

Le principali problematiche associate all'intercettazione di rocce di faglia durante un'escavazione in sotterraneo sono le seguenti:

- Ridotti tempi di auto sostegno della cavità
- Inabilità del fronte
- Elevate convergenze radiali
- Fenomeni di squeezing, soprattutto in presenza di elevate pressioni di confinamento e venute d'acqua.

Il comportamento geomeccanico delle rocce di faglia, e quindi il loro impatto sulla progettazione e realizzazione delle opere in sotterraneo, dipende dal tipo di processo

deformativo che ha interessato la roccia, cioè da come la roccia ha risposto alla deformazione tettonica.

Dopo averne esposto la classificazione riportata nella letteratura, nel presente capitolo vengono analizzati i principali meccanismi deformativi che possono avere interessato le rocce di faglia, con particolare riferimento alle derivanti microstrutture visibili in sezione sottile attraverso l'ausilio di un appropriato microscopio.

## **1.2 Classificazione delle rocce di faglia**

Le rocce di faglia si rinvencono comunemente in corrispondenza di zone fratturate e deformate che si distinguono sulla base della classificazione introdotta per la prima volta da Sibson negli anni '70, successivamente rivista e perfezionata. Possono essere distinte diverse tipologie di zone di frattura:

- Zone di frattura duttili (*ductile shear zone*)
- Zone di frattura fragili (*brittle shear zone*)
- Zone di transizione (*brittle-ductile shear zone*)

Le zone di frattura duttili sono costituite da bande di scorrimento e le strutture caratteristiche di queste zone sono rappresentate da pieghe (fig. 1.1a). Le zone di frattura fragili, invece, possono essere costituite da: brecce di frizione (fig. 1.1b), frammenti, kink bands, miloniti e pseudotachiliti [Cancelli et al; 2003].

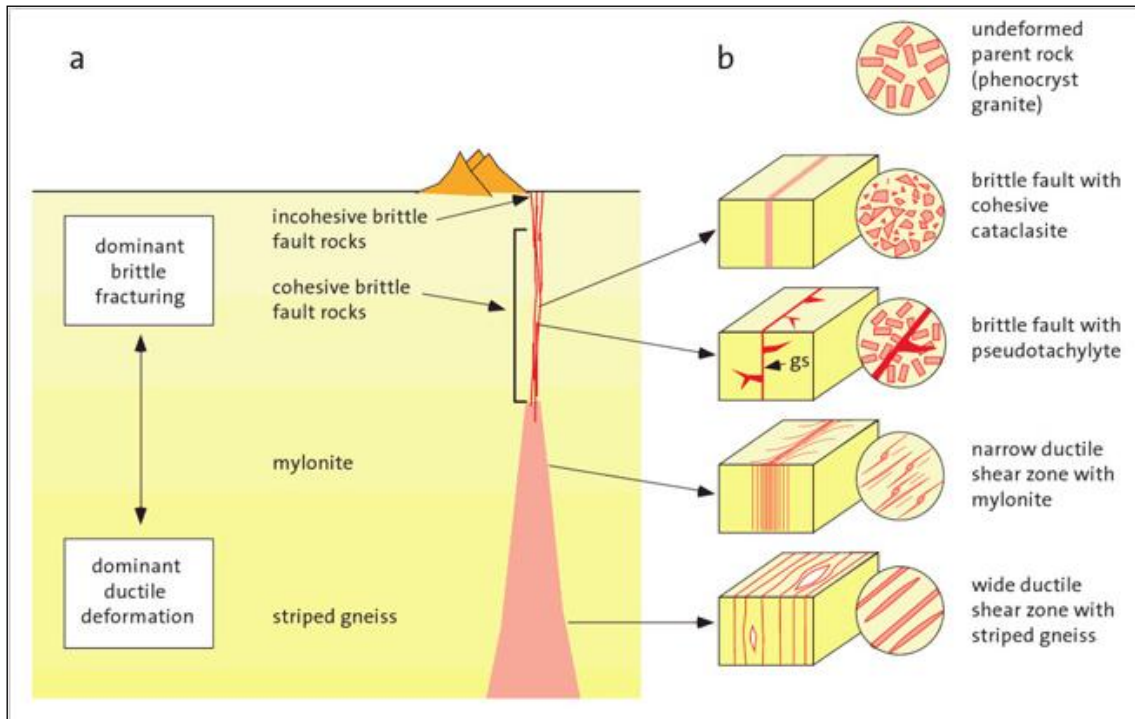




**Fig. 1.1: (a) pieghe (b) brecce di frizione [Cancelli et. al. 2003]**

Il comportamento degli ammassi rocciosi adiacenti una zona di faglia, può essere duttile o fragile a seconda delle condizioni al contorno esterne (pressione, temperatura, strain) e interne (litologia, minerali).

La transizione tra comportamento fragile e duttile dipende anch'essa da molti fattori come strain rate, gradiente geotermico, tessitura, composizione della roccia, pressione di fluidi, orientazione del campo di stress ed orientazione del fabric preesistente (fig. 1.2). Normalmente si osserva un comportamento fragile degli ammassi rocciosi in superficie per poi passare a duttile in profondità.



**Fig. 1.2:** a) sezione schematica di una zona di taglio nella crosta: all'aumentare della profondità si passa da zone a comportamento fragile a zone a comportamento duttile; b) principali tipologie di rocce associate alla zona di taglio in base alla profondità (Passchier, Trouw; 2005).

In letteratura è da anni riconosciuta una precisa terminologia utilizzata per le rocce che hanno subito deformazione in zone di taglio (Sibson, 1977) (Tab. 1.1).

| Rocce con fabric casuale |   | Rocce foliate        |                                     |                             |
|--------------------------|---|----------------------|-------------------------------------|-----------------------------|
| Deformazione fragile     |   | Deformazione duttile |                                     |                             |
| Nome                     | Meccanismo deformativo                                    | Nome                 | Meccanismo deformativo              |                             |
| non coesive              | Breccia (frammenti visibili > 30% della matrice rocciosa) | Gouge foliato        | Cataclasi                           |                             |
|                          | Gouge (frammenti visibili < 30% della matrice rocciosa)   |                      |                                     |                             |
| coesive                  | Pseudotachilite (roccia vetrosa)                          | Tettonite            | Dissoluzione e riprecipitazione     |                             |
|                          | Breccia (0-10% di matrice rocciosa)                       | Cataclasi            | Milonite                            |                             |
|                          | Protocataclasite (10-50% di matrice rocciosa)             | Cataclasi            | Protomilonite (0-10% della roccia)  | Plasticità intracristallina |
|                          | Cataclasite (50-90% di matrice rocciosa)                  | Cataclasi            | Milonite (10-50% della roccia)      | Plasticità intracristallina |
|                          | Ultracataclasite (90-100% di matrice rocciosa)            | Cataclasi            | Ultramilonite (50-90% della roccia) | Plasticità intracristallina |

**Tab 1.1: Tabella della classificazione delle rocce di faglia e successive modifiche [Sibson, 1977 et al.]**

ROCCE DI FAGLIA A COMPORTAMENTO FRAGILE

Le rocce di faglia a comportamento fragile sono caratterizzate da un fabric casuale e si suddividono in coesive e non coesive.

Le rocce di faglia *non coesive* si trovano nei livelli superficiali della crosta terrestre; in questo caso la classificazione si basa sulla granulometria del prodotto di faglia che quindi si suddivide in:

- Breccia di faglia
- Gouge di faglia

La breccia presenta più del 30% in volume di frammenti di roccia separati da una matrice a grani fini. Un gouge di faglia, invece, presenta pochi e larghi frammenti a

forma lenticolare all'interno di una matrice fine (sabbiosa o argillosa), che può essere foliata.

Le rocce di faglia *coesive* si suddividono in:

- Breccia
- Protocataclasite
- Cataclasite coesiva
- Ultracataclasite
- Pseudotachilite

La natura coesiva della roccia deriva dalla precipitazione di minerali come il quarzo, calcite, clorite e K – feldspato. Normalmente, in campagna, le breccie e le cataclasiti coesive sono più difficilmente identificabili rispetto alle rocce di faglia non coesive; ad esempio una cataclasite non coesiva in roccia di quarzite mostra evidenti contrasti facilmente interpretabili ad occhio nudo, mentre una cataclasite coesiva si differenzia dalla roccia indeformata solamente per una gradazione più scura di colore.

Il contatto tra la roccia di faglia e la roccia intatta è spesso sottolineato da un graduale decrescere dell'intensità di deformazione. Cataclasite e breccia coesiva comunemente presentano evidenze di abbondante *pressure solution* ed effetti di precipitazione. Infatti sono comuni vene di quarzo, calcite, epidoto, clorite e, in rocce ultramafiche, anche serpentino. Queste vene si formano durante e dopo la deformazione fragile, quindi possono presentarsi a loro volta fratturate e deformate.

Sebbene la maggior parte delle cataclasiti abbiano fabric casuale, cataclasiti foliate si possono sviluppare specialmente dove la roccia incassante è ricca di mica (Passchier e Trouw; 2005).

Le rocce di faglia coesive vengono classificate usando come parametro la percentuale di matrice. Le breccie hanno una percentuale di matrice che va dallo 0% al 10%. Se una roccia possiede dal 10% al 50% di matrice è definita protocataclasite, dal 50% al 90% è

detta cataclasite, se possiede una percentuale maggiore del 90% viene definita ultracataclasite (Sibson, 1977).

La pseudotachilite è una roccia di faglia a grana fine e vetrificata, con un fabric ben definito (Passchier, Trouw; 2005). Tale termine venne utilizzato per la prima volta nel 1916 da Shad per descrivere rocce vetrose di colore scuro, simili ai vetri basaltici ma che si rinvencono in ambienti di faglia. Esse sono state rinvenute in una grande varietà di rocce e di ambienti geodinamici: zone di faglia, zone di impatto di meteoriti, colate piroclastiche, grandi frane collegate al collasso di grandi strutture. Le pseudotachiliti che si rinvencono in zone di taglio sono dette pseudotachiliti tettoniche e sono le più comuni; esse sono il prodotto della frantumazione e della frizione che induce fusione, lungo una superficie di faglia durante venti sismici. Per definizione infatti le pseudotachiliti sono rocce di faglia che mostrano evidenze di fusione.

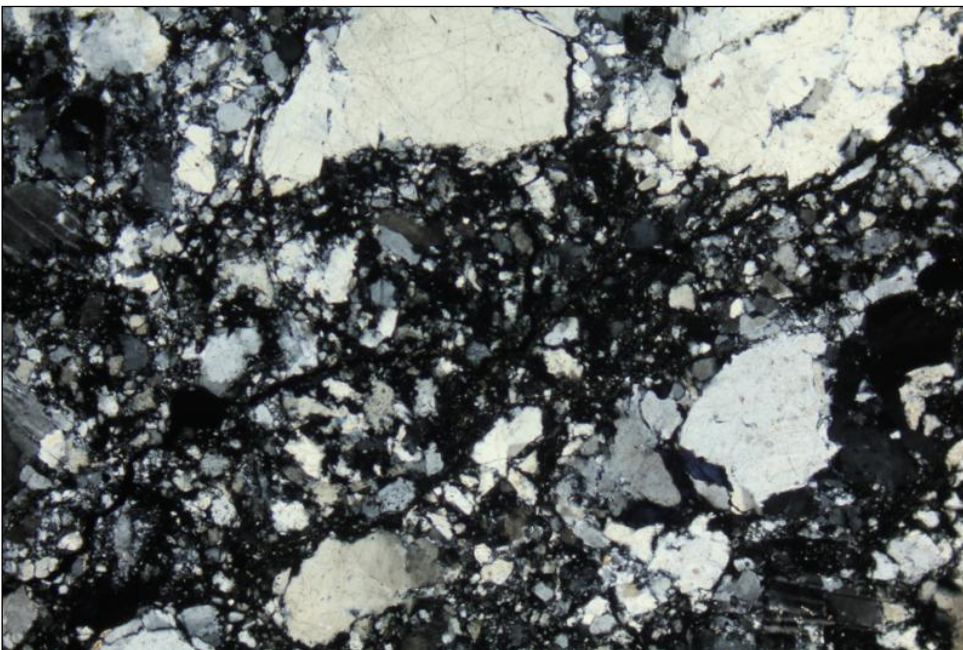
Presentano una struttura cristallina vetrosa contenente frammenti di diverse dimensioni della roccia ospite. Tali frammenti però non sono diagnostici della roccia ospite in quanto durante la formazione delle pseudotachiliti, i minerali della roccia madre fondono o vengono frammentati in modalità diversa a seconda del loro punto di fusione e della loro durezza. Molto comuni risultano essere i frammenti di quarzo e plagioclasio, che presentano forme spigolose o arrotondate.

Di seguito si riportano alcune illustrazioni di sezioni sottili di una roccia granitica cataclasata, rispettivamente a nicols paralleli (fig. 1.3) ed incrociati (fig. 1.4) e successivamente di una pseudotachilite (fig. 1.5).

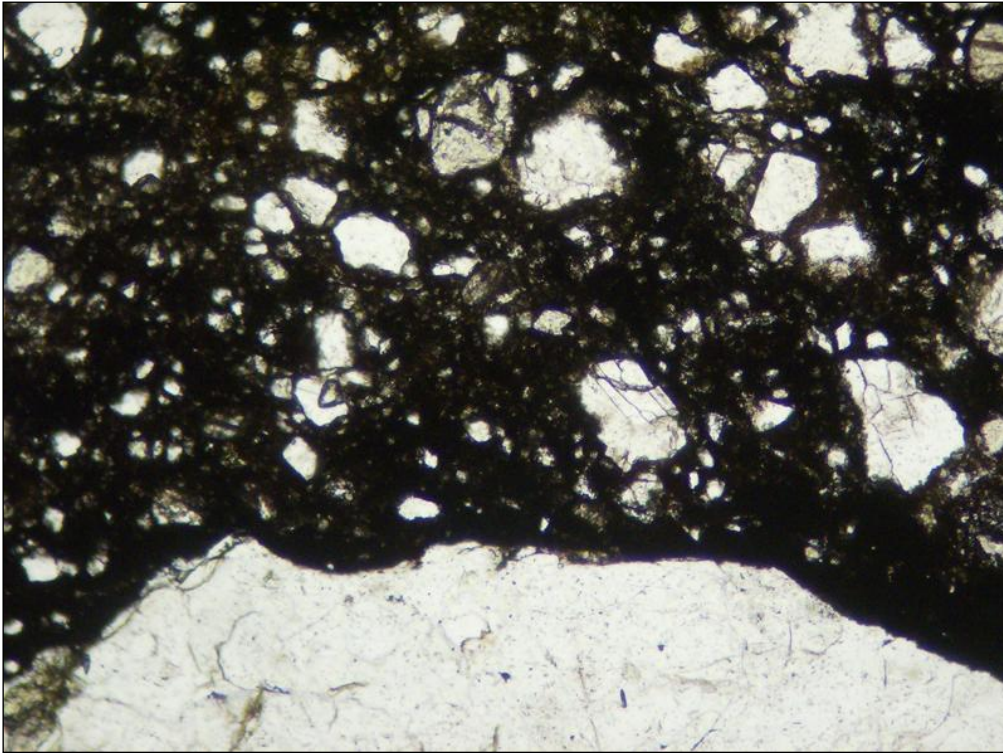




**Fig. 1.3: Cataclasite granitica: cristalli frammentati e angolosi. Immagine a N//, 2x (lato lungo = 7mm) [Portale di petrografia on-line, A. Da Mommio website]**



**Fig. 1.4: Cataclasite granitica: cristalli frammentati e angolosi. Immagine a NX, 2x (lato lungo = 7mm) [Portale di petrografia on-line, A. Da Mommio website]**



**Fig. 1.5: Pseudotachilite derivante da un quarzo-scisto: il materiale nero è vetro. Immagine a N//, 2x (lato lungo = 7mm) [Portale di petrografia on-line, A. Da Mommio website]**

#### ROCCE DI FAGLIA A COMPORTAMENTO DUTTILE

Le rocce di faglia a comportamento duttile sono essenzialmente le miloniti. Il termine milonite è strettamente a valenza strutturale che si riferisce unicamente al fabric della roccia e non alla composizione mineralogica. Si formano a partire da qualsiasi tipologia di roccia ad una profondità compresa tra 10 – 15 km ed oltre, alla temperatura di 250 – 350°C.

Si tratta di rocce foliate costituite da una matrice molto fine e da porfiroclasti, che si sviluppano a causa della differenza di reologia tra i minerali che costituiscono la roccia stessa. Minerali relativamente “duri” formano i porfiroclasti, quelli più “teneri” vanno a costituire la matrice. Il contatto tra una zona a miloniti e la roccia incassante tende ad avere un passaggio a fabric graduale.

Le miloniti possono essere riconosciute sul campo grazie alla dimensione dei piccoli grani e dalle foliazioni planari e lineamenti rettilinei inusualmente regolari della matrice rocciosa (fig. 1.6).



**Fig. 1.6: Campione di milonite: forte deformazione della roccia [AGU, American Geophysical Union]**

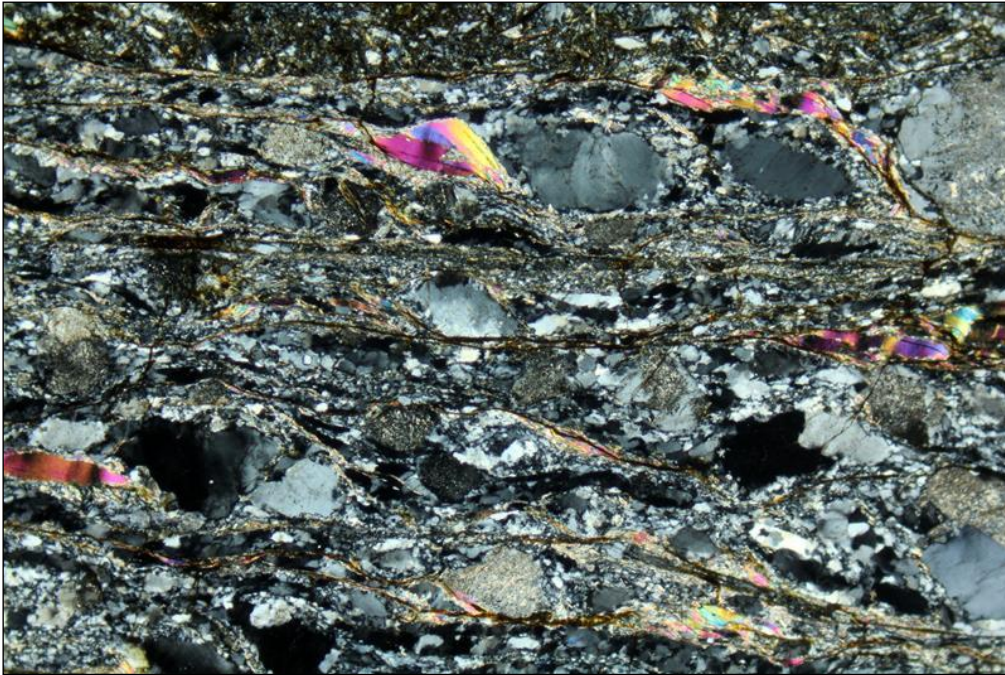
Una comune classificazione si basa sulle percentuali di matrice e di porfiroclasti. Rocce con 0-10% di matrice sono classificate come proto-miloniti, con 10-50% di matrice sono dette miloniti (fig. 1.7); rocce con 50-90% di matrice sono dette ultramiloniti [Passchier et al., 2005].

Tra le rocce di faglia a comportamento duttile, caratterizzate da un fabric foliato, si classificano anche:

- Gouge foliato
- Tettonite

Le prime formatesi a seguito di un meccanismo deformativo cataclastico, le seconde formatesi per dissoluzione e riprecipitazione.





**Fig. 1.7: Milonite granitica del Buthan (Himalaya): porfiroclasti di feldspato e mica immersi in una matrice a grana fina composta essenzialmente da quarzo deformato. Immagine a NX, 2x (lato lungo = 7mm) [Portale di petrografia on-line, A. Da Mommio website]**

### **1.3 Microstruttura e meccanismi deformativi principali delle rocce di faglia**

Il modo in cui una roccia sottoposta a sollecitazione si deforma è funzione di numerosi fattori sia esterni (quali temperatura, pressione, stress applicato, presenza di fluidi, ecc.) sia propri della roccia (quali composizione mineralogica, dimensioni dei granuli, porosità permeabilità, ecc). L'insieme dei processi attivi in una roccia sottoposta a deformazione definiscono un meccanismo deformativo e producono microstrutture caratteristiche. Pertanto, l'identificazione del meccanismo deformativo si basa sul riconoscimento delle microstrutture che esso produce.

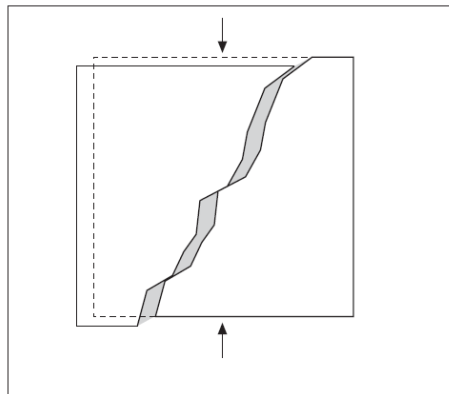
I possibili meccanismi deformativi che possono operare in rocce di faglia sono:

- **Cataclasi** – fratturazione, perdita di coesione e scivolamento tra i granuli.
- **Plasticità** – deformazione intracristallina.

- **Dissoluzione e riprecipitazione (*pressure solution*)** – diffusione e trasporto di materia favorito dalla presenza di fluidi intergranulari.

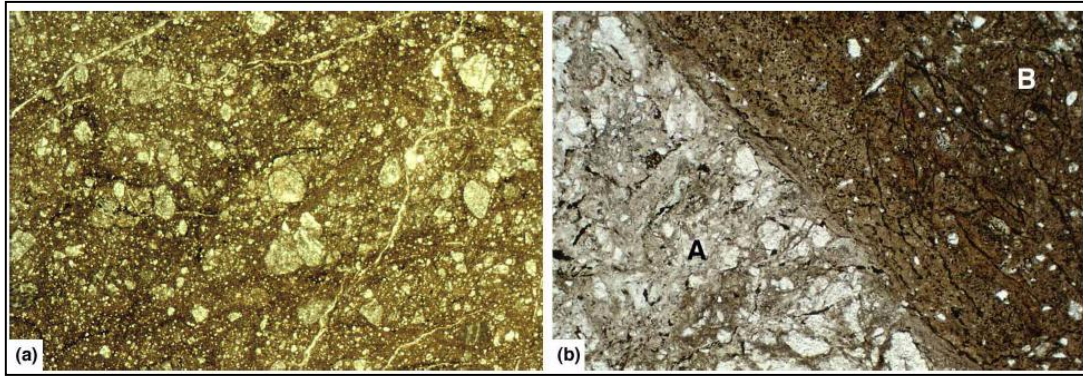
### 1.3.1 Cataclasi e flusso cataclastico

La cataclasi è un meccanismo deformativo in cui le dimensioni dei grani diminuiscono a seguito dello sviluppo di microfratture a tutte le scale, lungo le quali si ha scivolamento. Questo processo porta ad un aumento di volume (dilatanza) (fig. 1.8), allo scivolamento relativo tra i grani lungo le fratture e alla rotazione passiva tra i grani o i frammenti di grani.



**Fig. 1.8: fratturazione di un cristallo e scivolamento delle due parti. Se la frattura non è una superficie piana si avrà la formazione di vuoti (in colore grigio) che portano ad un aumento di volume (dilatanza). [Conti, 2003]**

In genere durante questo processo si ha una diminuzione della grana e del grado di selezionamento della roccia, con un più ampio spettro di dimensioni dei granuli (fig. 1.9a). La struttura cristallografica interna dei singoli cristalli non cambia durante questo processo. Lo scivolamento lungo le fratture o tra i granuli è funzione della sollecitazione normale applicata, così come la dilatanza. Ne consegue che la possibilità di una roccia di deformarsi per cataclasi, è funzione della pressione effettiva (differenza tra pressione litostatica e dei fluidi) a cui la roccia è sottoposta e quindi della profondità, mentre, temperatura, velocità di deformazione e composizione della roccia sono di importanza subordinata.



**Fig. 1.9: (a) Cataclasite in un calcare. (b) Zona di contatto tra un cataclasite (A) e una pseudotachilite (B). [Conti, 2003].**

La temperatura diventa importante solo se a seguito di deformazioni estremamente veloci essa può aumentare molto, fino a produrre una parziale fusione della roccia formando così le pseudotachiliti (fig. 1.9b), di cui si è già discusso nel paragrafo precedente in merito alla classificazione delle rocce di faglia. Il contatto tra la pseudotachilite e la roccia incassante è generalmente netto, come in figura 1.9b.

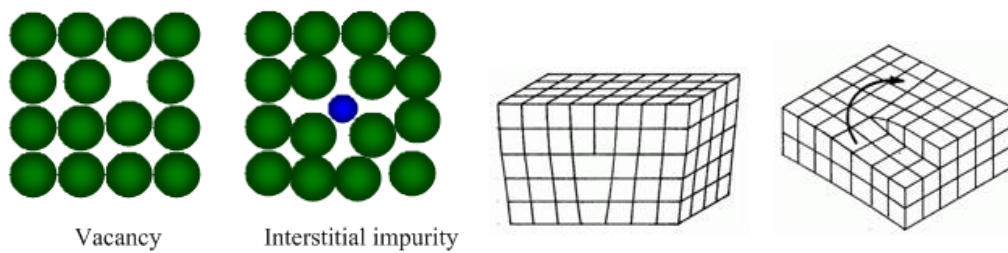
Il meccanismo deformativo di cataclasi può essere attivo in una deformazione localizzata, ad esempio lungo faglie o in zone di taglio. La cataclasi può operare anche in deformazioni non localizzate, con una deformazione distribuita in una più ampia fascia; in questo caso si parla di *flusso cataclastico* [Conti, 2003].

### 1.3.2 Plasticità

Plasticità è un termine che comprende meccanismi deformativi la cui deformazione è intragranulare e legata al movimento di dislocazioni all'interno del cristallo.

I cristalli, infatti, sono spesso affetti da "difetti" che riguardano il reticolo cristallino; tali difetti possono essere suddivisi in due categorie: difetti puntuali e difetti lineari o dislocazioni. I primi possono rappresentare atomi o molecole mancanti o eccedenti all'interno del reticolo cristallino e prendono il nome di "vacanze" e "atomi interstiziali"; i difetti lineari invece costituiscono l'aggiunta o l'assenza di un intero piano nel reticolo (fig. 1.10).

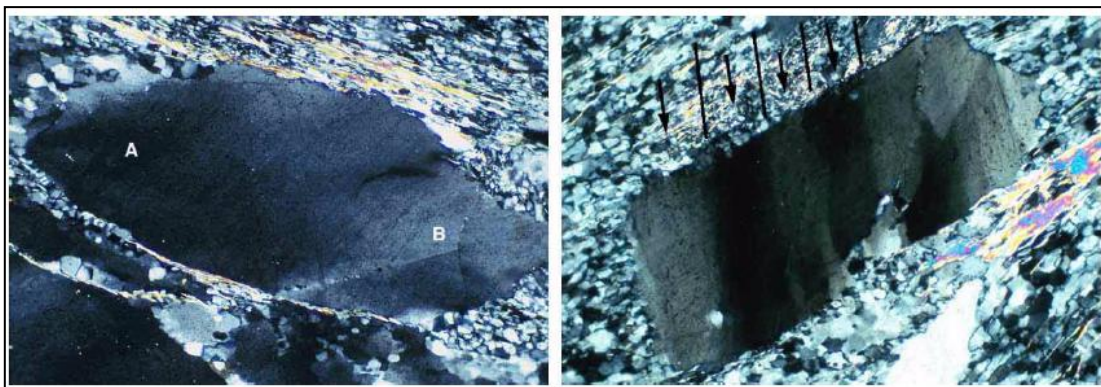




**Fig. 1.10:** a) esempio di difetto puntuale all'interno del reticolo cristallino: vacanza e molecola interstiziale; b) esempi di difetti lineari: dislocazione a spigolo a sinistra e dislocazione a vite a destra [Passchier et. al., 2005].

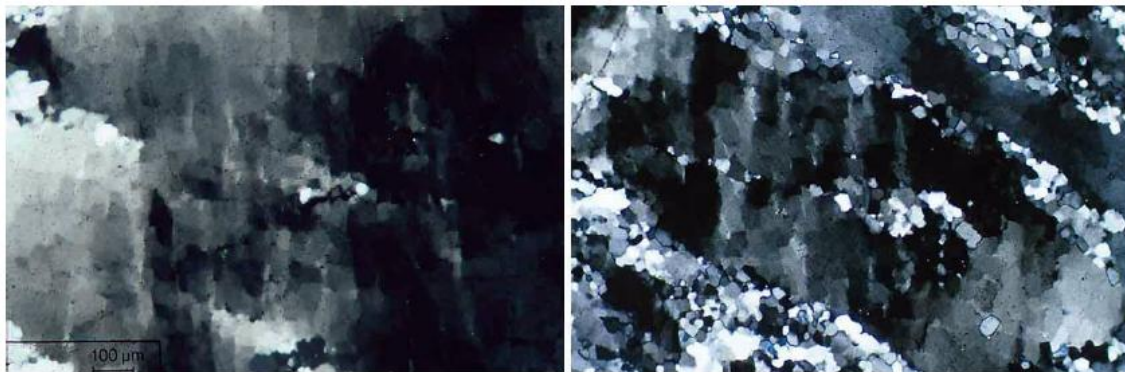
Il meccanismo deformativo di plasticità può essere a sua volta suddiviso in *dislocation glide* e *dislocation creep*.

DISLOCATION GLIDE – durante una deformazione plastica per dislocation glide si ha nucleazione e movimento di dislocazioni sempre sui piani reticolari, senza movimento verticale di dislocazioni. L'interazione tra dislocazioni all'interno di un piano reticolare rende difficoltoso il loro ulteriore movimento, pertanto il dislocation glide porta alla cataclasi se si ha aumento di sollecitazione. Questo meccanismo è tipico a basso stress e basse temperature. Micostrutture tipiche di dislocation glide sono estinzione ondulata (fig. 1.11a), bande di deformazione (fig. 1.11b), kink band, geminati di deformazione.



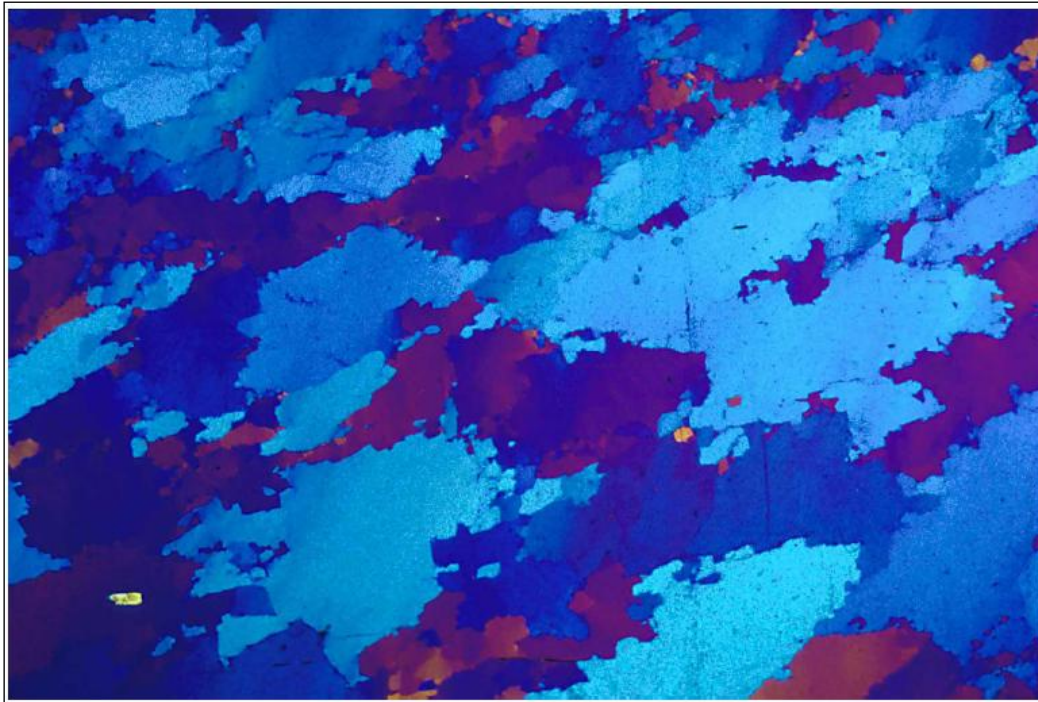
**Fig. 1.11:** (a) Porfiroclasto di quarzo con evidenze di estinzione ondulata. Graduale variazione di illuminazione tra l'area A e l'area B indicativa di una graduale variazione di orientazione tra le due parti del reticolo cristallino. (b) Porfiroclasto di quarzo con *deformation band*. La variazione di illuminazione tra le varie parti del cristallo è netta e si individuano bande nel cristallo con uguale illuminazione, cioè con uguale orientazione cristallografica. [Conti; 2003].

DISLOCATION CREEP – durante una deformazione plastica per dislocation creep, nucleazione e movimento avvengono su piani reticolari differenti all'interno del cristallo (*climb*). La continua eliminazione e riorganizzazione di dislocazioni all'interno del reticolo cristallino porta alla formazione di subgrani (fig. 1.12a), di grani (fig. 1.12b) e alla migrazione dei limiti tra i grani (grain boundary migration, fig. 1.13) [Passchier et al.; 2005].

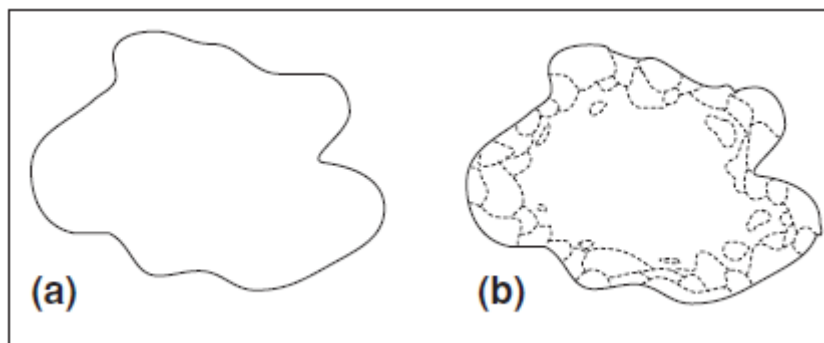


**Fig. 1.12: (a) Inizio dello sviluppo di subgrani all'interno di un cristallo di quarzo. (b) Fase di avanzata formazione di subgrani e nuovi grani all'interno di un singolo cristallo di quarzo. [Passchier; Trow; 2005].**

Il dislocation creep è attivo a medie ed alte temperature. La transizione da dislocation glide a dislocation creep è fortemente influenzata dalla temperatura, mentre la dimensione finale dei granuli dipende dalla granulometria iniziale e dallo stress differenziale applicato, e solo subordinatamente dalla temperatura e dalla velocità di deformazione. La formazione di nuovi grani per dislocation creep avviene partendo dalle zone esterne del cristallo originario; in questo modo si possono osservare cristalli in cui il nucleo è preservato ed è circondato da subgrani e grani di dimensioni minori (struttura *core-mantle* fig. 1.14). Subgrani e nuovi grani sono pertanto strutture indicative di deformazione mediante dislocation creep con alti valori di strain, anche se internamente ai cristalli non vi sono evidenze ottiche di deformazione (fig. 1.15).

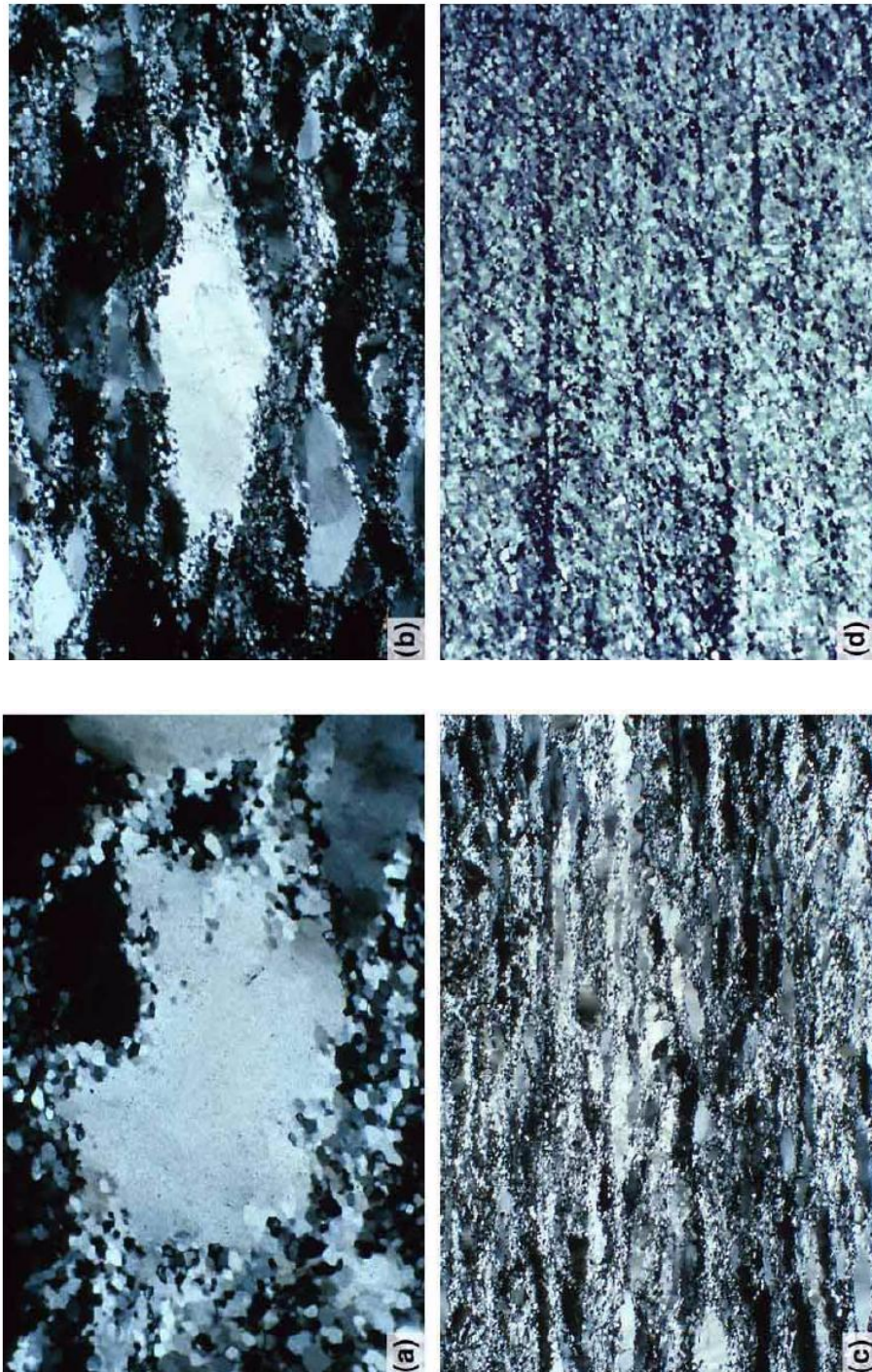


**Fig. 1.13:** Quarzite ricristallizzata per grain boundary migration [Conti, 2003].



**Fig. 1.14:** struttura core-mantle in un cristallo ricristallizzato dinamicamente [Passchier et. al, 2005].





**Fig. 1.15: Microstrutture in quarzite deformate plasticamente. (a) A bassa deformazione si osservano nuovi granuli ricristallizzati che circondano grani in deformati. (b), (c) All'aumentare della deformazione aumentano i grani ricristallizzati, pochi grani in deformati sopravvivono. (d) Ad alto strain viene eliminata ogni microstruttura precedente e la roccia è formata solo da grani ricristallizzati per rotazione. Non si notano orientazioni preferenziali della forma dei grani. [Conti; 2003].**

Sulla base di quanto detto sinora è possibile comprendere tutte le microstrutture che si formano durante una deformazione in cui il meccanismo deformativo è quello della plasticità. La più importante osservazione è che una deformazione plastica è sempre accompagnata da ricristallizzazione, detta ricristallizzazione dinamica. Tale processo è il modo con cui il cristallo riduce la propria energia elastica interna dovuta al numero di dislocazioni presenti. La densità di dislocazioni viene diminuita e mantenuta a valori bassi da:

- Movimento delle dislocazioni sui piani di scorrimento e loro riorganizzazione in subgrani e limiti tra i grani (ricristallizzazione per rotazione).
- Migrazione dei limiti tra i grani da zone del cristallo a bassa densità di dislocazione verso zone ad alta densità di dislocazione con conseguente accrescimento del cristallo meno deformato a spese di quello più deformato (grain boundary migration).

La ricristallizzazione per rotazione avviene a temperature basse e porta ad una diminuzione della grana della roccia; la ricristallizzazione per grain boundary migration avviene a temperature medio-alte e porta ad una diminuzione o ad un aumento della grana della roccia, a seconda delle dimensioni iniziali dei grani. Oltre ai caratteri microstrutturali già visti (estinzione ondulata, deformation band, subgrani, grani) la ricristallizzazione dinamica conduce allo sviluppo di foliazioni complesse e orientazioni cristallografiche preferenziali nella roccia.

### **1.3.3 Dissoluzione e riprecipitazione (*pressure solution*)**

Questo meccanismo implica il trasporto di materia mediante una fase fluida intergranulare in cui un minerale può entrare in soluzione e da cui successivamente può ricristallizzare. Dissoluzione e riprecipitazione sono particolarmente efficienti se la grana della roccia è piccola e sono fortemente influenzati dalla presenza di e composizione della fase fluida e dalla composizione nonché permeabilità della roccia. È un meccanismo molto diffuso in rocce in condizioni di bassa temperatura e pressione. Grazie a questo processo il granulo cambia forma per dissoluzione e precipitazione locale, senza subire deformazione interna [Passchier e Trouw, 2005].



## 1.4 Considerazioni conclusive

L'analisi dei meccanismi deformativi interessanti le rocce di faglia nonché l'assetto microstrutturale che ne deriva, permetterà nei capitoli successivi di effettuare una attenta analisi alla microscala (vedi cap. 5, Caratterizzazione alla microscala).

Di seguito, in tabella 1.2, si riporta una classificazione schematica dei meccanismi deformativi analizzati e dei caratteri microstrutturali che aiutano nell'identificazione degli stessi al microscopio ottico.

| <b>Meccanismo deformativo</b> | <b>Caratteri microstrutturali</b>   |
|-------------------------------|---|
| <b>Cataclasi</b>              | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Grani, aggregati di grani, frammenti di grani fratturati e di forma angolosa</li> <li>- Microfratture inter ed intragranulari</li> <li>- Allineamenti di grani e talvolta sviluppo di foliazioni</li> <li>- Vetro e massa di fondo ultrafine in pseudotachiliti</li> </ul> |
| <b>Plasticità</b>             | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Estinzione ondulata, bande di deformazione</li> <li>- Ricristallizzazione di grani e subgrani</li> <li>- Limiti dei grani instabili</li> <li>- Foliazione e orientazioni preferenziali di forma</li> <li>- Orientazioni cristallografiche preferenziali</li> </ul>         |
| <b>Pressure solution</b>      | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Modifiche locali nella forma dei grani</li> <li>- Sviluppo di vene</li> <li>- Contatti tra i granuli frastagliati e suturati</li> </ul>  |

**Tab. 1.2: caratteri microstrutturali per identificare i meccanismi deformativi al microscopio ottico.**

## Capitolo 2

# Il sistema di faglie Pusteria e Sprechenstein intercettato dalla Galleria di Base del Brennero

Obiettivo principale della presente tesi è la caratterizzazione delle rocce di faglia intercettate dalla Galleria di Base del Brennero. Quest'ultima attraversa infatti in direzione circa nord-sud la catena alpina orientale, intercettando il sistema di faglie Pusteria e Sprechenstein Mules. Entrambi i sistemi di faglia fanno parte di un ben più ampio lineamento tettonico, il Lineamento Periadriatico, un contatto lungo circa 600 km dove avviene la collisione tra la placca Europea del dominio Austroalpino e Pennidico con quella Africana che costituisce la fascia meridionale delle alpi.

Nel presente capitolo, dopo un breve inquadramento progettuale della Galleria di Base del Brennero, si fornirà un inquadramento tettonico e geologico del sistema di faglie e dei litotipi oggetto del presente studio.

### 2.1 Inquadramento progettuale della Galleria di Base del Brennero

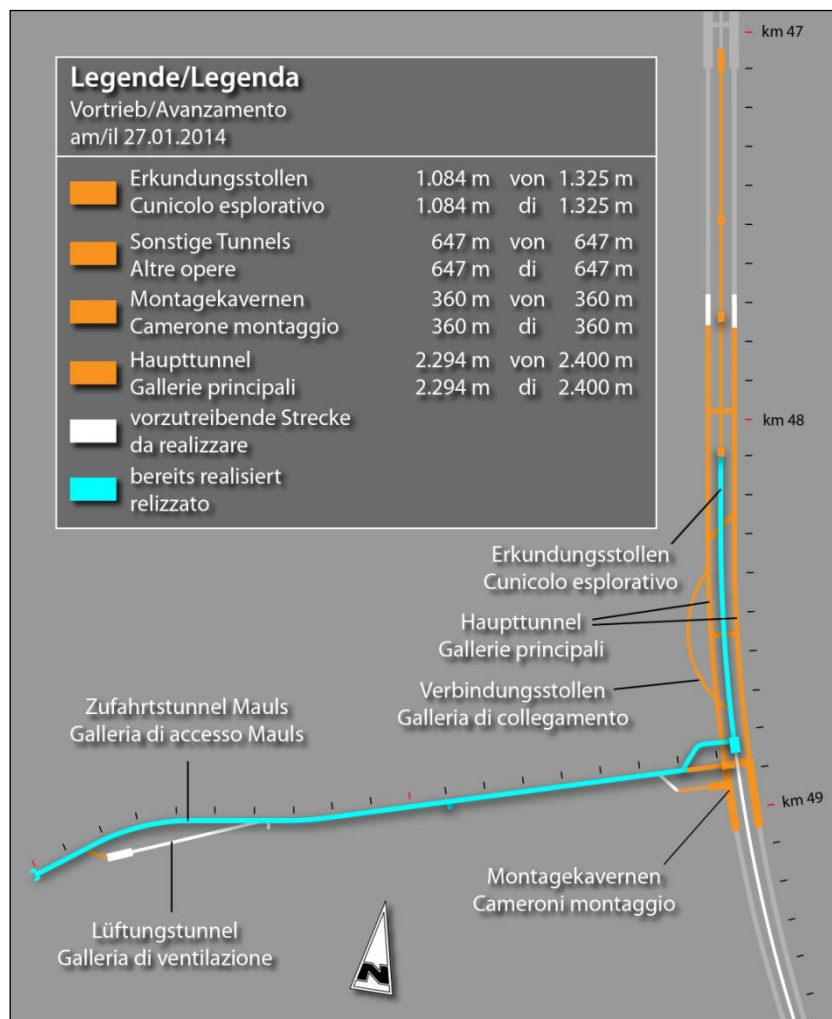
La Galleria di Base del Brennero, con i suoi 55 km di lunghezza costituirà la parte centrale del corridoio ferroviario Monaco di Baviera – Verona.

Nel contesto della Galleria di Base, è stata prevista la realizzazione di un cunicolo esplorativo che possa fornire informazioni preliminari circa le caratteristiche degli ammassi rocciosi interessati dal progetto.

Sulla base delle previsioni geologiche dell'area oggetto dell'attraversamento, infatti, è stata riscontrata la presenza di una zona complessa da un punto di vista tettonico, facente parte del più esteso Lineamento Periadriatico. Le caratteristiche scadenti delle rocce di faglia presenti in tale contesto hanno richiesto la progettazione di un cunicolo

esplorativo che potesse fornire informazioni dettagliate circa le modalità con cui proseguire con l'attraversamento del tratto più critico.

Il cunicolo giace parallelo alla galleria e attraversa il tratto più problematico del Lineamento Periadriatico passando al di sotto della Val di Mules. Si estende per una lunghezza di circa 2 km, sviluppandosi tra la progressiva al km 10+916 e la progressiva al km 12+182 (misurate a partire dal portale di Aica). Si riporta in fig. 2.1 lo stato di avanzamento dei lavori aggiornato al 27-01-2014.



**Fig. 2.1: stato di avanzamento dei lavori di scavo del cunicolo esplorativo della tratta periadriatica aggiornato al 27.01.2014 [BBT; 2014]**

L'area di studio, come sarà esposto nei paragrafi successivi, si sviluppa in una zona complessa da un punto di vista tettonico. Essa è situata al margine occidentale di una zona chiamata Finestra dei Tauri, portata a giorno dalla faglia estensionale del Brennero, nel cuore della zona di collisione continentale dell'orogene alpino, in una

zona di distensione e rotazione laterale dovuta alla penetrazione della microplacca adriatica nel continente europeo [Selverstone et al., 2000].

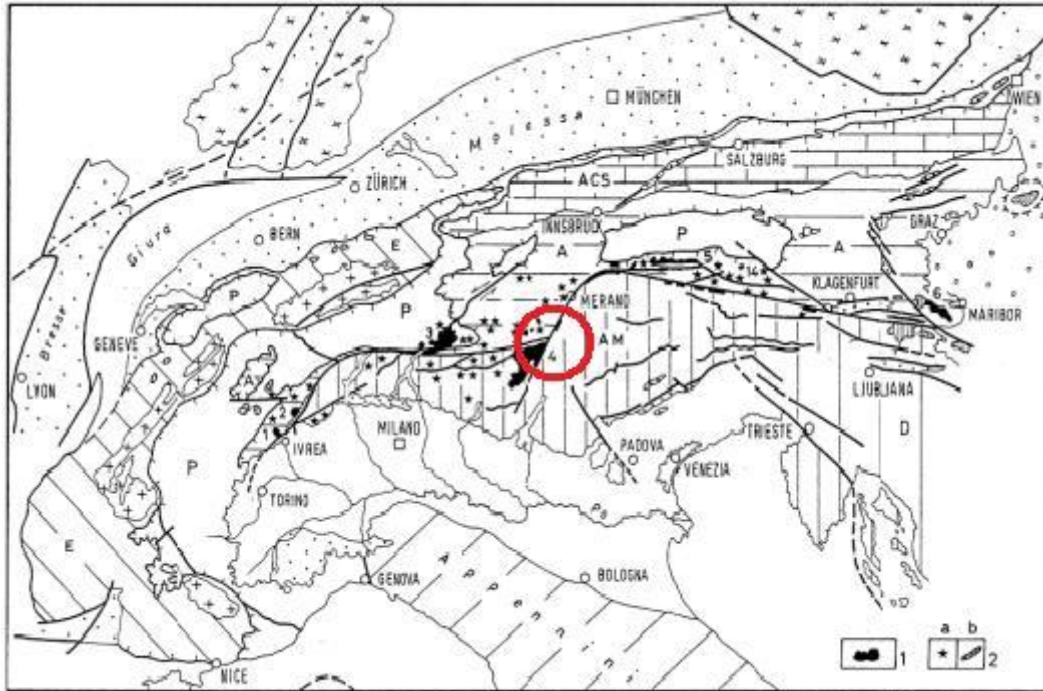
## **2.2 Il Lineamento Periadriatico**

Il Lineamento Periadriatico rappresenta il sistema di faglie più importante e vasto dell'intera catena alpina. Tale lineamento attraversa in direzione approssimativamente EW l'intero sistema alpino per una lunghezza totale di circa 600 km dall'Italia nord-occidentale fino al nord della Slovenia [Muller et al., 2001].

La catena alpina, infatti, si presenta come una struttura a doppia vergenza: comprende due catene a falde che si sono propagate in senso opposto. Si possono distinguere una catena a vergenza europea, o alpina in senso stretto, e un sistema tettonico con prevalente vergenza africana [Dal Piaz et al., 2003].

La catena a vergenza europea è il risultato del progressivo avvicinamento e della successiva collisione della parte settentrionale di Adria con il continente Europeo, con relativa subduzione di quest'ultimo. E' suddivisa in elementi strutturali, gruppi di falde, caratterizzate da un'analogia storia subduzione-collisionale [Dal Piaz et al.; 2003]. In particolare si osservano, procedendo dalle zone interne della catena verso l'avampese meso-europeo, in successione dall'alto verso il basso (fig. 2.2):

- 1) I sistemi Austroalpini delle alpi occidentali ed orientali
- 2) I sistemi tettonici della zona Pennidica presenti sia nelle alpi occidentali che orientali
- 3) Il sistema Elvetico-Delfinese, settore molto esteso delle alpi occidentali e centrali e ridotto ad una fascia sottile e discontinua in quelle orientali.



**Fig. 2.2:** schema strutturale delle Alpi. (A) Austroalpino; (P) Pennidico e unità ofioliti che; (E) Elvetico-Delfinese; (AM) Alpi Meridionali; (ACS) Alpi Calcaree Settentrionali; (D) Dinaridi. Plutoni: 1) Traversella; 2) Biella; 3) Bregaglia; 4) Adamello; 5) Vedrette di Ries; 6) Pohorje (SLO); in rosso, dettaglio dell'area di studio. [Dal Piaz et. al., 2003]

La catena a vergenza africana invece si estende per 500 km in senso E-O e in larghezza per 50-150 km. Sono riconoscibili due parti: una porzione lombardo-piemontese ed una veneto-friulana, separate dal sistema tettonico delle Giudicarie. A sud il fronte del sistema sudalpino è sepolto dai sedimenti mioceni-quadernari della Pianura Padana (fig. 2.2).

Le unità continentali ed oceaniche esposte a nord del lineamento periadriatico costituiscono una pila di falde a vergenza europea e sono caratterizzate da metamorfismo alpino e deformazioni duttili e fragili. I rapporti stratigrafici e tettonici fra le falde prevedono che a tetto ci sia il dominio Austroalpino e il basamento cristallino appartenente al margine passivo adriatico ed a letto il dominio Penninico, di cui affiorano il *Complesso dei Calcescisti* e lo *Gneiss Centrale* con le relative rocce di copertura. Di contro, le alpi meridionali, esposte a sud del lineamento Periadriatico, costituiscono la parte della placca adriatica non coinvolta, a differenza dell'Austroalpino, nei processi di subduzione collisione continentale a vergenza

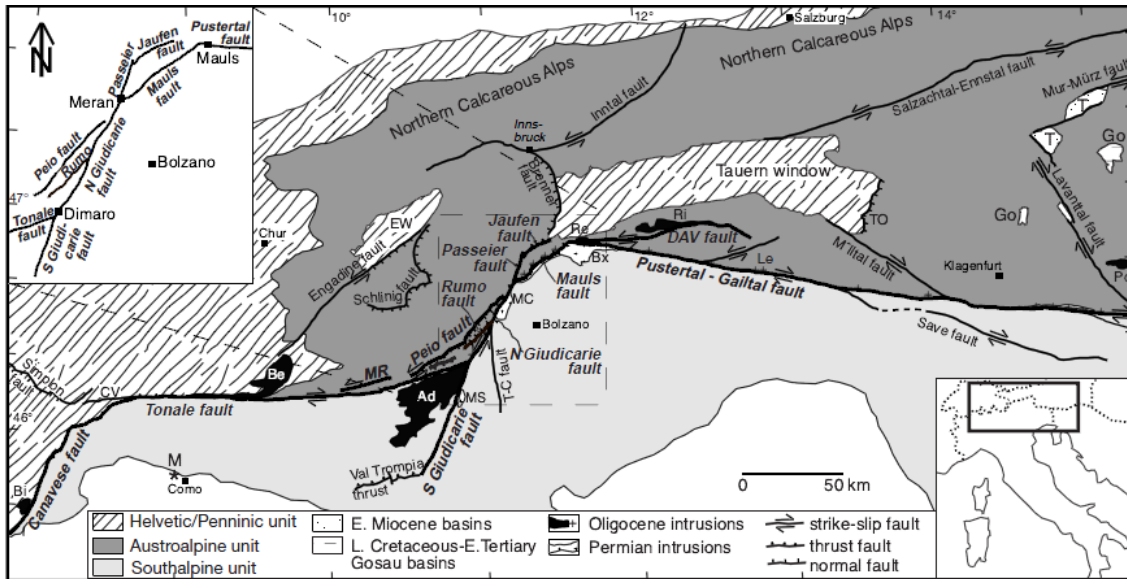
europea. Sono quindi esenti da metamorfismo regionale alpino e costituiscono una catena di età neogenica, vergente verso la Pianura padana [Dal Piaz et al., 2003]. A sud del lineamento Periadriatico, cioè della val di Mules, affiora, all'interno del dominio Sudalpino, il *Granito di Bressanone*.

### **2.3 Il Sistema di Faglie Pusteria e Sprechenstein**

Il Lineamento Periadriatico, struttura deformativa principale dell'intera catena alpina, a seconda dell'area attraversata prende nomenclatura differente. In particolare, procedendo da est verso ovest, per quanto riguarda l'area di interesse riportata in figura 2.3, si fa riferimento a [Muller et al., 2001]:

- Linea della Pusteria
- Linea delle Giudicarie
- Linea Merano Mules
- Linea del Brennero

In particolare il sistema Pusteria-Sprechenstein, oggetto del presente studio, ha andamento circa sub-verticale e prevalentemente E-O; ha una lunghezza di circa 200 km e costituisce la porzione più orientale del Lineamento Periadriatico, ponendo a contatto il basamento Austroalpino a nord con il Granito di Bressanone a sud.

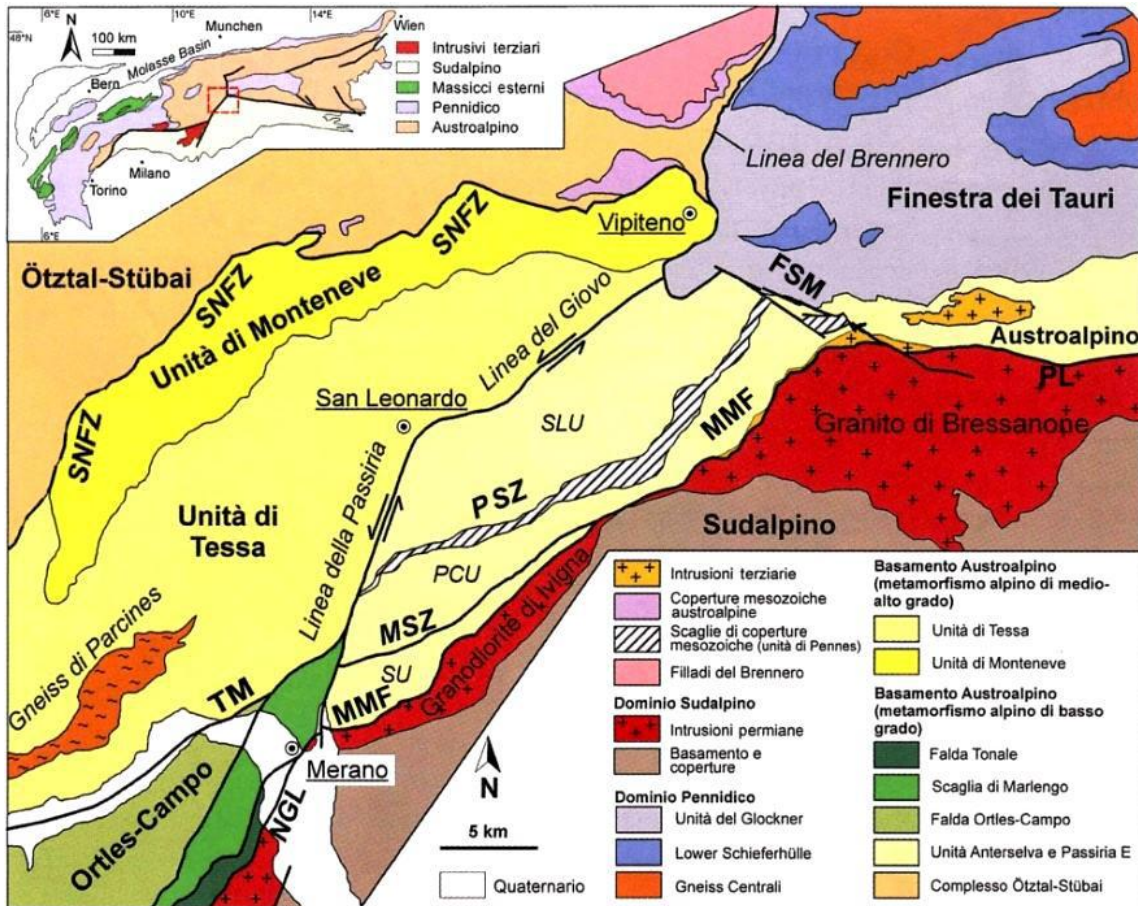


**Fig. 2.3: principali lineamenti tettonici delle Alpi Orientali, con focus sull'area di studio (riquadro in alto a sinistra); si vedano in particolare, da est a ovest: linea della Pusteria, faglia Merano – Mules, linea della Passiria, linea del Giovo, linea delle Giudicarie Nord, linea delle Giudicarie Sud, linea del Brennero [Muller, Prosser, Mancktelow, Villa, Kelley, Viola, Oberli; 2001].**

Il sistema in esame, divide la lamella tonalitica e le unità austro alpine affioranti a sud della finestra dei Tauri dal Granito di Bressanone all'altezza della val di Mules; esso poi prosegue verso sud-ovest connettendosi alla linea delle Giudicarie Nord attraverso la faglia di Merano-Mules.

La linea della Pusteria è collegata alla zona di faglia di Sprechenstein – Mules (fig. 2.4, linea FSM), una linea trascorrente destra immergente a N-E. Essa delimita a SW le unità appartenenti alla finestra dei Tauri all'altezza dell'abitato di Vipiteno fino a Fanes, prosegue poi verso S-E attraversando il basamento austroalpino, limitando verso est le coperture della sinclinale di Mules e tagliando la lamella tonalitica e il granito di Bressanone. Attraverso la faglia di Sprechenstein – Mules, il moto della linea del Brennero viene trasferito in parte alla linea della Pusteria favorendo così l'esumazione tettonica della finestra dei Tauri e la sua estrusione laterale [G. Di Fiore, 2011].





**Fig. 2.4: schema tettonico regionale. (SU) Unità di Scena; (PCU) Unità di Punta Cervina; (SLU) Unità di San Leonardo; (SNFZ) Schneeberg Normal Fault Zone (Faglia normale di Monteneve); (PSZ) Zona di taglio di Pennes; (MSZ) Zona di taglio di Rio Masul; (TM) Miloniti del Thurnstein; (PL) Linea della Pusteria; (NGL) Linea delle Giudicarie Nord; (MMF) Faglia di Merano – Mules; (FSM) Faglia di Sprechenstein – Mules [Servizio Geologico d’Italia, 2010]**

Dislocata dalla faglia di Sprechenstein e dalla linea della Pusteria è la faglia di Merano – Mules che collega la linea delle Giudicarie Nord con la linea della Pusteria, ha immergenza 40 – 60° NW e rappresenta il contatto tettonico tra la placca Adria e l’Austroalpino orientale. Anch’essa separa il Granito di Bressanone situato nel Sudalpino dal basamento Austroalpino a NW. Un sottile ma continuo corpo di tonalite oligocenica forma affioramenti regolari immediatamente adiacenti alla linea Merano – Mules nella parte nord – occidentale (Lamelle tonalitiche di Ifinger – Ivigna e di Mules). La faglia Merano – Mules si estende sino a congiungersi alla linea della Pusteria presso la località di Mules dove entrambe vengono rigettate dalla faglia Sprechenstein – Mules (fig. 2.4). Questa faglia interessa tre litologie: il basamento Austroalpino con le



coperture permo-triassiche della sinclinale di Mules, la lamella tonalitica di Mules ed il granito di Bressanone [Bistacchi et. al. 2010].

Infine, verso la parte più settentrionale dell'area di studio è presente la linea del Brennero. La linea del Brennero è connessa alla linea della Pusteria attraverso il trasferimento realizzato dalla faglia Sprechenstein – Mules [Bistacchi et. al. 2010]. Tale faglia mette a contatto le unità del basamento Austroalpino con le unità Pennidiche, rappresentate dalla finestra del Tauri.

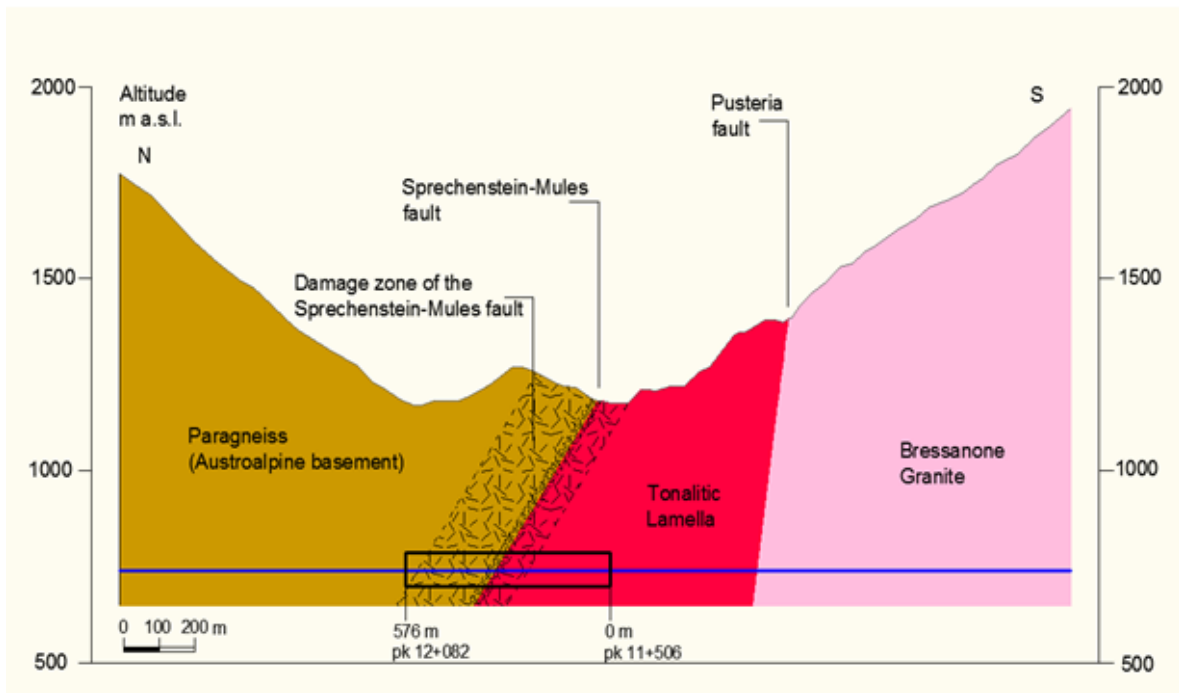
La faglia estensionale del Brennero, attivata dalla spinta della microplacca Adriatica contro il continente Europeo, ha portato alla luce la finestra tettonica dei Tauri [Selverstone et al., 2000]. La cinematica interessante la faglia è distensiva, con abbassamento del tetto (Austroalpino) verso ovest ed esumazione delle unità di letto (Pennidico) verso est; il processo è documentato da una notevole differenza di età di raffreddamento attraverso la linea tettonica: le miche nell'Austroalpino a tetto appartengono ad un'epoca antecedente rispetto alle miche e granato nelle unità di letto [Thöni, et al., 1998].

## **2.4 Unità geologiche nell'area di influenza della faglia**

Il cunicolo esplorativo della Galleria di Base si sviluppa a cavallo tra i due domini della catena alpina: il dominio Sudalpino, verso sud, costituito nel settore in esame da graniti (Granito di Bressanone) ed il dominio Austroalpino, verso nord, costituito nel settore in esame da paragneiss e scisti filladici. Il limite tra i due domini è sottolineato da una delle discontinuità tettoniche più importanti della catena alpina, rappresentata dalla linea Periadriatica ampiamente descritta nel paragrafo precedente, e che in questo settore si compone di diversi elementi quali la faglia della Pusteria e la linea Sprechenstein – Mules. Tra le due discontinuità sopra citate è presente una zona a scaglie tettoniche dei due domini, che include anche delle magmatiti oligoceniche note come Lamella tonalitica di Mules.

Per quanto riguarda il dettaglio delle unità geologiche attraversate dal cunicolo, di seguito se ne riporta un profilo schematico (Fig. 2.5), con evidenziate le principali unità

geologiche, la localizzazione delle zone di faglia e del tratto sottoposto ad indagine nell'ambito del presente studio.



**Fig. 2.5:** Profilo schematico rappresentate le principali unità geologiche interessate dal cunicolo e la localizzazione delle zone di faglia. Nel riquadro il tratto di cunicolo oggetto del presente studio (progressive 11+506-12+082 km) [Relazioni BBT, 2013].

## **Capitolo 3**

### **Caso di studio:**

## **Caratterizzazione delle rocce di faglia alla macro e meso-scala**

### **3.1 Premessa**

È di gran lunga risaputo come la presenza di rocce di faglia lungo lo sviluppo di una futura struttura sotterranea è causa di non pochi problemi durante la sua realizzazione. Il Lineamento Periadriatico, come già descritto nel cap. 2, è una delle principali strutture tettoniche delle Alpi e il suo attraversamento costituisce non solo il “problema” centrale del tratto in oggetto, che giustifica di per sé la realizzazione del cunicolo esplorativo, ma appare come una delle sfide che, per il livello delle difficoltà e le incognite presentate, raramente vengono poste nel corso della realizzazione di un’opera sotterranea.

Nel presente capitolo le rocce di faglia vengono dapprima caratterizzate alla macro scala attraverso i sondaggi meccanici in avanzamento effettuati. Di seguito, grazie alla preparazione di campioni ricavati dalle carote estratte, verranno analizzati i risultati di prove geotecniche di laboratorio che ne permetteranno una caratterizzazione esaustiva alla mesoscala.

### **3.2 Sondaggi meccanici in avanzamento nel cunicolo esplorativo**

Si è deciso di effettuare due sondaggi a carotaggio continuo orizzontale in avanzamento, dalla piazzola logistica posta alla progressiva 11+505,5 km riferita al portale di Aica, sino alla progressiva 12+082 km. Tali sondaggi, che hanno l’obiettivo di

investigare nel dettaglio le caratteristiche meccaniche delle rocce di faglia la cui presenza era stata già annunciata durante la fase previsionale del progetto, si estendono per una lunghezza di circa 350 m l'uno, così suddivisi:

- Sondaggio SAV6: dalla progressiva 11+505.5 km alla progressiva 11+836 km
- Sondaggio SAV7: dalla progressiva 11+732 km alla progressiva 12+082 km

I due sondaggi condividono una lunghezza di circa 100 m, se pur poi indagata con un differente dettaglio di campionamento, che risulta essere maggiore nel secondo campione effettuato in un secondo momento.

### 3.2.1 Sondaggio SAV6

Il sondaggio SAV6 si estende a partire dalla progressiva 11+505,5 km del cunicolo per una profondità di 330 m. Esso, pur avendo individuato il limite meridionale della zona tettonizzata, non è riuscito ad intercettare quello settentrionale. Per questo motivo è stata prevista l'esecuzione di un'ulteriore campagna geognostica in avanzamento, il sondaggio SAV7 che avrà l'obiettivo di sciogliere le riserve sulla potenza e la geometria della zona di faglia e sulle caratteristiche dei materiali in essa contenuti.

Per il sondaggio in oggetto sono disponibili due ricostruzioni stratigrafiche riassunte in tabella 3.1.

| Profondità |       | Progressiva |         | Stratigrafia sondaggio SAV6<br>(Ricostruzione Land Consulting) |
|------------|-------|-------------|---------|--|
| [m]        | [m]   | [m]         | [m]     |  |
| 0          | 189.2 | 11505.5     | 11694.7 | Tonaliti   |
| 189.2      | 222.7 | 11694.7     | 11728.2 | Tonaliti milonizzate   |
| 222.7      | 229.3 | 11728.2     | 11734.8 | Tonaliti più tenere in alternanze gneissico-milonitiche        |
| 229.3      | 243.3 | 11734.8     | 11748.8 | Tonaliti in alternanze gneissico- milonitiche                  |
| 243.3      | 252.9 | 11748.8     | 11758.4 | Miloniti tonalitiche   |
| 252.9      | 253.5 | 11758.4     | 11759   | Roccia milonitica  |
| 253.5      | 290.1 | 11759       | 11795.6 | Roccia cataclastica a tratti intensamente foliata              |
| 290.1      | 306.5 | 11795.6     | 11812   | Elementi lapidei basici alternati a livelli grafitici          |
| 306.5      | 310.9 | 11812       | 11816.4 | Livelli grafitici alternati a roccia a grana fine grigia       |
| 310.9      | 313.7 | 11816.4     | 11819.2 | Kakirite   |
| 313.7      | 328   | 11819.2     | 11833.5 | Livelli grafitici alternati a roccia a grana fine grigia       |
| 328        | 329.8 | 11833.5     | 11835.3 | Breccia di faglia ricementata                                  |

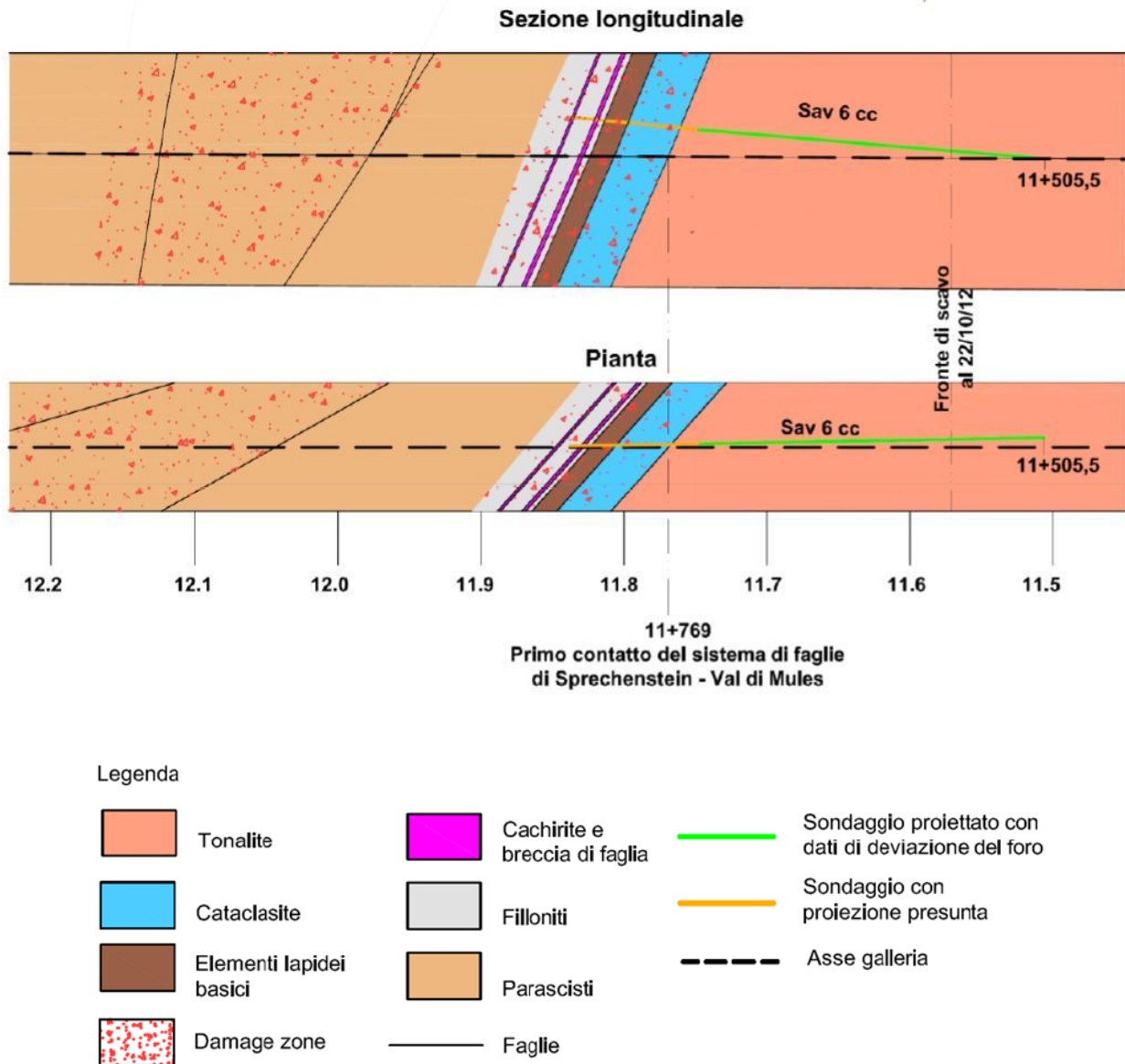
| Profondità |       | Progressiva |         | Stratigrafia sondaggio SAV6<br>(Ricostruzione Consorzio Brennero 2011) |
|------------|-------|-------------|---------|--|
| [m]        | [m]   | [m]         | [m]     |  |
| 0          | 104   | 11505.5     | 11609.5 | Tonaliti a tratti intensamente fratturate                              |
| 104        | 222.7 | 11609.5     | 11728.2 | Tonaliti poco o mediamente fratturate                                  |
| 222.7      | 229.3 | 11728.2     | 11734.8 | Tonaliti più tenere in alternanze gneissico-milonitiche                |
| 229.3      | 243.3 | 11734.8     | 11748.8 | Tonaliti in alternanze gneissico- milonitiche                          |
| 243.3      | 253.5 | 11748.8     | 11759   | Miloniti tonalitiche   |
| 253.5      | 288.3 | 11759       | 11793.8 | Scisti grafitici intensamente foliati e fratturati                     |
| 288.3      | 305.4 | 11793.8     | 11810.9 | Elementi lapidei basici alternati a livelli grafitici                  |
| 306.5      | 329.8 | 11812       | 11835.3 | Kakirite   |

**Tab. 3.1: ricostruzioni stratigrafiche del sondaggio SAV6**

In generale le due ricostruzioni appaiono concordi nell'identificare 5 litologie principali:

- 0 – 222.7 m: Tonaliti poco o mediamente fratturate, a tratti intensamente fratturate; nel seguito indicate semplicemente come Tonaliti
- 222.7 – 253.5 m: Tonaliti più o meno milonizzate
- 253.5 – 288 m circa: Scisti grafitici intensamente foliati e fratturati (Cataclasiti)
- 288 – 305 m circa: Elementi lapidei basici alternati a livelli grafitosi (nel seguito indicati anche come Gneiss)
- 305 circa – 329.8 m: Kakirite (alternanza di cataclasiti a consistenza lapidea e frazioni brecciate sciolte)

Grazie ai dati di ricostruzione stratigrafica disponibili è stato possibile aggiornare il profilo longitudinale geotecnico (fig. 3.1). Si tenga presente che, avendo il sondaggio raggiunto la progressiva km 11+836, da tale progressiva in avanti il profilo risulta indicativo; in particolare non è stato identificato il contatto tra le Kakirite (indicate come filloniti in figura) e il parascisti del basamento cristallino austroalpino.



**Fig. 3.1: profilo geologico aggiornato sulla base delle risultanze del sondaggio SAV6**

### 3.2.2 Sondaggio SAV7

Nel seguito sono riportate le evidenze ricavate dal sondaggio orizzontale SAV7 eseguito in avanzamento dalla piazzola logistica alla progressiva 11+732 per una profondità di 350 m.

In tabella 3.2 è riassunta la ricostruzione stratigrafica del sondaggio.

| Profondità |       | Progressiva |         | Stratigrafia sondaggio SAV7 (Ricostruzione Consorzio Brennero 2011)                                      |
|------------|-------|-------------|---------|--|
| [m]        | [m]   | [m]         | [m]     |  |
| 0          | 31.6  | 11732       | 11763.6 | Tonaliti milonizzate   |
| 31.6       | 52.8  | 11763.6     | 11784.8 | Scisti filladici intensamente foliati intercalati a Paragneiss quarzosi                                  |
| 52.8       | 57.8  | 11784.8     | 11789.8 | Paragneiss quarzosi intercalati a scisti filladici intensamente foliati                                  |
| 57.8       | 73.7  | 11789.8     | 11805.7 | Scisti filladici intensamente foliati intercalati a Paragneiss quarzosi                                  |
| 73.7       | 83.3  | 11805.7     | 11815.3 | Paragneiss quarzosi intercalati a scisti filladici intensamente foliati                                  |
| 83.3       | 97.7  | 11815.3     | 11829.7 | Cataclasiti (alternanze di frazioni a consistenza da sciolta a plastica con altre lapidee o semilapidee) |
| 97.7       | 101.4 | 11829.7     | 11833.4 | Paragneiss quarzosi intercalati a scisti filladici intensamente foliati                                  |
| 101.4      | 104.4 | 11833.4     | 11836.4 | Cataclasiti (alternanze di frazioni a consistenza da sciolta a plastica con altre lapidee o semilapidee) |
| 104.4      | 113.7 | 11836.4     | 11845.7 | Scisti filladici intensamente foliati intercalati a Paragneiss quarzosi                                  |
| 113.7      | 117   | 11845.7     | 11849   | Cataclasiti (alternanze di frazioni a consistenza da sciolta a plastica con altre lapidee o semilapidee) |
| 117        | 157.5 | 11849       | 11889.5 | Scisti filladici intensamente foliati intercalati a Paragneiss quarzosi                                  |
| 157.5      | 164.7 | 11889.5     | 11896.7 | Paragneiss quarzosi intercalati a scisti filladici intensamente foliati                                  |
| 164.7      | 169.5 | 11896.7     | 11901.5 | Cataclasiti (alternanze di frazioni a consistenza da sciolta a plastica con altre lapidee o semilapidee) |
| 169.5      | 212.9 | 11901.5     | 11944.9 | Paragneiss quarzosi intercalati a scisti filladici intensamente foliati                                  |
| 212.9      | 246.8 | 11944.9     | 11978.8 | Brecce e frammenti di scistie cataclasiti intensamente foliati   |
| 246.8      | 258.4 | 11978.8     | 11990.4 | Paragneiss quarzosi molto fratturati intercalati a frazioni scistose passanti a cataclasiti              |
| 258.4      | 267.6 | 11990.4     | 11999.6 | Scisti quarziticci tendenti a Quarzite da molto fratturati a comminuti                                   |
| 267.6      | 332.7 | 11999.6     | 12064.7 | Quarzite massiva da mediamente a molto fratturata (a tratti parzialmente cataclasata e ricementata)      |
| 332.7      | 350.5 | 12064.7     | 12082.5 | Gneiss anfibolitici a tratti molto foliati   |

**Tab. 3.2: ricostruzione stratigrafica del sondaggio SAV7**

In generale è possibile distinguere 3 tratti differenti:

- 0 – 31.6 m: Tonaliti milonizzate
- 31.6 – 258.4 m: alternanza di Scisti filladici intensamente fratturati, Paragneiss quarzosi e Cataclasiti. Si segnala la presenza di un livello di notevole potenza di brecce e frammenti di scisti e cataclasiti estremamente foliati tra le profondità 212.9 m e 264.8 m; tra le profondità 87 e 89 m sono invece state rinvenute cataclasiti a frazione quasi esclusivamente argillosa.
- 258.4 – 350.5 m: Scisti quarziticci, Quarzite massiva e Gneiss anfibolitici

Così come fatto per il sondaggio SAV6, in figura 3.2 si riporta l'aggiornamento del profilo sulla base dei risultati dei sondaggi.

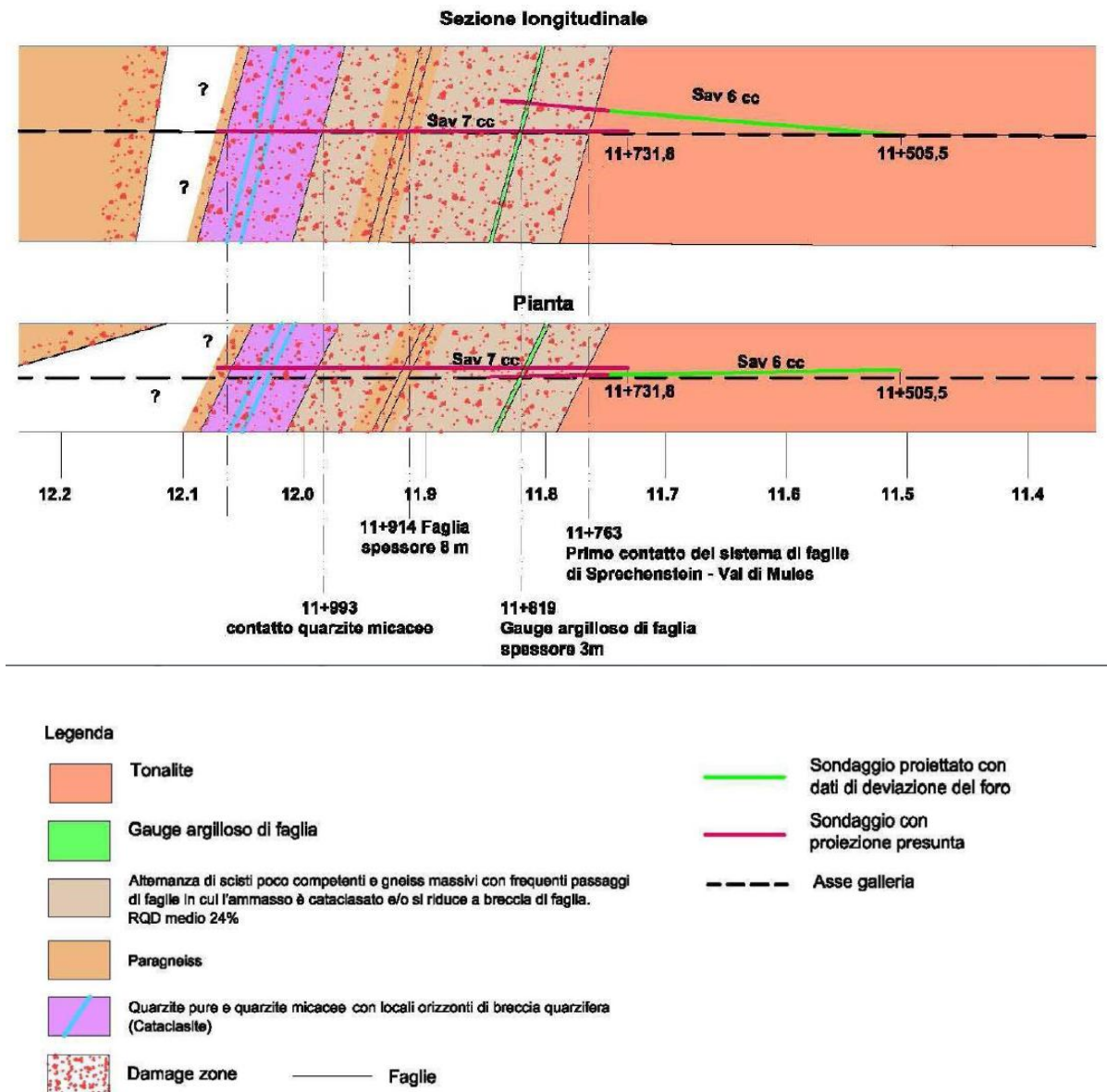


Fig. 3.2: profilo geologico aggiornato sulla base delle risultante dei profili SAV6 e SAV7



### 3.3 Caratterizzazione alla macroscala: Rock Quality Designation (RQD)

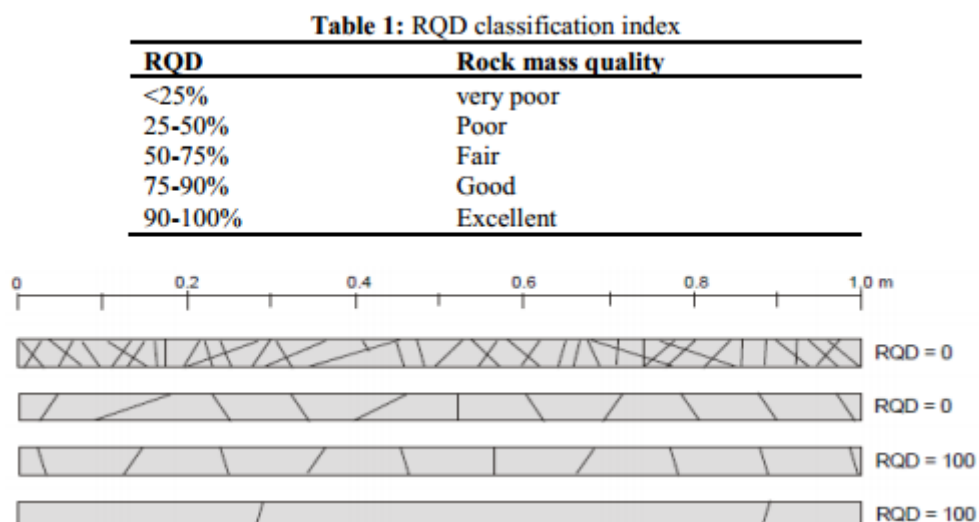
Grazie ai sondaggi sarà possibile identificare alle varie profondità uno tra i più importanti parametri di caratterizzazione del grado di fratturazione di una formazione rocciosa, il *Rock Quality Designation (RQD)*, definito come il rapporto tra la somma delle distanze, superiori a 10 cm, fra le fratture lungo il campione estratto ad ogni manovra di carotaggio, e la lunghezza del campione stesso; tale rapporto è espresso in termini percentuali.

$$RQD = \frac{A}{l_{tot}} * 100\%$$

$A = \sum L_i$  ,  $L_i$  = lunghezze dei campioni maggiori di 10 cm

$l_{tot}$  = lunghezza totale della manovra di carotaggio

Parametro largamente utilizzato come indice di qualità della roccia nella realizzazione di gallerie e scavi, il suo utilizzo venne presto esteso ad altre aree della meccanica delle rocce, sino a diventare un parametro fondamentale nell'ingegneria geotecnica. Il successo del RQD è dovuto in parte alla semplicità della sua definizione e all'immediatezza dell'interpretazione del risultato (Tab. 3.3).



Tab. 3.3: classificazione della qualità della roccia secondo l'indice RQD [Deree, 1989]

I limiti di tale indice sono comunque notevoli, quali ad esempio la totale noncuranza degli spezzoni di carota inferiori ai 10 cm, siano essi rocce o materiale totalmente incoerente; inoltre, è soggetto ad errori qualora il campione di roccia contenga frazioni argillose o in caso di presenza d'acqua. Da ultimo, il maggiore dei limiti è decisamente la sua mancata invarianza rispetto all'orientazione con cui viene effettuato lo scavo. Per tutte queste ragioni l'RQD non si presenta come parametro di progetto univoco ma deve essere accuratamente correlato ad altre caratteristiche dell'ammasso roccioso che ne completano la caratterizzazione [C. Lucian, E.M. Wangwe; 2013].

In allegato (allegato 1 – Rock Quality Designation) si riporta l'elenco dell'indice RQD alle varie progressive [Schede tecniche BBT; settembre-ottobre 2012].

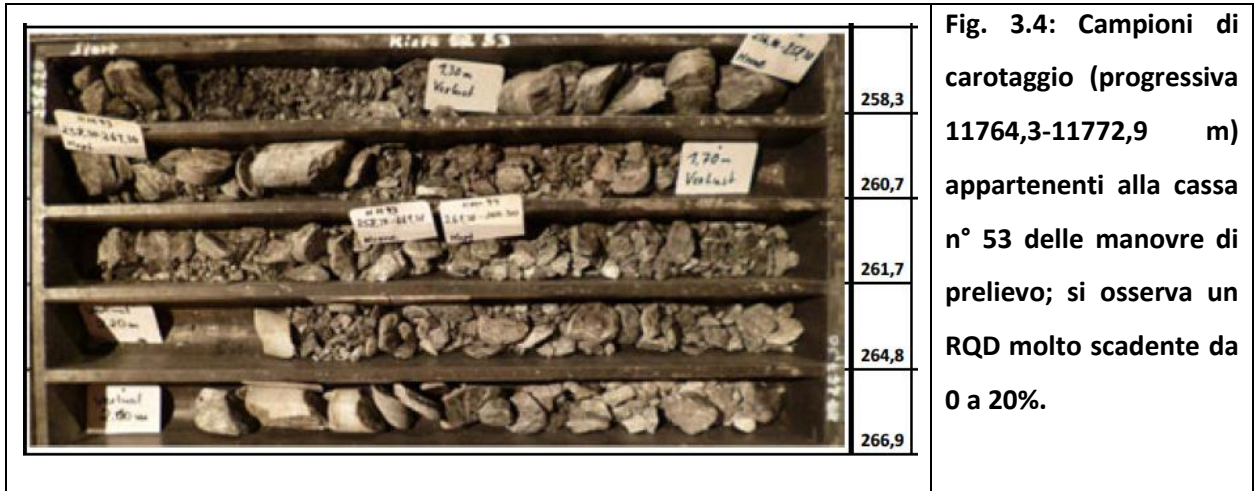
Complessivamente nel primo campione si osserva:

Progressiva 11+506 – 11+758 km: RQD da discreto a eccellente della tonalite a grana medio – fine, olocristallina, con livelli melanocrati, a struttura foliata, da poco a mediamente fratturata (fig. 3.3)



Talvolta la tonalite a struttura foliata si presenta intensamente fratturata con presenza di brecciatura a spigoli vivi; assenza di riempimento di natura plastica a presenza di venute d'acqua, ma l'RQD non scende mai al di sotto del 40% in questa tratta.

Progressiva 11+759 – 11+836 km: RQD scadente delle filladi tettonizzate, intensamente foliate con livelli quarzosi; estremamente fratturate e prive di consistenza (Fig. 3.4)



Nel secondo campione invece si osserva:



Progressiva 11+732 – 11+758 km: in accordo con quanto rilevato attraverso il primo campione nella medesima tratta, si osserva un RQD da buono a eccellente delle tonaliti milonizzate attraversate da venature di riempimento secondario; le superfici dei giunti sono ruvide e prive di riempimenti. La roccia nel complesso appare poco fratturata e con superfici di frattura chiuse.

Progressiva 11+759 – 11+814 km: scisti filladici intensamente foliati intercalati a paragneiss quarzoso micaceo – carbonatici caratterizzati da un RQD da molto scadente a discreto.

Progressiva 11+815 – 12+000 km: prevalenza di rocce fortemente cataclase di natura scistosa, gneissica e quarzosa (gouge di faglia) costituite da alternanze di frazioni a consistenza da sciolta a plastica con altre lapidee o semi-lapidee; presenti talvolta dei passaggi brecciati e frazioni argillose (tra profondità 11819 e 11821 m ad esempio) (Fig. 3.5). L'RQD risulta sempre parecchio basso e raramente sopra al 60%.

Progressiva 12+001 – 12+021 km: quarzite massiva di colore grigio-verdastro da mediamente a poco fratturata con rare superfici di discontinuità preesistenti al

carotaggio, parzialmente cataclasata e ricementata (intorno alla profondità 12002). L'indice di qualità rocciosa risulta essere più alto, da discreto a buono, intorno al 60-80% (Fig. 3.6).

|  |       |       |       |       |       |   |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|---|
|  <table border="1" data-bbox="1038 546 1098 943"> <tr><td>88,7</td></tr> <tr><td>89,7</td></tr> <tr><td>90,7</td></tr> <tr><td>91,7</td></tr> <tr><td>92,7</td></tr> </table>          | 88,7  | 89,7  | 90,7  | 91,7  | 92,7  | <p><b>Fig. 3.5: Campioni di carotaggio (progressiva 11820,7-11824,7 m) appartenenti alla cassa n° 14 delle manovre di prelievo relative al campione SAV7; si osservino le componenti argillose delle prime 4 carote che rendono impossibile la definizione di un RQD.</b></p> |
| 88,7   |       |       |       |       |       |   |
| 89,7   |       |       |       |       |       |   |
| 90,7   |       |       |       |       |       |   |
| 91,7   |       |       |       |       |       |   |
| 92,7   |       |       |       |       |       |   |
|  <table border="1" data-bbox="1059 1205 1118 1621"> <tr><td>274,4</td></tr> <tr><td>275,4</td></tr> <tr><td>276,4</td></tr> <tr><td>277,4</td></tr> <tr><td>278,4</td></tr> </table> | 274,4 | 275,4 | 276,4 | 277,4 | 278,4 | <p><b>Fig. 3.6: Campioni di carotaggio (progressiva 12006,4-12010,7 m) appartenenti alla cassa n° 44 delle manovre di prelievo relative al campione SAV7; RQD da discreto a eccellente (60 – 90%).</b></p>  |
| 274,4  |       |       |       |       |       |   |
| 275,4  |       |       |       |       |       |   |
| 276,4  |       |       |       |       |       |   |
| 277,4  |       |       |       |       |       |   |
| 278,4  |       |       |       |       |       |   |

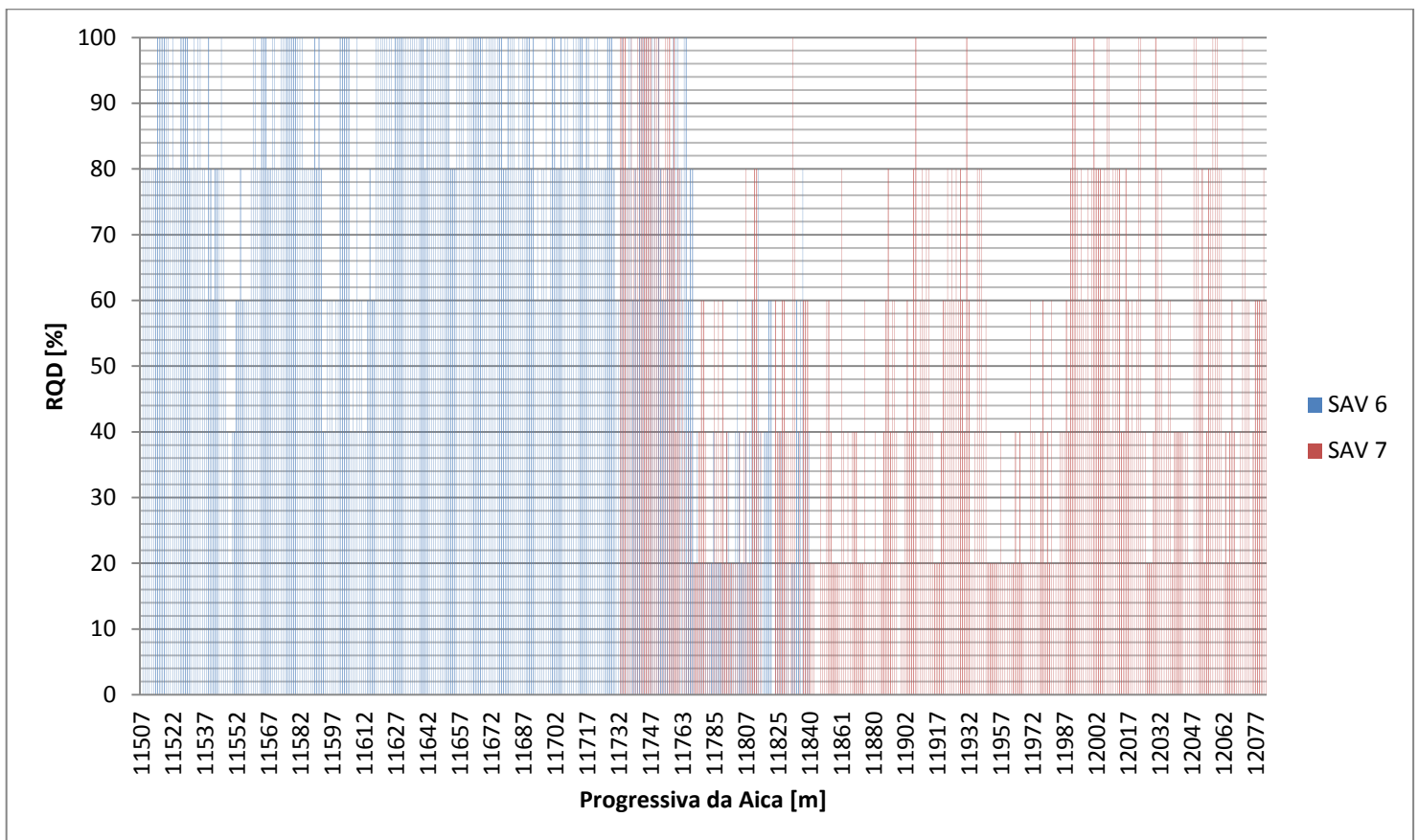
Progressiva 12022 – 12064 m: quarzite da molto fratturata a cataclasata con un indice di qualità RQD che si aggira intorno al 20-40%.

Progressiva 12065 – 12082 m: gneiss anfibolitici quarzoso – micacei molto foliati caratterizzati anch'essi da un RQD basso, indice di roccia da scadente a molto scadente.

Si riporta di seguito un grafico riassuntivo dell'indice RQD lungo il cunicolo (fig. 3.7) e una tabella dei valori medi dello stesso per ciascun litotipo (tab. 3.4).

| Litotipo    | RQD [%] | Classificazione |
|-------------|---------|-----------------|
| Cataclasite | 20-30   | Molto Basso     |
| Gneiss      | 40-50   | Medio           |
| Scisti      | 30-40   | Basso           |
| Tonaliti    | 70-80   | Buono           |
| Quarziti    | 70-80   | Buono           |

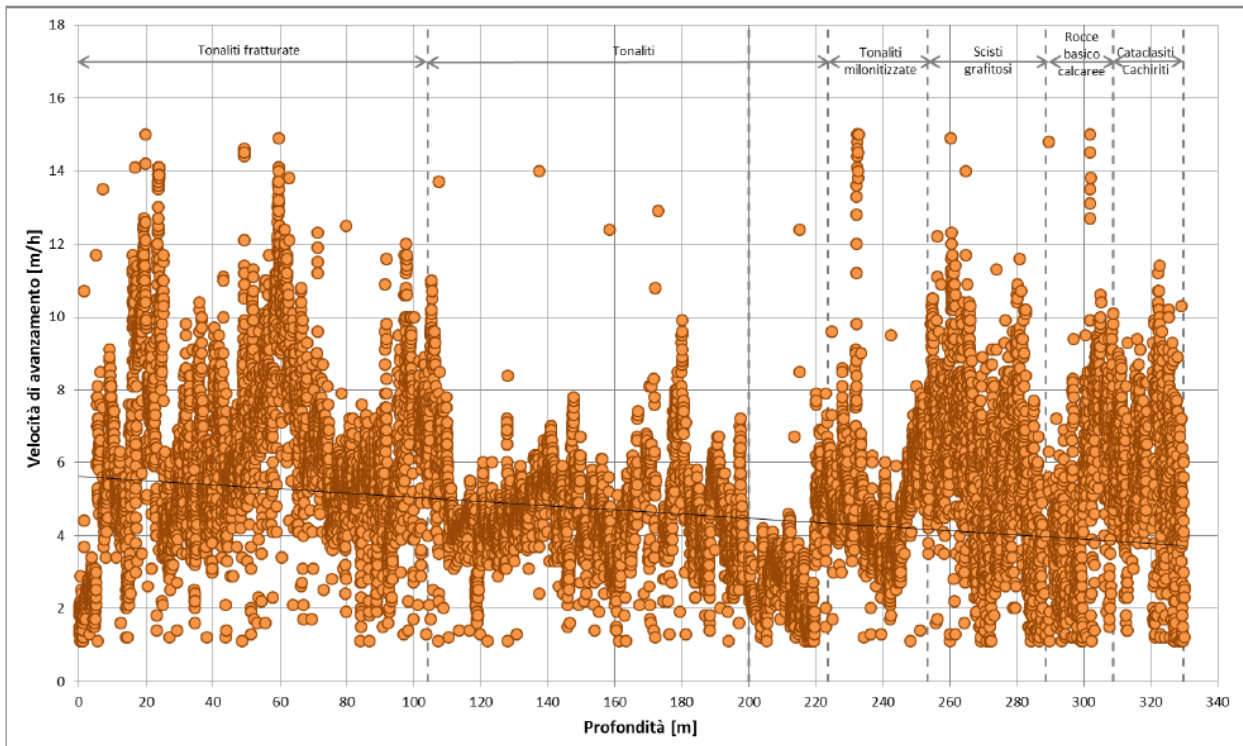
**Tab. 3.4: RQD medio per ciascun litotipo**



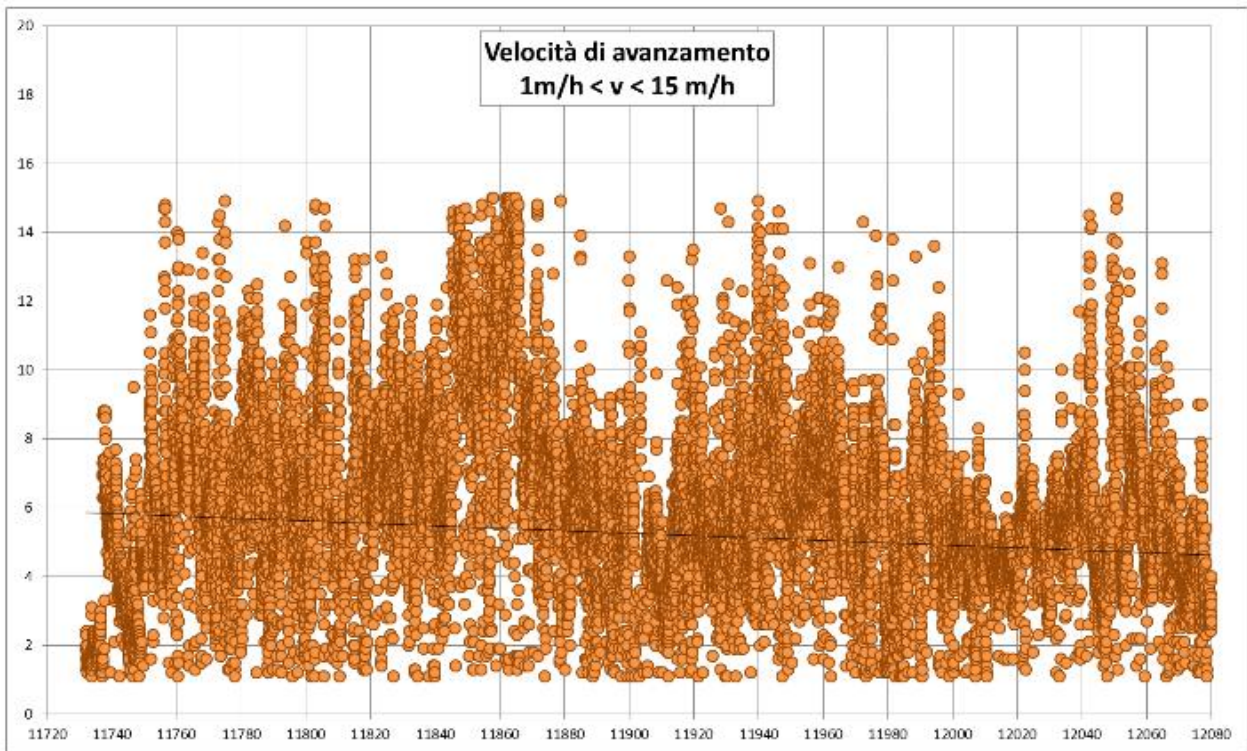
**Fig. 3.7: andamento dell'indice RQD lungo il cunicolo secondo il sondaggio SAV6 e SAV7**



Il parametro RQD influenza le modalità esecutive del sondaggio, in termini di velocità di avanzamento che sembra ricalcare una reale differenza di resistenza alla penetrazione tra i materiali interessati. In figura 3.8 e 3.9 si riportano i grafici relativi alle velocità di avanzamento registrata alle varie progressive nei due sondaggi effettuati.



**Fig. 3.8: velocità di avanzamento registrate nel sondaggio SAV6 in funzione della profondità**



**Fig. 3.9: velocità di avanzamento registrate nel sondaggio SAV7 alle varie profondità**

In entrambi i casi si noti la diminuzione complessiva di velocità all'aumentare della profondità del sondaggio. Nel grafico di figura 3.8 si osservi come si registrano velocità basse alle profondità 200 – 220 m, 110 – 200 m e 220 – 255 m (velocità media 2.62 m/h, 4.56 m/h e 4.93 m/h rispettivamente) dove l'indice RQD è quasi ovunque superiore all'80%, con brevi passaggi di RQD = 60 – 70%. Alla profondità 255 – 330 m, dove la roccia si presenta molto fratturata la velocità raggiunge valori elevati, ad eccezione di soli 10 m intorno alla profondità 290 m. Il valore medio di questa tratta è pari a 5.70 m/h. Infine, alle profondità 0 – 110 m la velocità raggiunge valori simili a quelli registrati alla profondità 255 – 330 m (6.28 m/h).

Questi ultimi due dati sembrano contraddittori in quanto si registrano velocità simili (5.70 – 6.28 m/h) in materiali aventi caratteristiche marcatamente differenti (tonaliti generalmente poco fratturate a profondità 0 – 110 m, materiali fortemente tettonizzati a profondità 255 – 330 m). Si può quindi concludere che tali parametri, pur fornendo indicazioni di massima riguardo i rapporti di resistenza alla penetrazione dei materiali attraversati, non possono risultare determinanti per la corretta



caratterizzazione della zona di faglia. In figura 3.9, riguardante il sondaggio SAV7, si osservano massimi di velocità in corrispondenza delle cataclasi (es. progressive 11+945 – 11+979 circa) e minimi in corrispondenza dei livelli di paragneiss quarzosi (es. progressive 11+902 – 11+915 circa).

### **3.4 Caratterizzazione alla meso-scala: le prove geotecniche**

Al fine di individuare le caratteristiche meccaniche di resistenza e di deformabilità delle rocce di qualità piuttosto scadente rivenute attraverso l'attività di carotaggio in avanzamento, si è reso necessario aumentare il grado di dettaglio delle indagini passando da uno sguardo alla macro-scala ad uno alla meso-scala tipica dei campioni sui quali sono state condotte diverse prove geotecniche di laboratorio.

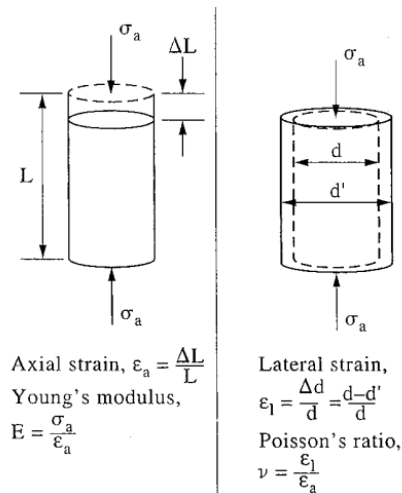
Tali indagini si concentrano dalla progressiva 11+575.5 km alla progressiva 12+083 km coincidente con il tratto maggiormente alterato, sulla base sia delle previsioni geologiche che delle indagini di RQD effettuate.

Le prove condotte su alcuni dei diversi campioni ricavati a partire dalle carote estratte, sono le seguenti:

- Prova di compressione monoassiale
- Prova di trazione indiretta
- Prova a carico concentrato (Point Load Test)
- Velocità di propagazione onde P e S
- Prova di taglio diretto
- Test di durabilità

#### **3.4.1 Prova di compressione monoassiale**

Costituisce la più semplice delle condizioni di carico e permette di ricavare utili considerazioni in termini di resistenza e deformabilità (fig. 3.10)



**Fig. 3.10: Schema prova compressione monoassiale in controllo di carico con misura di deformazione longitudinale e modulo di Young (sinistra), deformazione laterale e coefficiente di Poisson (destra).**

La prova viene condotta in controllo di carico in modo continuo con una velocità di applicazione della tensione tale per cui la rottura avvenga entro i 5-10 min di carico; in alternativa, la velocità di applicazione del carico sarà compresa entro i 0.5 – 1 MPa/s.

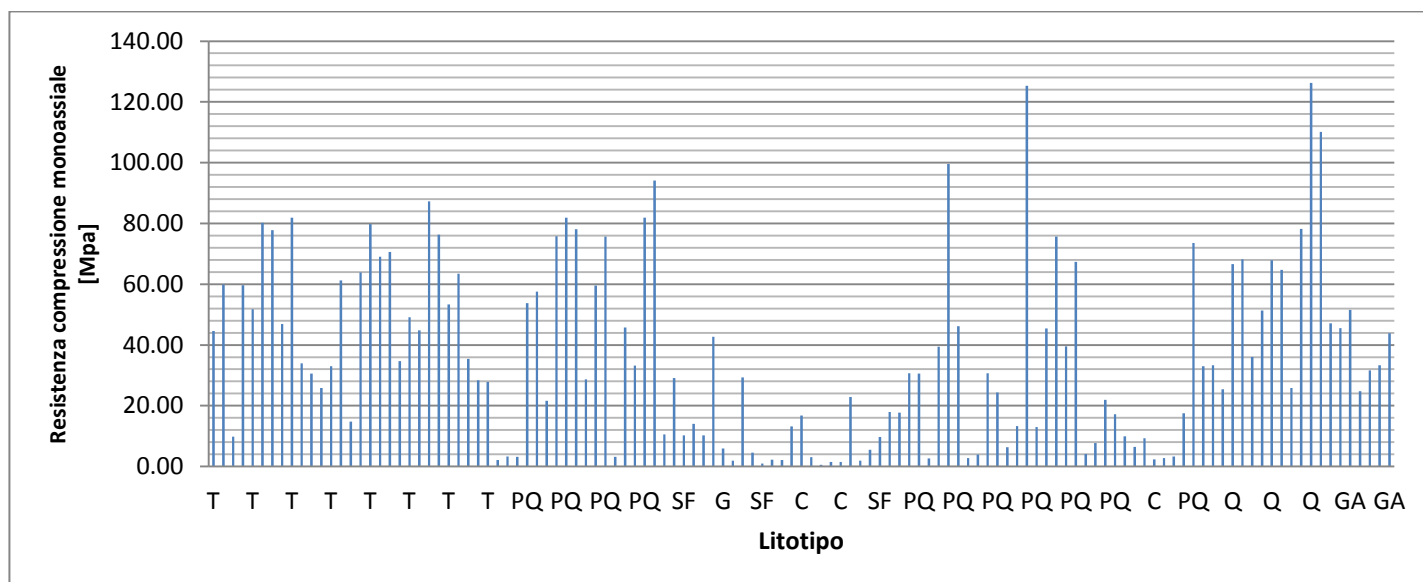
La resistenza alla compressione monoassiale del provino sarà calcolata dividendo il massimo carico da questo sostenuto durante la prova per l'area iniziale della sezione trasversale. Dal tipico diagramma sforzo – deformazione che si ricava da una tale prova sarà possibile ricavare il modulo di Young, definito come rapporto tra la variazione di tensione assiale e la variazione di deformazione assiale prodotta dalla variazione di tensione stessa.

In base ai valori di resistenza alla compressione monoassiale, il campione viene identificato secondo la classificazione proposta da Deere e Miller nel 1966 e di seguito riportata (Tab. 3.4).

| Classe | Descrizione                      | $\sigma_c$ (MPa) |
|--------|----------------------------------|------------------|
| A      | Res. <sup>za</sup> molto alta    | >200             |
| B      | Res. <sup>za</sup> alta          | 100-200          |
| C      | Res. <sup>za</sup> media         | 50-100           |
| D      | Res. <sup>za</sup> bassa         | 25-50            |
| E      | Res. <sup>za</sup> . molto bassa | >25              |

**Tab. 3.4: classificazione roccia sulla base della resistenza alla compressione monoassiale [Deere, Miller; 1966].**

In allegato (Allegato 2 – Risultati delle prove geotecniche) si riporta la resistenza a compressione monoassiale ottenuta per i diversi campioni prelevati alle diverse progressive, in corrispondenza dei differenti litotipi. Di seguito nel grafico si riporta una rappresentazione sintetica della condizione di resistenza alla compressione per i diversi litotipi lungo il campionamento nel cunicolo esplorativo dalla tonalite (T) a sud, agli gneiss anfibolitici (GA) a nord. (fig. 3.11).



**Fig. 3.11: T: tonalite; PQ: paragneiss quarzoso; SF: scisto filladico; G: gneiss; Q: quarzite; GA: gneiss anfibolitico; C: cataclasite. Andamento della resistenza alla compressione monoassiale lungo il cunicolo**

Si noti come complessivamente la roccia interessata dai campionamenti risulta avere una resistenza alla compressione monoassiale da molto bassa a bassa, secondo la classificazione di Deree e Miller del 1966 (vedi Allegato 2); in particolare il tratto peggiore, per valori ed estensione in lunghezza, è compreso tra le progressive 11+807.7 km e 11+835.8 km, corrispondenti al tratto finale del sondaggio SAV6.

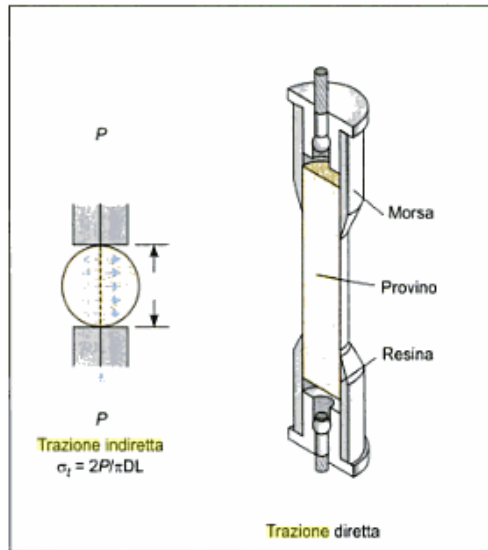
I valori minori interessano le rocce cataclastiche, così altamente fratturate da non riuscire nemmeno a distinguere il litotipo prevalente, i valori più alti invece interessano quarziti e tonaliti (Tab 3.5).

| Litotipo | Co [Mpa] | Classificazione |
|----------|----------|-----------------|
| T        | 54.65    | Media           |
| TM       | 40.80    | Bassa           |
| SF       | 2.69     | Molto Bassa     |
| G        | 30.74    | Bassa           |
| C        | 3.00     | Molto Bassa     |
| Q        | 60.5     | Media           |

**Tab. 3.5: Resistenza alla compressione media per ogni litotipo e classificazione secondo Deree e Miller (1966). Litotipi: T: tonalite; TM: tonalite milonizzata; SF: scisto filladico; G: gneiss (paragneiss quarzoso e gneiss anfibolico); C: cataclasiti; Q: quarziti.**

### 3.4.2 Prova di trazione indiretta

Consiste nel misurare la resistenza a trazione monoassiale di un provino di roccia indirettamente, assumendo che la rottura si produca per trazione quando la roccia si sottopone ad uno stato di sforzo biassiale, con uno sforzo principale di trazione e uno di compressione in intensità non superiore a 3 volte lo stato di sforzo di trazione. Si applica un carico verticale di compressione su un disco o cilindro in roccia, che si colloca in orizzontale tra due placche attraverso le quali si trasmette la forza, fino a raggiungere la rottura (fig. 3.12).

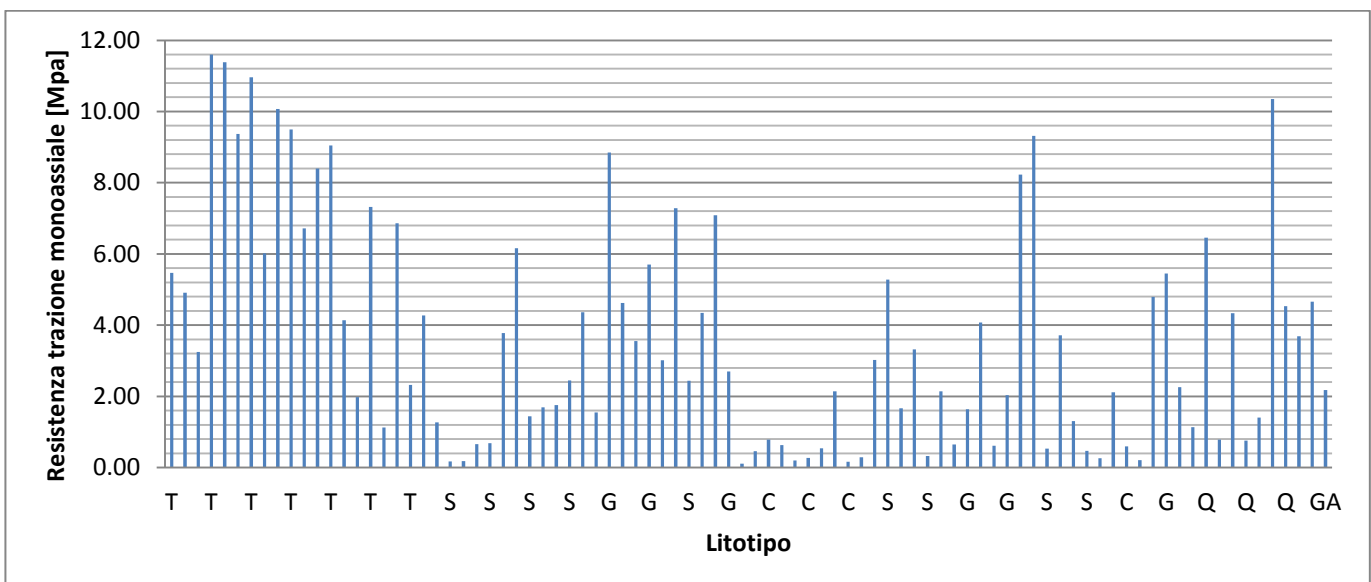


**Fig. 3.12: schema prova di trazione indiretta [Vallejo et al.;2005]**

La resistenza a trazione si ottiene mediante la formula:

$$\sigma_T = \frac{2P}{\pi DL}$$

In Allegato 2 si riportano i risultati di resistenza a trazione T ottenuti per i diversi campioni ai quali è stata applicata la prova. Di seguito invece (fig. 3.13) si riporta l'andamento di tale resistenze per le diverse progressive nei diversi litotipi, dalle tonaliti (T) a sud agli gneiss anfibolitici (GA) a nord; infine, in tabella (tab. 5.3) si riportano i valori medi di suddette rocce rivenute.



**Fig. 3.13: andamento resistenza a trazione monoassiale determinata attraverso la prova di trazione indiretta per i differenti campioni; T: tonalite; G: gneiss; S: scisto; C: cataclasite; GA: gneiss anfibolico.**

| Litotipo | T [Mpa] |
|----------|---------|
| T        | 7.67    |
| TM       | 6.30    |
| SF       | 1.12    |
| G        | 5.40    |
| C        | 0.48    |
| Q        | 3.50    |

**Tab. 3.6: media delle resistenze a trazione per ciascun litotipo. Litotipi: T: tonalite; TM: tonalite deformata; SF: scisto filladico; G: gneiss; C: cataclasite; Q: quarzite.**

Si noti come la condizione peggiore è rappresentata dalle cataclasiti con una resistenza a trazione quasi nulla; le resistenze sono comunque complessivamente basse per tutti i litotipi.

### 3.4.3 Prova a carico concentrato (Point Load Test)

L'importanza di tale prova sta nel fatto che da essa è possibile ricavare un indice di resistenza per la classificazione e la caratterizzazione dei materiali rocciosi. Si tratta di una procedura semplice e speditiva, così come richiesto dalle finalità e dalle applicazioni cui è destinata. Il valore numerico ricavato, è un indice di resistenza ad un carico puntuale che bene si correla con la resistenza a compressione monoassiale della roccia, benchè la rottura si manifesti in genere, sotto condizioni similia quelle ricorrenti in una prova di trazione indiretta [ISRM; 1994]. Il vantaggio di questa determinazione consiste nella economicità dell'attrezzatura e della celertà della prova globalmente intesa: infatti la preparazione del provino è molto semplice e talora non necessaria, e l'attuazione della prova richiede pochi minuti. Da ciò discende la possibilità die seguire, già in cantiere, tale prova sui diversi litotipi investigati, con risparmio economico e di tempo. Tale prova è stata introdotta a sostituzione della prova di compressione monoassiale, che rappresenta la prova più rappresentativa per la classificazione delle rocce. Il valore della resistenza alla compressione uniassiale risulta essere circa 20-25 volte la resistenza al punzonamento; tale rapporto in realtà può variare tra 15 e 50 specialmente nel caso di rocce isotrope e, conseguentemente, l'errore che si commette stimando arbitrariamente il valore di tale rapporto per la valutazione della resistenza alla compressione semplice può essere anche del 100%. Una convenzione

comunemente adottata per il calcolo della resistenza alla compressione monoassiale dato il parametro  $I_{s50}$  ricavato dalla prova PLT è riportata nella tabella sottostante in cui si riportano i valori del coefficiente moltiplicativo K a seconda dei valori del parametro  $I_{s50}$  ottenuto dalla prova (Tab. 3.7).

| $I_s$ (MPa) | K  |
|-------------|----|
| < 3,5       | 14 |
| 3,5 – 6,0   | 16 |
| 6,0 – 1,0   | 20 |
| > 6,0       | 25 |

**Tab. 3.7: coefficiente K moltiplicativo di  $I_{s50}$  per il calcolo della resistenza a compressione monoassiale**

La prova al punzonamento è anche una misura indiretta della prova a trazione, ma questo rappresenta un fatto irrilevante se paragonato al ruolo principale nella classificazione delle rocce in base alla resistenza. Il parametro  $I_{s50}$  è circa 0.80 volte la resistenza a trazione misurata in modo diretto o indiretto.

In Allegato 2, si riportano i risultati ottenuti per le prove condotte sui alcuni dei campioni disponibili; ovviamente tale misura risulta essere sostitutiva della più complessa prova di compressione monoassiale della quale sono già stati esposti i risultati.

In tabella 3.8 si riporta una media dei risultati ottenuti per ciascun litotipo.

| Litotipo | $I_{s50}$ [Mpa] |
|----------|-----------------|
| T        | 2.5             |
| S        | 0.5             |
| G        | 1.4             |
| C        | 0.1             |

**Tab. 3.8: media del parametro di resistenza  $I_{s50}$  per ciascun litotipo. Litotipi: T:tonalite; S:scisti; G:gneiss; C:cataclasiti.**

In accordo con le precedenti prove, le condizioni peggiori di resistenza sono tipiche delle rocce fortemente cataclate, seguite dagli scisti, dagli gneiss ed infine dalle tonaliti.

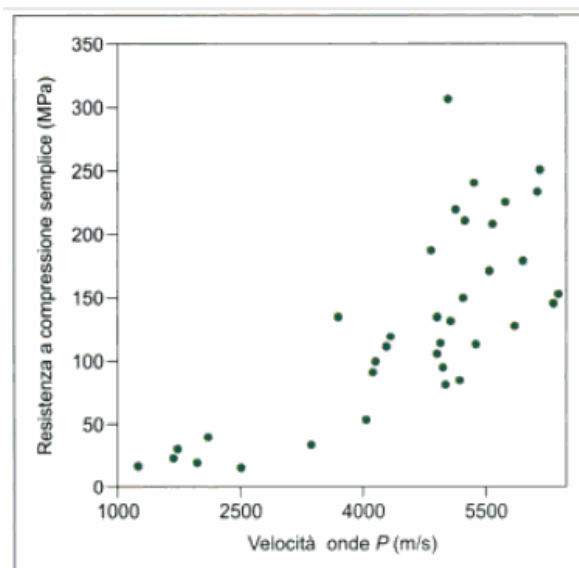
#### 3.4.4 Velocità di propagazione onde S e P

La prova di velocità delle onde soniche permette di misurare la velocità delle onde elastiche longitudinali e trasversali  $V_s$  e  $V_p$ , quando attraversano un provino di roccia



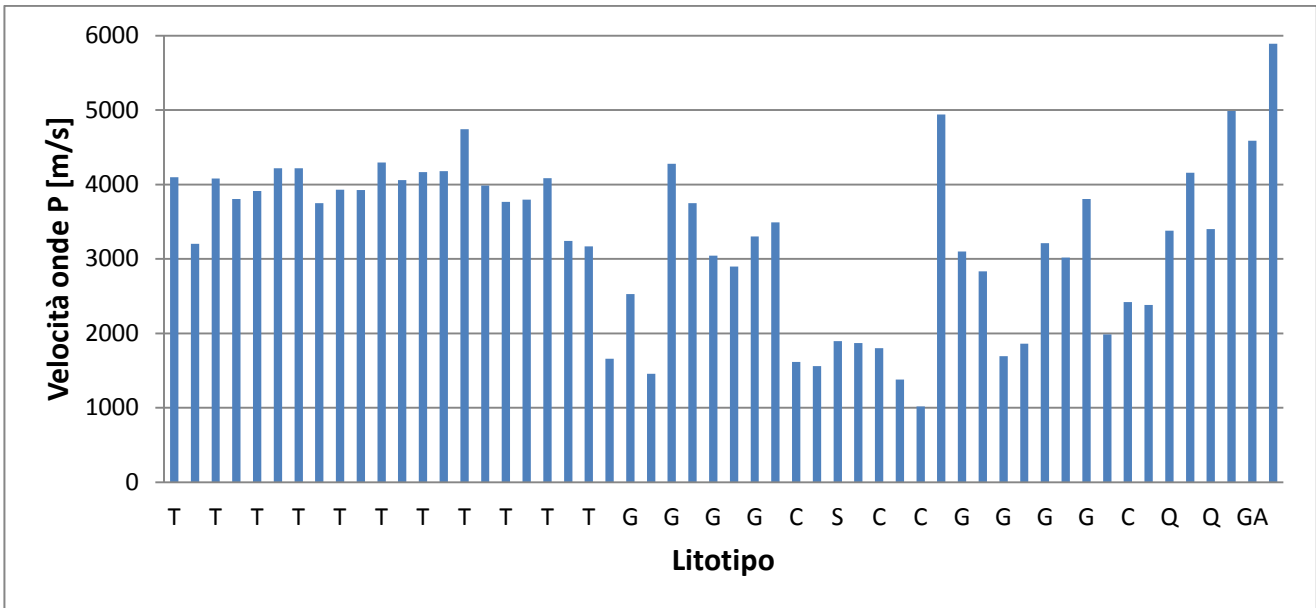
secca o satura. La velocità delle onde è in relazione con le caratteristiche meccaniche del materiale, la sua resistenza e deformabilità, e a partire da questa, si calcolano i moduli di deformazione elastica dinamici  $E_d$  e  $\nu_d$ . La prova consiste nel trasmettere onde longitudinali tramite compressione ultrasonica e misurare il tempo che impiegano dette onde per attraversare il provino. Allo stesso modo si trasmettono onde di taglio mediante impulsi sonici e si registrano i tempi di arrivo. Le velocità corrispondenti si calcolano a partire dai tempi. Il trasmettitore o generatore della forza compressiva e delle pulsazioni si fissa su un estremo del provino, e nell'altro si colloca invece il ricevitore che misura il tempo di ritardo delle onde nell'attraversare la lunghezza del campione di roccia [ISRM; 1989]. La velocità delle onde di taglio è approssimativamente due terzi della velocità delle onde longitudinali.

Il valore di  $V_p$  oltre ad essere in relazione lineare con la deformabilità della roccia, è indicativo della sua qualità, essendo collegato a proprietà quali la porosità e la resistenza a compressione semplice (fig. 3.14); il coefficiente di Poisson non mostra invece una correlazione con  $V_p$  [Vallejo et. al.; 2005].



**Fig. 3.14: rapporto tra velocità onde soniche e la resistenza a compressione semplice [Vallejo et. al; 2005]**

In Allegato 2 sono riportati i risultati ottenuti per i campioni sottoposti a prova; di seguito invece si riporta una rappresentazione sintetica della situazione lungo il cunicolo (fig. 3.15).



**Fig. 3.15:** andamento della velocità di propagazione delle onde longitudinali nelle varie formazioni rocciosi lungo il cunicolo; T:tonalite; G:gneiss, S:scisto; C:cataclasiti; Q:quarziti; GA:gneiss anfibolico.

| Litotipo | Vp [m/s] | Vs [m/s] |
|----------|----------|----------|
| T        | 3934.7   | 2265     |
| S        | 1749.6   | 957.3    |
| G        | 3183.7   | 1866.8   |
| C        | 1667     | 996.6    |
| Q        | 3661.2   | 2221.7   |
| GA       | 5239.2   | 2844.2   |

**Tab. 3.9:** valori medi di velocità di propagazione onde soniche per litotipo. Litotipi: T:tonalite; S:scisto; G:gneiss; C:cataclasiti; Q:quarzite; GA:gneiss anfibolico.

### 3.4.5 Prova di taglio diretto

Consiste nel misurare direttamente la resistenza a trazione monoassiale di un cilindro in roccia. Per questo si vincolano saldamente le estremità del provino e si applica una forza di trazione monoassiale nella direzione di allungamento del provino (fig. 3.12). Si devono eseguire gli stessi procedimenti per le prove di compressione. La resistenza a trazione si calcola dividendo la forza applicata al momento della rottura per l'area circolare del provino [ISRM; 1981]. Tali prove sono di difficile realizzazione, sia per il

problema di tagliare i provini in modo corretto sia per assicurare perfetta adesione del provino alle teste di trazione [Vallejo et. al.; 2005].

Tale prova è stata effettuata solo sulle rocce cataclastiche del tratto compreso tra le progressive 11815.1 – 11829.2 m riportando i risultati illustrati nella tabella sottostante (Tab. 3.10).

| Progressiva [m]    | $\sigma_n$ [Mpa] | $\tau_{picco}$ [Mpa] | $\tau_{residuo}$ [Mpa] | $\sigma_{picco}$ [Mpa] | $\phi_{picco}$ [°] | $\sigma_{residuo}$ [Mpa] | $\phi_{residuo}$ [°] | Litotipo |
|--------------------|------------------|----------------------|------------------------|------------------------|--------------------|--------------------------|----------------------|----------|
| 11815.10           | 2.53             | 1.37                 | 0.96                   | 0.28                   | 22.70              | 0.02                     | 20.10                | C        |
| 11816.00           | 5.00             | 2.30                 | 1.80                   | 0.28                   | 22.70              | 0.02                     | 20.10                | C        |
| 11816.30           | 7.53             | 3.46                 | 2.80                   | 0.28                   | 22.70              | 0.02                     | 20.10                | C        |
| 11822.60           | 2.49             | 2.06                 | 1.36                   | 0.46                   | 31.60              | 0.08                     | 25.50                | C        |
| 11822.65           | 5.00             | 3.37                 | 2.28                   | 0.46                   | 31.60              | 0.08                     | 25.50                | C        |
| 11822.70           | 7.41             | 5.09                 | 3.72                   | 0.46                   | 31.60              | 0.08                     | 25.50                | C        |
| 11821.00           | 2.53             | 1.39                 | 0.77                   | 0.53                   | 25.20              | 0.03                     | 20.60                | C        |
| 11825.70           | 5.24             | 3.68                 | 2.45                   | 0.53                   | 25.20              | 0.03                     | 20.60                | C        |
| 11829.20           | 7.77             | 3.83                 | 2.73                   | 0.53                   | 25.20              | 0.03                     | 20.60                | C        |
| <b>Valori medi</b> | <b>5.06</b>      | <b>2.95</b>          | <b>2.10</b>            | <b>0.42</b>            | <b>26.50</b>       | <b>0.04</b>              | <b>22.07</b>         |          |

**Tab. 3.10: risultati prova di taglio diretto su kakiriti**

### 3.4.6 Slake Durability Test

La durezza è la resistenza che la roccia presenta di fronte a processi di alterazione e disintegrazione, proprietà alla quale ci si riferisce anche come alterabilità, definendosi in questo caso la tendenza alla rottura dei componenti o delle strutture della roccia. Tale proprietà si valuta mediante una prova specifica, lo SDT (Slake Durability Test) (Franklin, 1971), che consiste nel sottoporre il materiale in laboratorio, precedentemente frammentato, a cicli di essiccazione-idratazione-sgretolamento della durata di 10 minuti. I frammenti della roccia devono essere pesati dopo l'essiccazione in forno e introdotti in un tamburo con una maglia esterna di 2 mm che si riempie con acqua fino ad un livello al di sotto dell'asse del tamburo. Si procede ruotando il tamburo un numero determinato di volte. I campioni che rimangono nel tamburo si estraggono, si essiccano nel forno e si pesano, ripetendo nuovamente il ciclo. L'indice di durezza  $I_D$ , rappresenta la percentuale in roccia, in peso secco, che rimane nel tamburo dopo uno due cicli di sgretolamento ( $I_{D1}$  e  $I_{D2}$ ). Tale valore può variare tra lo 0% ed il 100% [Vallejo et. al.;2005]:

$$I_D(\%) = \frac{\text{peso secco dopo uno o due cicli}}{\text{peso iniziale del campione}}$$

La classificazione standard si basa sul valore di  $I_{D2}$ , e la letteratura riporta come soglia distintiva tra le terre e le rocce deboli, l'80%.

In tabella 3.11 la classificazione sulla base dei valori dei due indici.

| Livello durabilità | % trattenuta al primo ciclo | % trattenuta al secondo ciclo |
|--------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Molto alta         | >99                         | >98                           |
| Alta               | 98-99                       | 95-98                         |
| Medio alta         | 95-98                       | 85-95                         |
| Media              | 85-95                       | 60-85                         |
| Bassa              | 60-85                       | 30-60                         |
| Molto bassa        | <60                         | <30                           |

Tab. 3.11: classificazione sulla base degli indici dello SDT [Goodman; 1980]

In Allegato 2, si riportano i risultati per le diverse progressive corrispondenti ai vari campioni a cui è stato applicato il test; si noti come la maggior parte delle prove è stata condotta su rocce deboli quali gli scisti e alterate quali le cataclasiti.

È interessante notare la diminuzione degli indici di durabilità passando dalla tonalite agli scisti fino alle cataclasiti. Si riporta tale diminuzione nel grafico sottostante (fig. 3.16).

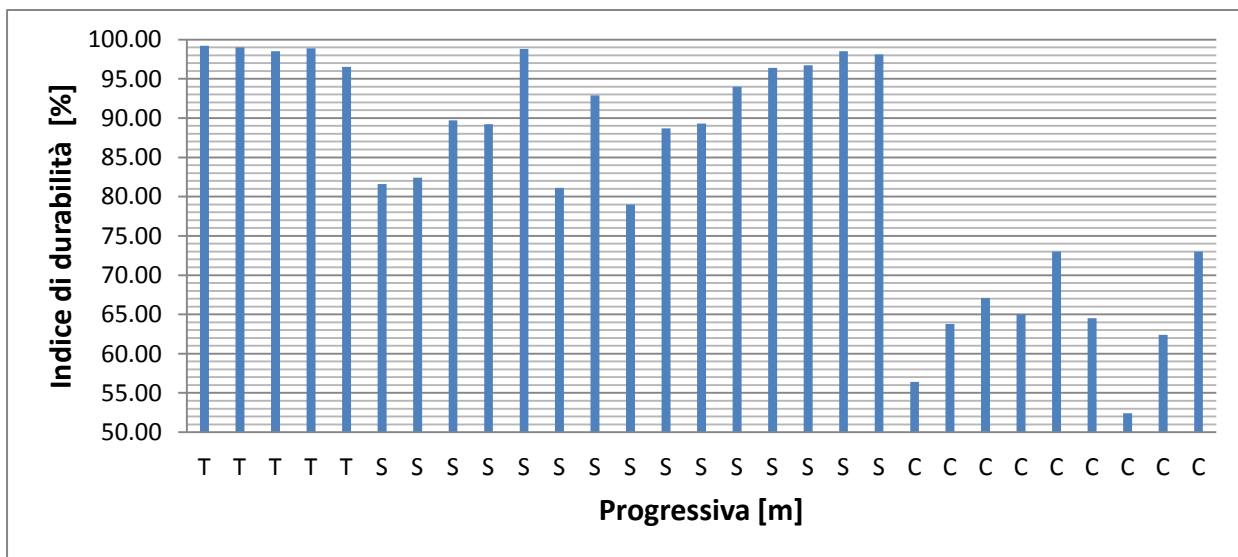
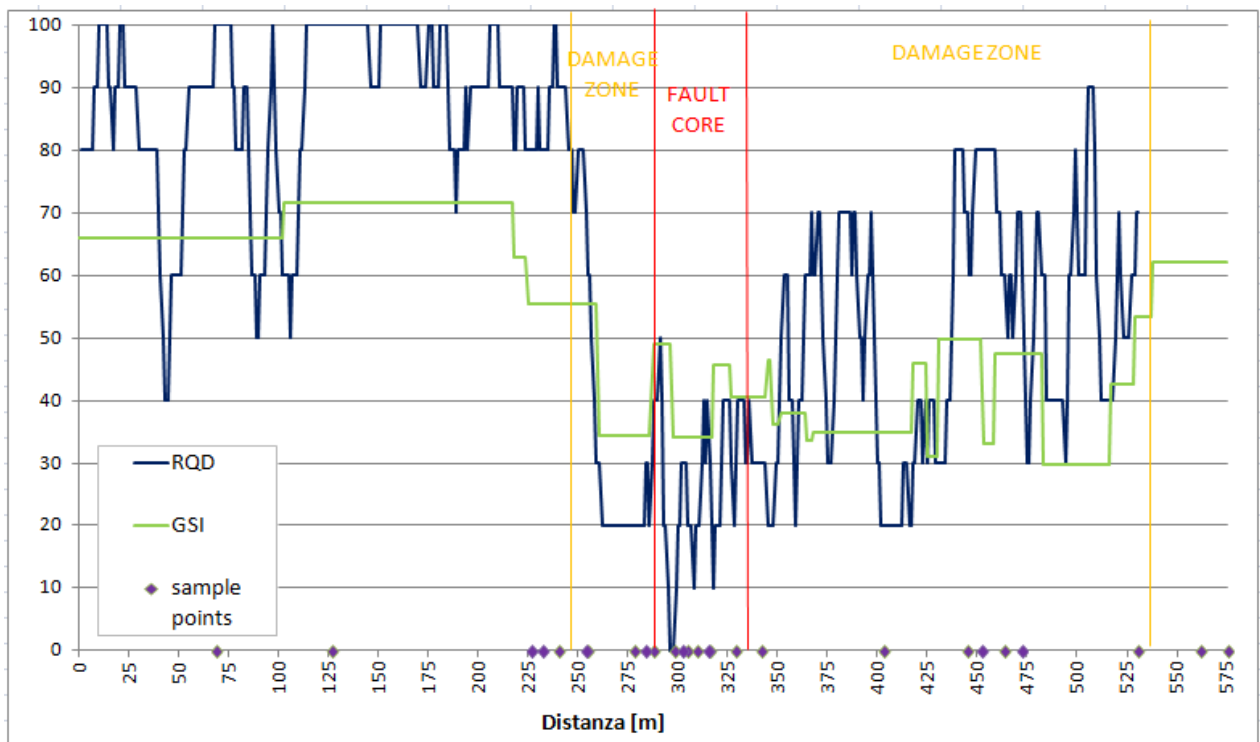


Fig. 3.16: andamento della durabilità nelle varie formazioni rocciose lungo il cunicolo esplorativo. T:tonalite; S:scisti; C:cataclasiti.

### 3.5 Considerazioni conclusive

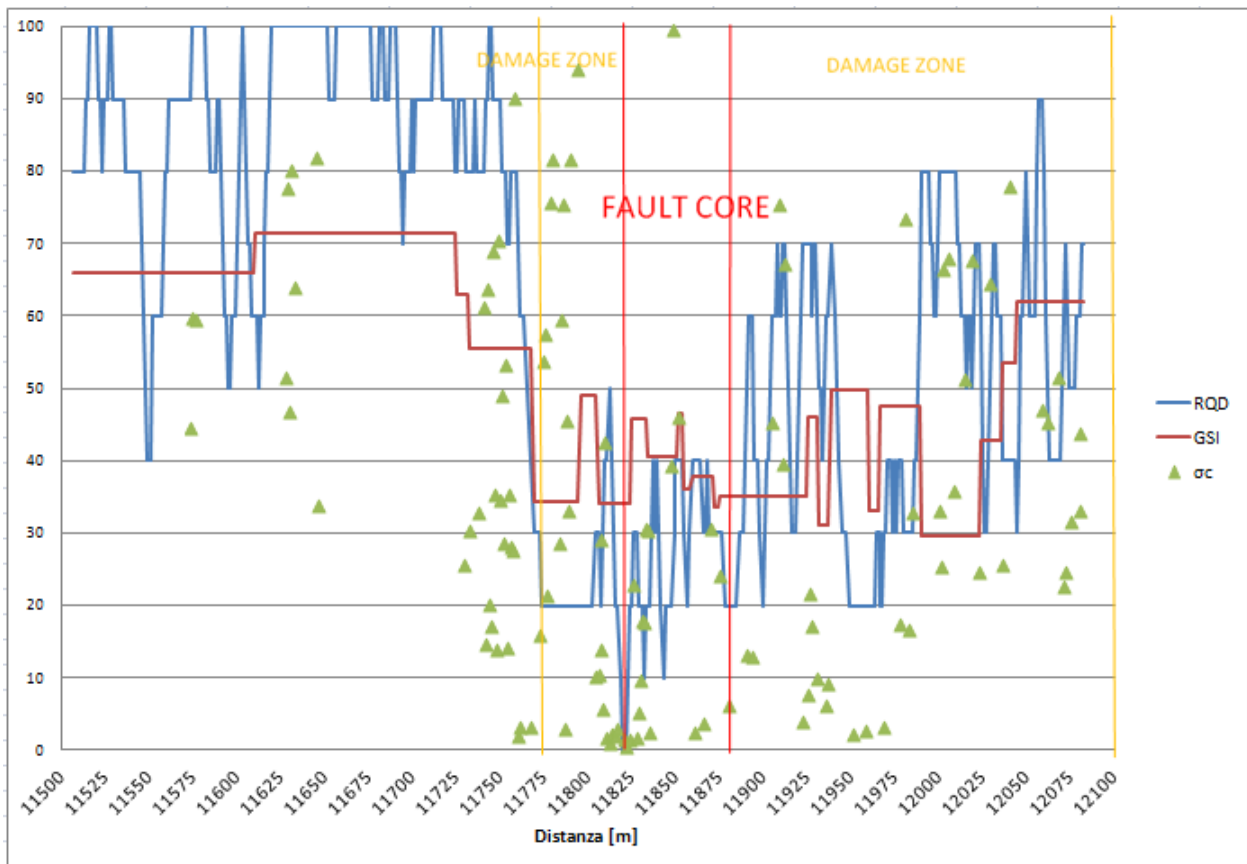
Di seguito (fig. 3.17) si riporta un'immagine ben rappresentativa della situazione analizzata alla macro-scala; in particolare si riporta l'andamento dell'indice RQD, calcolato come media mobile su 5 m di carota, il GSI (ricavato dai rilievi eseguiti in avanzamento al fronte di scavo) e i punti di campionamento alle progressive alle quali sono state prelevate le sezioni sottili per l'analisi alla micro-scala (si veda Cap. 5 – Analisi alla micro-scala). Si noti come le condizioni più critiche siano quelle proprie della zona denominata "fault core", e delle relative zone di danneggiamento "damage zone" prima e dopo di essa.



**Fig. 3.17:** Caratterizzazione delle rocce di faglia del tratto di cunicolo indagato alla macro-scala: indice RQD, indice GSI e punti di campionamento delle sezioni sottili. Tratto di 576 m dalla progressiva 11+505 km alla progressiva 12+082 km.

Per quanto riguarda invece la caratterizzazione alla meso-scala, quale parametro rappresentativo è stata scelta la resistenza alla compressione monoassiale, ricavata dalla prova di compressione uniassiale o dalla prova PLT. Di seguito, si riporta un grafico (fig. 3.18) che sintetizza la situazione alla macro-scala analizzata, riportando, per completezza, ancora i valori di RQD (e GSI) rappresentativi della caratterizzazione

alla macro-scala. Anche a questa scala di indagine, la situazione più critica è la stessa evidenziata nel grafico precedente.



**Fig. 3.18:** Caratterizzazione delle rocce di faglia del tratto di cunicolo indagato alla meso-scala: indice RQD, indice GSI e resistenza alla compressione monoassiale. Tratto considerato di 576 m tra le progressive 11+505 km (a sud) e 12+082 km (a nord).



## Capitolo 4

### Caratterizzazione alla micro-scala

Nei capitoli precedenti è stato introdotto il contesto tettonico generale delle litologie interessate dal cunicolo (cap. 2) delle quali poi sono state illustrate le caratteristiche qualitative alla macroscale e infine le grandezze di resistenza risultanti dalle prove geotecniche di laboratorio sui campioni prelevati (cap. 3). In questo capitolo, ci si pone l'obiettivo di scendere ancor di più nel dettaglio della caratterizzazione delle rocce di faglia attraversate dal cunicolo, attraverso un'analisi microscopica di tipo petrografico e strutturale.

L'importanza di molte caratteristiche mineralogiche e strutturali del materiale roccioso nei riguardi del suo comportamento meccanico ha fatto sì che la Società Internazionale di Meccanica delle Rocce (ISRM) ritenesse opportuno standardizzarne la descrizione petrografica. Infatti, fattori quali il tipo, la qualità relativa, la disposizione e l'alterazione dei costituenti mineralogici, unitamente ai difetti del materiale, influiscono su diverse caratteristiche meccaniche e sono spesso legati a caratteristiche strutturali ed altri processi secondari alla scala dell'ammasso roccioso. Basti pensare, ad esempio, al comportamento delle macchine da scavo, da un lato, o all'anisotropia delle caratteristiche meccaniche conseguente alla tessitura anisotropa della roccia, dall'altro, non dimenticando il decadimento di resistenza e rigidità conseguente ad una pur lieve alterazione o alla micro fessurazione della roccia.

L'ingegnere geotecnico responsabile della caratterizzazione dell'ammasso roccioso deve essere consapevole di poter ricavare da questa indagine indicazioni utili per le scelte progettuali e realizzative, così l'analisi deve essere effettuata con una conoscenza della ricaduta "geotecnica" dell'esame petrografico. È necessario pertanto che un'analisi di questo tipo, all'interno di un contesto di caratterizzazione geomeccanica delle rocce interessate da lavori di scavo, debba essere sensibile a quantificare tutti quei fattori propri della tessitura del materiale che si riflettono direttamente sul suo comportamento meccanico e che non sarebbero altrimenti evidenziati in una normale analisi petrografica [Indicazioni ISRM; 2001]

#### 4.1 Strumentazione

Nell'ambito del presente lavoro di tesi si hanno a disposizione 31 sezioni sottili ricavate dai campioni di roccia prelevati nel tratto più critico compreso tra le progressive 11+575 km e 12+082 km, misurate a partire dal portale di Aica.

La sezione sottile rappresenta la più piccola scala di indagine alla quale è possibile analizzare il materiale roccioso; essa consiste in una preparazione di laboratorio cui vengono sottoposti i campioni in roccia, minerali o suolo, al fine di renderli analizzabili con un microscopio petrografico (fig. 4.1).

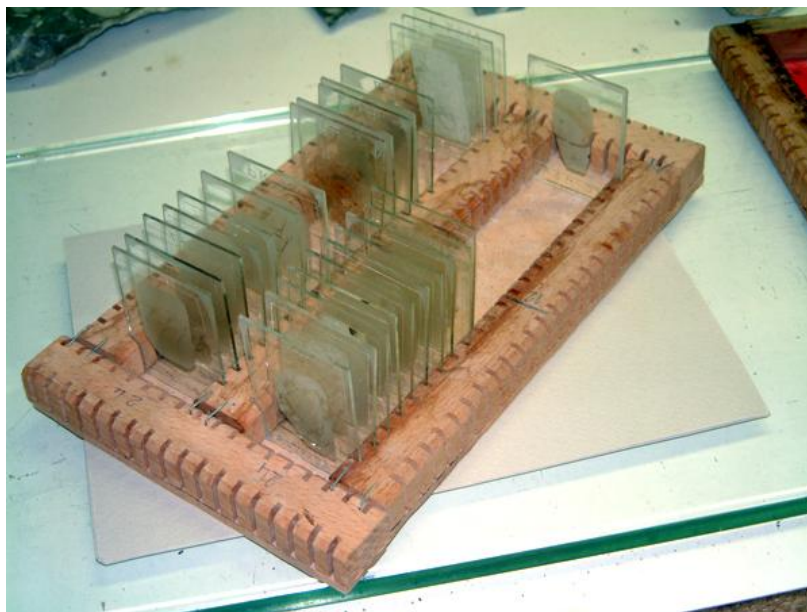
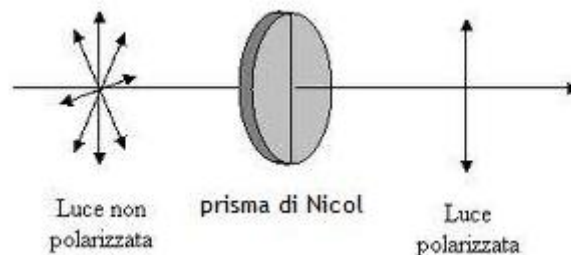


Fig. 4.1: Sezioni sottili del tratto indagato per l'analisi alla micro-scala

Tali sezioni sottili derivano dal confezionamento di blocchi cilindrici di altezza pari a circa 1 cm direttamente dai campioni prelevati in carotaggio; successivamente dal cilindro sono state tagliate porzioni di materiale a facce piane e parallele dello spessore di qualche mm, rettificando poi una delle due basi con polvere abrasiva e acqua. La superficie così preparata viene incollata con un vetrino portaoggetti mediante resina epossidica. Si procede infine alla levigatura dell'altra faccia fino ad ottenere uno spessore di roccia pari a  $30\mu\text{m}$ . Il preparato così ottenuto ha le dimensioni standard di 2-3x4-5 cm.

Tali vetrini, preparati presso il Laboratorio di Petrografia dell'Università degli Studi di Milano, sono stati analizzati attraverso un apposito microscopio da petrografia, definito più rigorosamente microscopio ottico polarizzatore a luce trasmessa. Questo microscopio, disponibile presso il Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Ambientale, Infrastrutture Viarie, sezione Infrastrutture Viarie del Politecnico di Milano, è sostanzialmente simile ad un normale microscopio, da cui differisce per la presenza di:

- Polarizzatore: filtro interposto tra la sorgente luminosa e il tavolino portaoggetti, che converte la luce da parallela a "polarizzata"; la luce polarizzata si ottiene facendo passare la luce normale attraverso un prisma polarizzatore (prisma di Nicol) e consiste di raggi luminosi che vibrano in una sola direzione (perpendicolare alla direzione di propagazione). Tale prisma (fig. 4.2) divide il raggio di luce normale incidente in due fasci di luce tra loro perpendicolari; uno dei due raggi è deviato fuori dal prisma, cosicché la luce trasmessa dal prisma è polarizzata secondo un solo piano.



**Fig. 4.2: schema di funzionamento del prisma di Nicol**

I raggi polarizzati, attraversando i vari minerali presenti nella sezione sottile, vengono rifratti e riflessi in maniera differente da ciascun minerale, il quale, avendo ben distinte proprietà ottiche, assume colorazioni ben precise che ne consentono l'identificazione e conseguentemente la classificazione della roccia che lo contiene.

- Analizzatore: filtro posto tra l'obiettivo e l'oculare; la sua attivazione in contemporanea al polarizzatore porta alla cosiddetta condizione di estinzione, ovvero all'annullamento del raggio luminoso incidente. La figura di estinzione è visibile nell'oculare come completamente nera e solo a nicols incrociati.

Nella tabella sottostante si riporta l'elenco delle 31 sezioni sottili a disposizione, di cui in allegato (allegato 3 – Documentazione fotografica) si riporta la documentazione fotografica, la progressiva alla quale sono state ricavate e il litotipo rappresentato. In particolare si contano:

- 3 sezioni sottili di tonalite più o meno fratturata (T)
- 4 sezioni sottili di tonalite milonizzata (TM)
- 7 sezioni sottili di scisti filladici (SF)
- 6 sezioni sottili di paragneiss quarzoso (PQ)
- 7 sezioni sottili di cataclasiti (C)
- 3 sezioni sottili di quarzite (Q)
- 1 sezione sottile di gneiss anfibolico (GA)

| <b>Codice id.</b> | <b>Progressiva [m]</b> | <b>Litotipo</b> |
|-------------------|------------------------|-----------------|
| GBI44             | 11575                  | T               |
| GBI43             | 11610                  | T               |
| GBI45             | 11633                  | T               |
| GBI47             | 11735                  | TM              |
| GBI48             | 11735                  | TM              |
| GBI46             | 11747                  | TM              |
| 11750             | 11758                  | TM              |
| GBI53             | 11760                  | SF              |
| S730              | 11762                  | SF              |

|       |       |    |
|-------|-------|----|
| GBI52 | 11783 | SF |
| S752  | 11784 | SF |
| GBI54 | 11791 | SF |
| GBI49 | 11795 | PQ |
| GBI50 | 11801 | PQ |
| GBI51 | 11809 | PQ |
| 11810 | 11810 | PQ |
| GBI56 | 11812 | C  |
| GBI57 | 11816 | C  |
| S789  | 11821 | C  |
| GBI58 | 11822 | C  |
| 11838 | 11838 | SF |
| S7113 | 11845 | SF |
| S7178 | 11910 | PQ |
| 11952 | 11952 | C  |
| S7220 | 11952 | C  |
| 11973 | 11973 | C  |
| 11980 | 11980 | PQ |
| S7269 | 12001 | Q  |
| S7301 | 12033 | Q  |
| S7334 | 12066 | Q  |
| S7350 | 12082 | GA |

**Tab. 4.1: elenco delle sezioni sottili a disposizione [Classificazione BBT; 2013]**

La classificazione riportata in tabella 4.1 si rifà a quanto stabilito dalle analisi condotte per la società BBT conducente i lavori di scavo. Tuttavia, essendo le rocce interessate dall'analisi estremamente alterate e modificate, risulta estremamente difficile attribuire alla singola sezione sottile una classificazione rigida attraverso un unico litotipo.

Dall'analisi effettuata presso il Politecnico di Milano, risulta ad esempio che la sezione sottile S730, classificata come SF, sia invece tonalite molto alterata con clorite che ha sostituito la biotite e in cui l'anfibolo appare verde e cloritizzato (vedi fig. 4.10, sezione *Scisti*). Inoltre, le sezioni sottili classificate come quarzite Q, alla fine del tratto considerato, siano più che altro paragneiss quarzítico contenenti parecchio plagioclasio. Infine, l'ultima sezione sottile identificata gneiss anfibolico GA, sarebbe meglio classificabile con il litotipo gneiss a granato, ricca di muscovite, granato rimaneggiato, calcite ed epidoti (non anfiboli).

Il fine di tali analisi, nel contesto di questo studio, non è solo un puro studio petrografico e tessiturale delle sezioni sottili, bensì lo studio delle caratteristiche microstrutturali, di alterazione fisica e chimica conseguente alla deformazione tettonica che ha interessato le zone di indagine, da correlare con le grandezze di resistenza ricavate alla meso e macroscale.

#### **4.2 Standardizzazione dell'analisi petrografica ai fini ingegneristici**

La descrizione micro petrografica delle rocce a fini ingegneristici comprende la determinazione di tutti quei parametri che non possono essere ottenuti da un esame macroscopico del campione di roccia – come ad esempio i costituenti mineralogici, la dimensione dei grani e la tessitura – e che hanno un'influenza sul comportamento meccanico dell'ammasso roccioso. L'analisi delle sezioni sottili è un comune metodo di analisi microscopica per i minerali (materiali trasparenti). I passaggi che dovrebbero essere seguiti per un'analisi che sia il più completa e standardizzata possibile sono:

- Descrizione dei minerali presenti: in modo da classificare la roccia come ignea, metamorfica o sedimentaria, determinandone la composizione modale.
- Determinazione delle microfessure e dell'alterazione secondaria: cricche, microfessure e fasce di materiale visibilmente più debole, che potrebbero influire sulla resistenza o sul comportamento meccanico della roccia.
- Determinazione della dimensione dei grani: una stima approssimativa delle dimensioni medie dei grani fa parte normalmente dell'analisi; è risaputo come il comportamento di alcune tipologie di rocce dipenda dalla dimensione dei grani che la compongono. La determinazione di individui tondeggianti non presenta grossi problemi, al contrario, la determinazione di individui prismatici o di forma irregolare può essere difficoltosa.
- Analisi della disposizione spaziale dei costituenti: in termini di semplici osservazioni che potrebbero riflettersi sul comportamento meccanico della roccia. Ovvero, commenti riguardanti l'orientazione dei grani, la loro forma, i contatti tra i grani, matrice e cemento.



### 4.3 Sezioni sottili delle rocce di faglia del cunicolo esplorativo

#### 4.3.1 Caratteristiche mineralogiche

Il primo passo nella descrizione petrografica e strutturale delle sezioni sottili è il riconoscimento dei minerali che costituiscono la sezione analizzata per la classificazione della roccia. Nel nostro caso, grazie alle previsioni geologiche e alle prove effettuate in laboratorio, la classificazione delle rocce rivenute è stata data già prima di effettuare l'analisi alle sezioni sottili. Si procederà poi alla misura della composizione modale dei vari minerali e all'osservazione del livello di alterazione degli stessi, rispetto ad una roccia dello stesso litotipo ma intatta, la quale cioè non ha subito nel corso della sua storia processi di rottura fragile o duttile. Nello specifico, le rocce interessate dalle analisi effettuate alla diversa scala sono di tipo:

- Magmatico: Tonalite
- Metamorfico: Gneiss, Scisti, Quarzite
- Cataclasiti

#### *Tonalite*

La Tonalite è una roccia magmatica intrusiva felsica con tessitura faneritica. Nell'ambito dei sondaggi effettuati, esse sono state rivenute alle seguenti progressive:

| Sondaggio | Progressive [km]    | Potenza [m] | Descrizione   |
|-----------|---------------------|-------------|---|
| SAV6      | 11+505.5 – 11+727.7 | 222.2       | Tonaliti poco o mediamente fratturate, a tratti intensamente fratturate ed alterate |
| SAV6      | 11+727.7 – 11+758.5 | 30.8        | Tonaliti più o meno milonizzate e alterate  |
| SAV7      | 11+732 – 11+763     | 31          | Tonaliti più o meno milonizzate e alterate  |

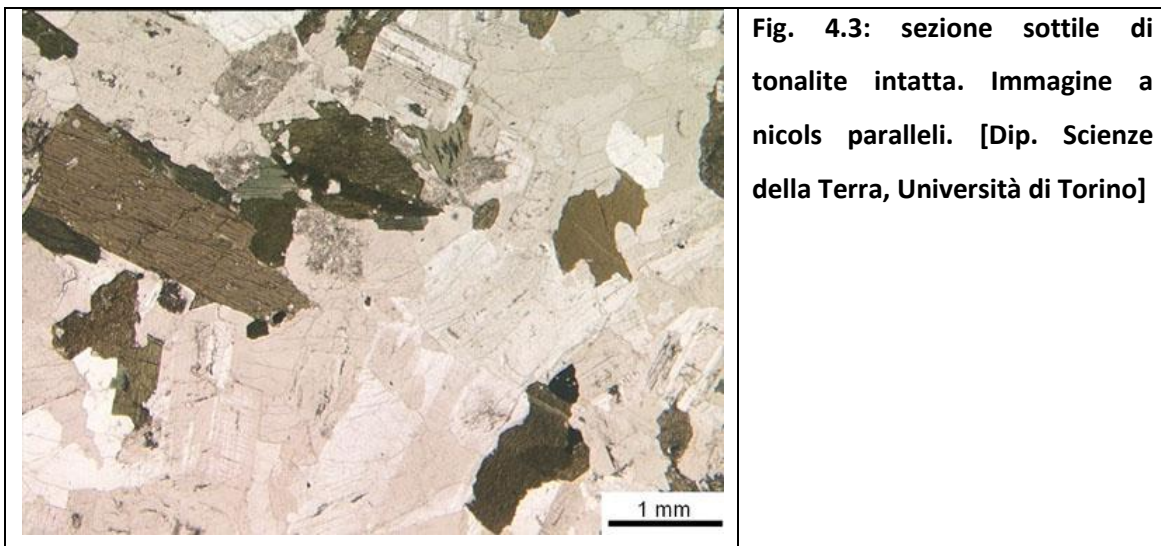
**Tab. 4.2: tonaliti rivenute nei sondaggi effettuati**

Grazie all'analisi mineralogica delle sezioni sottili di tonalite a disposizione, la composizione di tali rocce risulta essere:

- Feldspati sericitizzati 40 – 53%, dimensione dei grani 0.5 – 3.5 mm
- Quarzo 25 – 40%, dimensione dei grani 0.2 – 3.5 mm
- Anfibolo 9 – 20%, dimensione dei grani 0.2 – 10 mm
- Biotite 7 – 9%, dimensione dei grani 0.1 – 2.8 mm
- Opachi 2 – 10%, dimensione dei grani 0.05 – 0.2 mm

Le tonaliti milonizzate non presentano biotite, che ha subito clorizzazione. Gli anfiboli sono più rotti rispetto alle sezioni di tonalite vera e presentano un bordo spesso diclorato; essi sono spesso trasformati in clinocloro. Solo nella sezione sottile GBI48 si trova ancora più biotite che clorite, evidenza del fatto che tale sezione sottile è meno alterata delle altre e presumibilmente appartenente al gruppo delle tonaliti vere, non di quelle milonizzate, oppure rappresenta un prodotto intermedio tra le due tipologie di litotipo.

Di seguito si riporta un'immagine di sezione sottile di tonalite appartenente ad una roccia intatta a confronto con una delle sezioni sottili analizzate.

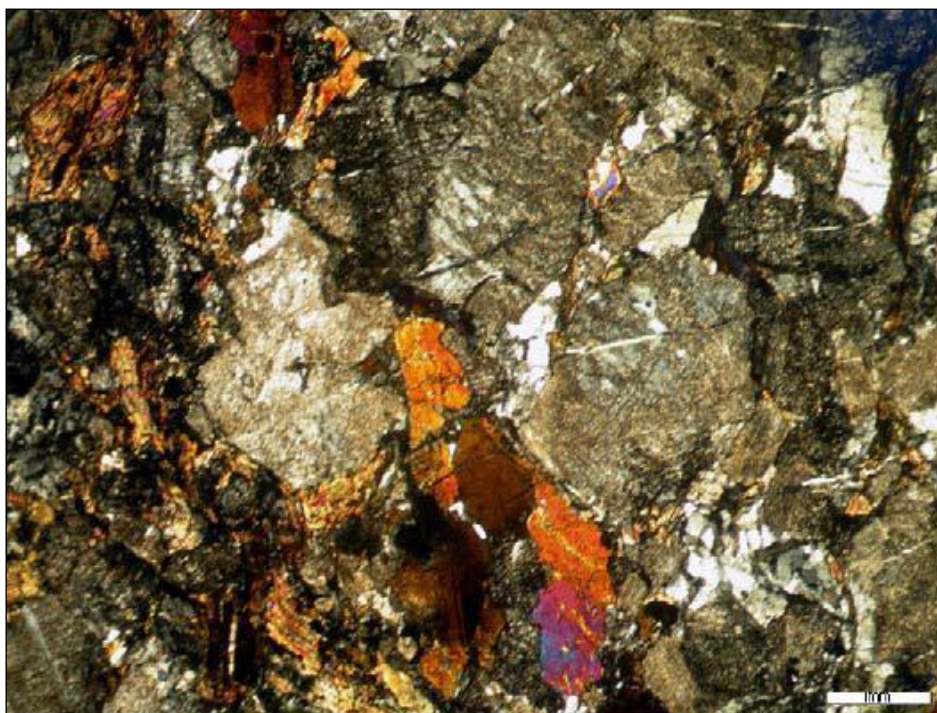


**Fig. 4.3: sezione sottile di tonalite intatta. Immagine a nicols paralleli. [Dip. Scienze della Terra, Università di Torino]**



**Fig. 4.4: sezione sottile GBI48, progressiva 11+735 km, tonalite milonizzata. Immagine a nicols paralleli.**

Il quarzo si presenta spesso deformato con la classica estinzione ondulata a formare individui policristallini; tale condizione, dovuta alla presenza di deformazioni interne al cristallo, è causata dal diverso cromismo del minerale a seconda di come la luce vi passa attraverso. Il feldspato, costituente principale della roccia è costituito per la maggior parte da plagioclasio (95%) che appare estremamente alterato e si presenta come un aggregato microcristallino (probabilmente si tratta di minerali argillosi). Le biotiti appaiono nel loro classico pleocroismo giallo – marrone mentre gli anfiboli si presentano nel colore verde. Infine, i minerali opachi sono costituiti da piccoli cristalli neri dispersi nella matrice della roccia (vedi fig. 4.5).



**Fig. 4.5:** ingrandimento della sezione sottile GBI45, tonalite fratturata, progressiva 11+633 km; immagine a nicols incrociati. I minerali grigi dalle dimensioni maggiori sono feldspato e quarzo, la biotite è giallo-marrone ed infine i minerali opachi, piccoli e dispersi nella matrice.

### *Gneiss*

Tra le rocce metamorfiche invece vi sono gli gneiss, nello specifico paragneiss quarzoso, roccia metamorfica di grado medio-alto che deriva dal metamorfismo di una roccia sedimentaria. Nell'ambito dei sondaggi effettuati si osservano paragneiss quarzosi alle seguenti progressive:

| <b>Sondaggio</b> | <b>Progressive [km]</b> | <b>Potenza [m]</b> | <b>Descrizione</b>  |
|------------------|-------------------------|--------------------|---------------------|
| SAV6             | 11+793 – 11+810         | 17                 | Gneiss              |
| SAV7             | 11+784.8 – 11+789.8     | 5                  | Paragneiss quarzoso |
| SAV7             | 11+805.7 – 11+815.8     | 10.1               | Paragneiss quarzoso |
| SAV7             | 11+829.7 – 11+833.4     | 3.7                | Paragneiss quarzoso |
| SAV7             | 11+889.5 – 11+896       | 6.5                | Paragneiss quarzoso |
| SAV7             | 11+901 – 11+944.9       | 43.9               | Paragneiss quarzoso |
| SAV7             | 11+978.8 – 11+990.4     | 11.6               | Paragneiss quarzoso |

**Tab. 4.3:** paragneiss quarzosi rinvenuti nei sondaggi effettuati


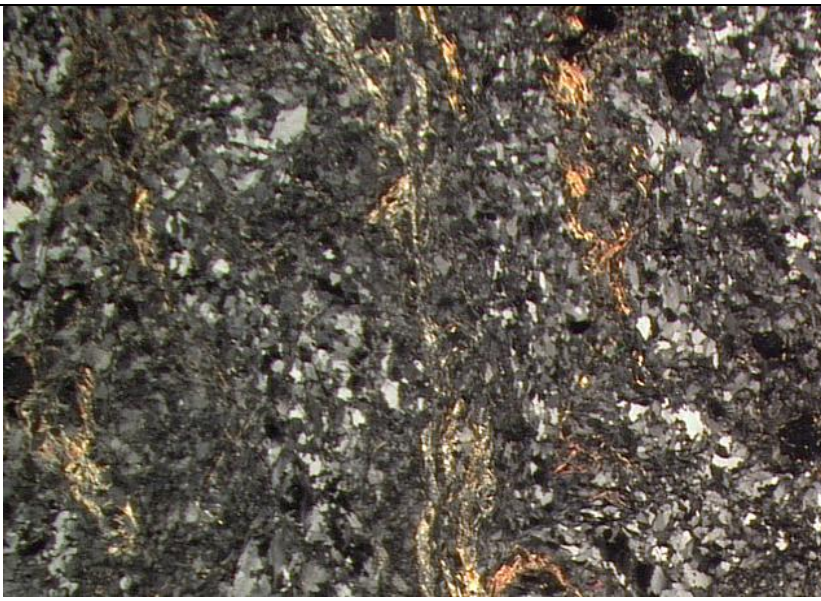
Dall'analisi petrografica i componenti mineralogici risultano essere così distribuiti:



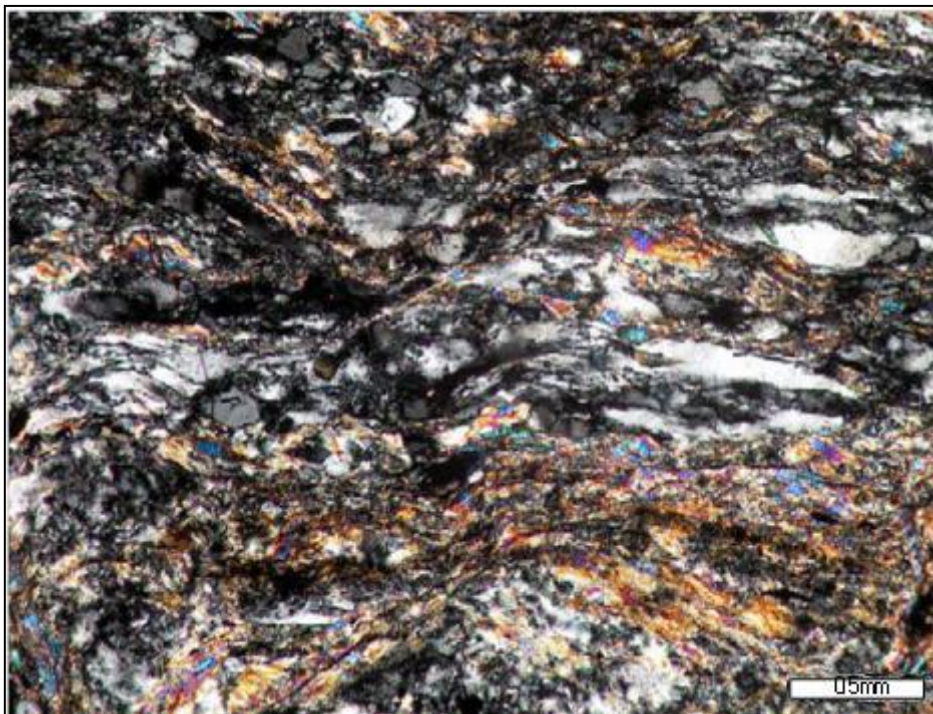
- Quarzo 35 – 45%, dimensione grani 0.1 – 1.5 mm
- Muscovite 15 – 20%, dimensione grani 0.1 – 1.8 mm
- Feldspati 5 – 30%, dimensione grani 0.2 – 1.2 mm
- Carbonato di calcio 10 – 20%, dimensione grani 0.2 – 1.2 mm
- Opachi 5 – 20%, dimensione grani 0.05 – 0.8 mm

Tra le sezioni sottili classificate come paragneiss quarzoso, le sezioni GBI51 e 11+810 rappresentano cataclasiti a granato con calcite secondaria.

Di seguito si riportano due tra le sezioni sottili analizzate di paragneiss quarzoso.

|  |   |
|--|---|
|   | <p><b>Fig. 4.6: sezione sottile GBI50, paragneiss quarzoso, progressiva 11+801 km. Immagine a nicols incrociati.</b></p>  |
|  | <p><b>Fig. 4.7: sezione sottile 11+980, paragneiss quarzoso, progressiva 11+980 km. Immagine a nicols incrociati.</b></p> |

Il quarzo è il costituente principale della roccia, si presenta spesso deformato con la classica estinzione ondulata a formare aggregati policristallini; in alcune porzioni della roccia esso è ricristallizzato durante la deformazione (ricristallizzazione dinamica) a formare minuti cristalli dai contorni irregolari. In altre porzioni è presente con cristalli angolari dispersi in una matrice a grana molto fine. Questa microstruttura indica che la roccia ha subito deformazione fragile. Il feldspato presente è plagioclasio da debolmente a fortemente alterato in aggregati a grana molto fine, probabilmente minerali delle argille. La muscovite si presenta incolore al solo polarizzatore e mostra invece alti colori di interferenza a nicols incrociati. I minerali opachi sono presenti sia con piccoli cristalli dispersi nella matrice che in cristalli allungati nei livelli in cui è presente muscovite; in questo secondo caso probabilmente si tratta di grafite. Infine, si nota una grande quantità di carbonato di calcio (vedi fig. 4.8) presente all'interno delle fratture che attraversano la roccia; si tratta quindi di carbonato di origine secondaria.



**Fig. 4.8:** ingrandimento della sezione sottile GBI50, paragneiss quarzoso, progressiva 11+801 km; immagine a nicols incrociati. Si notino i cristalli di quarzo frantumati e la notevole presenza di carbonato di calcio secondario che appare di diversi colori, feldspati molto rari.

*Scisto*

Lo scisto invece è una roccia metamorfica di grado medio, scistosità molto marcata con grana da minuta a grossa. Nello specifico si tratta di scisto filladico, roccia a grana molto fine caratterizzata da una scistosità molto serrata alla scala sub-millimetrica.

Nell'ambito dei sondaggi SAV6 e SAV7 effettuati è stato rinvenuto alle seguenti profondità:

| Sondaggio | Progressive [m]     | Potenza [m] | Descrizione               |
|-----------|---------------------|-------------|---------------------------|
| SAV6      | 11+758.5 – 11+793   | 34.5        | Scisti foliati/fratturati |
| SAV7      | 11+763.6 – 11+784.8 | 21.2        | Scisti filladici          |
| SAV7      | 11+789.8 – 11+805.7 | 15.9        | Scisti filladici          |
| SAV7      | 11+836.4 – 11+845.7 | 9.3         | Scisti filladici          |
| SAV7      | 11+849 – 11+889.5   | 40.5        | Scisti filladici          |

**Tab. 4.4: scisti filladici rinvenuti nei sondaggi effettuati**

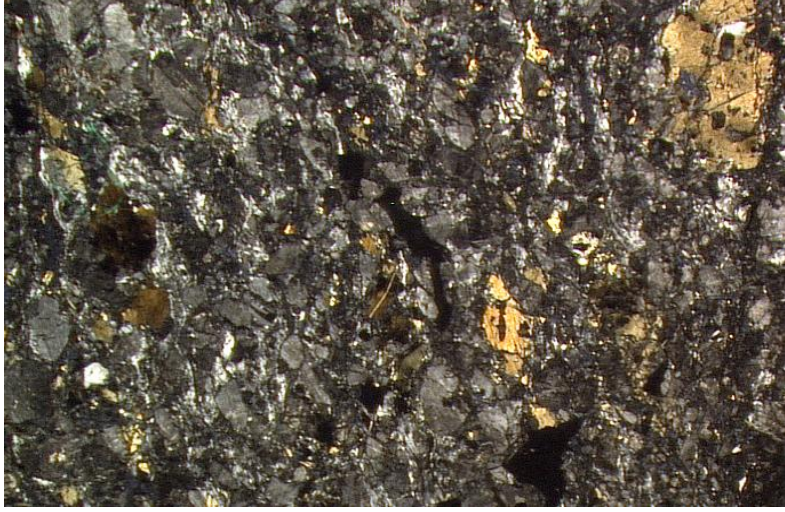
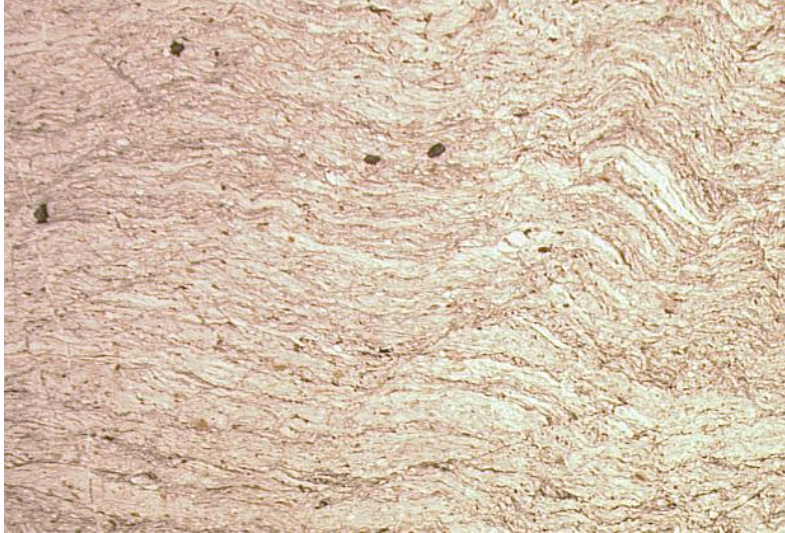
Dall'analisi petrografica dei minerali costituenti le percentuali risultano così distribuite:

- Quarzo 40 – 50%, dimensione grani 0.1 – 1.5 mm
- Muscovite + biotite decolorata 20 – 35%, dimensione grani 0.1 – 0.8 mm
- Opachi 15%, dimensione grani 0.05 – 0.6 mm
- Feldspati molto alterati 5 – 15%, dimensione grani 0.2 – 1 mm
- Tracce di epidoti, zirconi e titanite

Tra le sezioni sottili di scisto filladico analizzate, le più rappresentative di tale litotipo sono le sezioni GBI53, GBI52 e GBI54, caratterizzate dalla classica scistosità molto ondulata che contraddistingue lo scisto. La calcite, di origine secondaria, risulta essere presente solo nella sezione sottile GBI54 (vedi fig. 4.9), in quantità non trascurabili tra il 10 e 20%. La sezione sottile S752 presenta meno plagioclasti rispetto alle prime, assenza di calcite, scistosità planare e non contorta.

Di seguito si mostrano due delle sezioni sottili analizzate di scisto filladico; la sezione sottile riportata in fig. 4.10, come già accennato in precedenza, è in realtà una tonalite alterata.



|   |  |
|---|--|
|   | <p><b>Fig. 4.10: sezione sottile S730, progressiva 11+762 km. Immagine a nicols incrociati. Sezione sottile classificata come scisto filladico ma che in realtà è tonalite molto alterata.</b></p> |
|  | <p><b>Fig. 4.9: sezione sottile GBI54, scisto filladico, progressiva 11+791 km. Immagine a nicols paralleli.</b></p>   |

Il quarzo, così come negli gneiss precedentemente analizzati, risulta essere deformato con la classica estinzione ondulata a formare aggregati policristallini; in alcune porzioni di roccia è ricristallizzato durante la deformazione (ricristallizzazione dinamica) a formare cristalli a grana molto fine. Anche negli scisti, il feldspato prevalente è il plagioclasio, alterato in aggregati a grana molto fine (probabilmente minerali argillosi). La muscovite, o mica bianca, è incolore al solo polarizzatore e presenta alti colori di interferenza a nicols incrociati. Infine, i minerali opachi sono presenti sia in piccoli elementi sparsi nella matrice di roccia sia allungati (grafite).



**Fig. 4.11: ingrandimento sezione sottile GBI54, progressiva 11+791 km. Immagine a nicols incrociati. Scisto a muscovite, opachi e carbonato di calcio secondario nelle fratture.**

#### *Cataclasiti*

Termine utilizzato per la prima volta nella classificazione delle rocce di faglia proposta da Sibson [1971] (vedi cap. 1); è una roccia che si genera tramite un processo di deformazione fragile consistente nella rottura della roccia madre in un insieme di grani che sono successivamente cementati dai fluidi circolanti nel sistema di fratture della zona di faglia. Tali rocce presentano una crescita granulometrica data dalla complessiva riduzione della grana causata dalla tettonica tramite ricristallizzazione e formazione di nuovi minerali. Nell'ambito dei sondaggi effettuati tali rocce sono state riscontrate alle seguenti profondità:



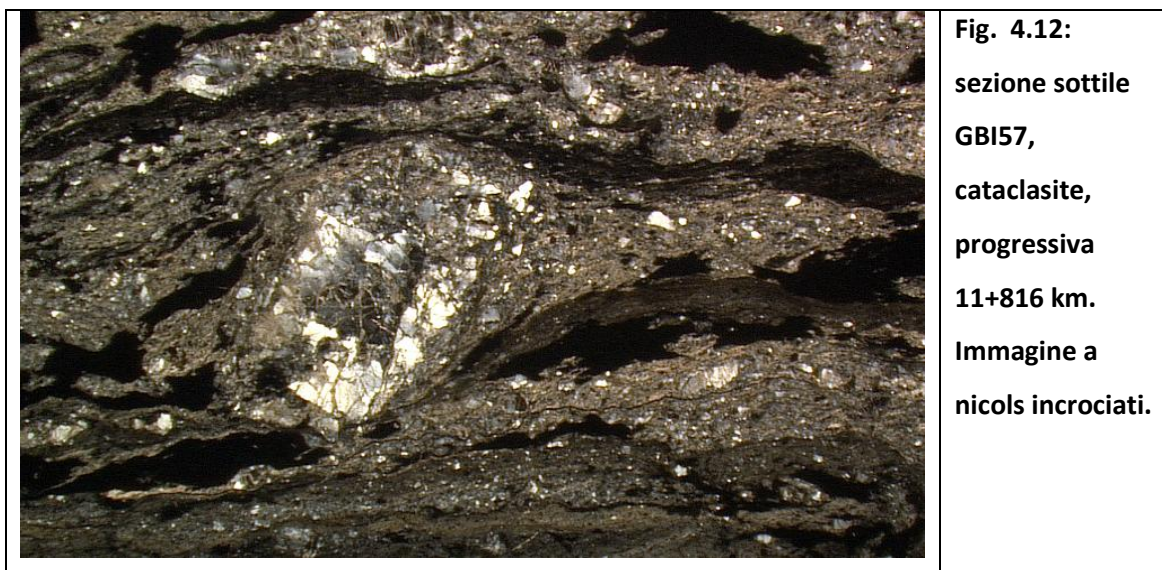
| Sondaggio | Progressive [km]    | Potenza [m] | Descrizione  |
|-----------|---------------------|-------------|--|
| SAV6      | 11+810 – 11+835.3   | 25.3        | Kakiriti: alternanza di cataclasi e frazioni brecciate |
| SAV7      | 11+815.3 – 11+829.7 | 14.4        | Cataclasi  |
| SAV7      | 11+833.4 – 11+836.4 | 3           | Cataclasi  |
| SAV7      | 11+845.7 – 11+849   | 3.3         | Cataclasi  |
| SAV7      | 11+896 – 11+901.5   | 5.5         | Cataclasi  |
| SAV7      | 11+944 – 11+978.8   | 34.8        | Cataclasi  |

**Tab. 4.5: cataclasi rinvenute nei sondaggi effettuati**

Grazie all'analisi petrografica delle sezioni sottili disponibili è stato possibile ricostruire la distribuzione modale dei minerali costituenti ed una stima delle dimensioni dei loro grani che risultano essere decisamente inferiori rispetto agli stessi minerali rinvenuti nelle altre litologie. Si osserva:

- Quarzo 15 – 30%, dimensione grani 0.1 – 1 mm
- Feldspati 5 – 15%, dimensione grani 0.1 – 1.5 mm
- Muscovite 20 – 45%, dimensione grani 0.1 – 0.6 mm
- Opachi 10 – 15%, dimensione grani 0.05 – 0.8 mm
- Carbonato di calcio 20 – 50%, dimensione grani 0.1 – 0.8 mm

Di seguito si riportano due immagini di sezioni sottili analizzate.

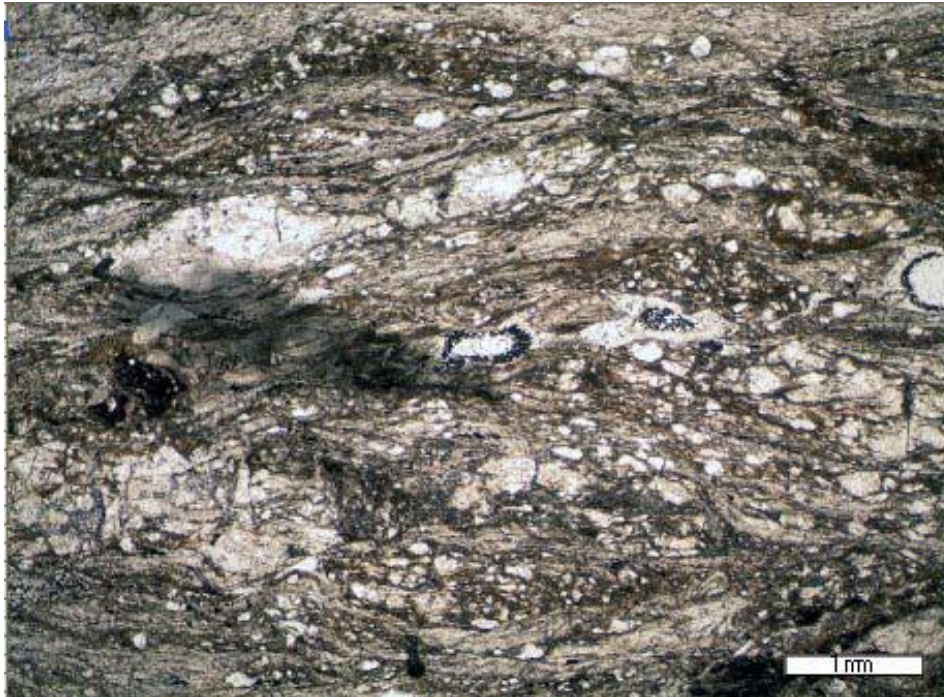


**Fig. 4.12:**  
sezione sottile  
GBI57,  
cataclasi,  
progressiva  
11+816 km.  
Immagine a  
nicols incrociati.



**Fig. 4.13:**  
**sezione sottile,**  
**cataclasite,**  
**progressiva**  
**11+821 km.**  
**Immagine a**  
**nicols paralleli.**

Sia i minerali di quarzo che quelli di feldspato sono presenti in cristalli di piccole dimensioni e dai contorni irregolari dispersi in una matrice a grana fine/molto fine (fig. 4.14). La mica bianca è presente anch'essa nella matrice della roccia con cristalli a grana molto fine e all'interno dei feldspati; in questo caso rappresenta probabilmente un prodotto di alterazione dei feldspati stessi. I minerali opachi sono presenti con cristalli dispersi nella matrice della roccia e talvolta sono secondari all'interno delle numerose fratture presenti. Lo stesso discorso vale per il carbonato di calcio, prodotto secondario alla fratturazione e presente in grande quantità.



**Fig. 4.14:** ingrandimento sezione sottile GBI56, progressiva 11+812, cataclasite. Immagine a nicols paralleli. Si notino le dimensioni ridotte dei minerali di quarzo e feldspato.

### *Quarzite*

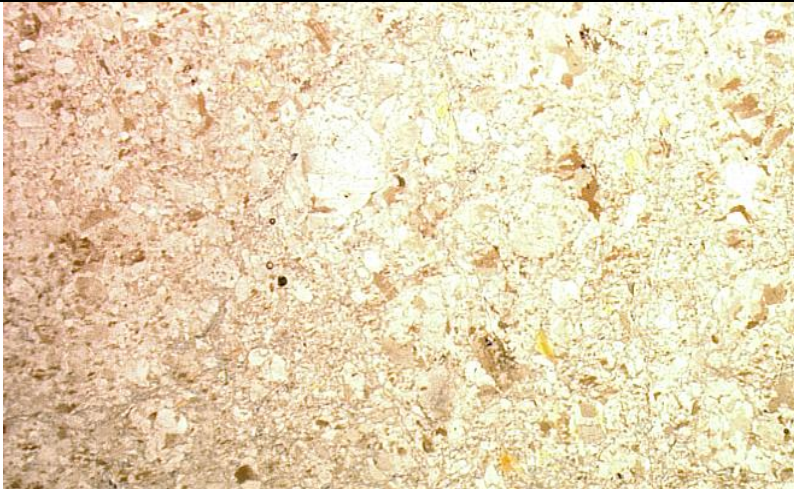
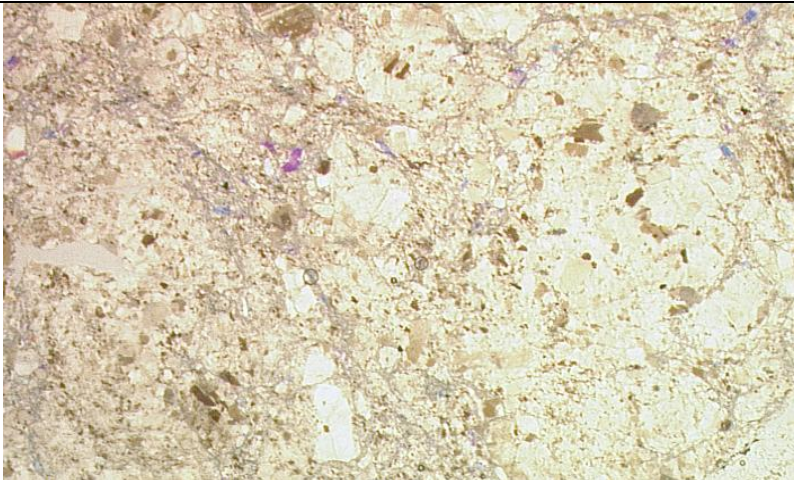
Roccia metamorfica composta in netta prevalenza da quarzo. Al quarzo possono essere associati altri minerali quali miche, feldspato potassico, plagioclasio, carbonato, ecc. Data la grande stabilità del quarzo le informazioni sul grado metamorfico sono associate ai minerali accessori. La tessitura è prevalentemente massiva anche se la presenza di miche può talvolta renderla scistosa. Nell'ambito dei sondaggi effettuati la si trova alle seguenti progressive:

| <b>Sondaggio</b> | <b>Progressive [km]</b> | <b>Potenza [m]</b> | <b>Descrizione</b>   |
|------------------|-------------------------|--------------------|--|
| SAV7             | 11+990.4 – 11+999.6     | 9.4                | Quarzite/Scisti quarziticici da molto fratturata a comminuta |
| SAV7             | 11+999.6 – 12064.7      | 65.1               | Quarzite massiva da mediamente a molto fratturata            |

**Tab. 4.6:** quarzite rinvenuta nei sondaggi effettuati



Di seguito si riportano 2 sezioni sottili di quarzite analizzate alle diverse progressive.

|   |   |
|---|---|
|   | <p><b>Fig. 4.15: sezione sottile S7269, quarzite, progressiva 12+001 km. Immagine a nicols paralleli.</b></p> |
|  | <p><b>Fig. 4.16: sezione sottile S7301, quarzite, progressiva 12+033 km. Immagine a nicols paralleli.</b></p> |

La composizione è predominante nel quarzo, caratterizzato da una, se pur lieve, estinzione ondulata all'osservazione al microscopio. Nell'immagine 4.15 la quarzite è perfetta, priva di microfessure e dall'aspetto massivo; nella sezione sottile dell'immagine sottostante invece, si possono osservare infiltrazioni di carbonato di calcio nelle microfratture presenti. Si tratta dell'ultima parte del tratto considerato, come si nota la fascia cataclasata è superata e la roccia tende a riacquistare un aspetto indeformato.

#### **4.3.2 Evidenze di alterazione chimica e fisica**

Il termine alterazione fa riferimento sia a processi di natura fisica che chimica i quali, nel tempo e a seguito di determinate condizioni di sollecitazione e/o di combinazione di pressione/temperatura, vengono a presentarsi all'interno della roccia modificandone sensibilmente le caratteristiche di resistenza. Tali aspetti possono essere facilmente riconoscibili all'interno di una sezione sottile di una roccia di faglia e costituiscono ottimi punti di partenza per identificare eventuali piani di debolezza e direzionalità della roccia alla scala più ampia.

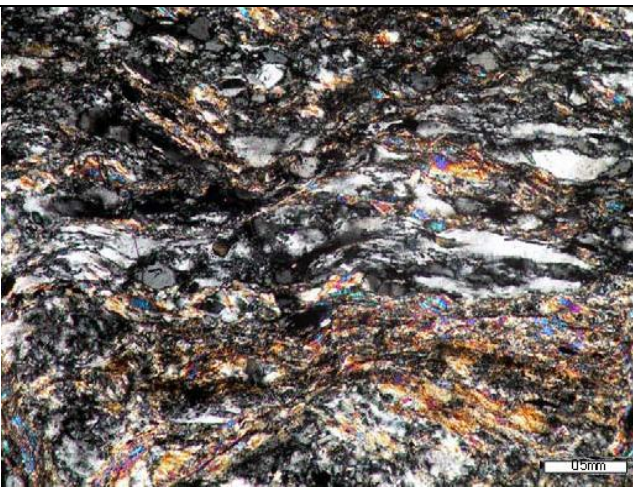
L'alterazione fisica dà luogo a sfaldature secondo piani di direzione preferenziali, aperture di microfratture, cambiamenti di volume e formazione di vuoti. L'alterazione chimica invece produce la dissoluzione di minerali solubili e la formazione di nuovi minerali per processi di ossidazione, riduzione, ecc. Benchè l'alterazione chimica nelle rocce sia generalmente molto diffusa ed accentuata dalla nascita di nuove fratture all'interno della roccia sottoposta a deformazione, provocando cambiamenti di composizione mineralogica, quella fisica rompe e disgrega la roccia, precludendone quindi maggiormente la resistenza.

Vi sono determinati tipi di minerali più inclini all'alterazione chimica, in ordine di stabilità crescente si ricordano: olivina, feldspato calcico, pirosseno, anfibolo, feldspato sodico, biotite, feldspato potassico, muscovite, quarzo. Tra le sezioni analizzate è stata riscontrata una notevole quantità di carbonato di calcio secondario che ha subito ricristallizzazione una volta addentratosi nelle numerose microfratture delle rocce. Le rocce interessate da questo fenomeno sono soprattutto le cataclasiti ma anche scisti e gneiss; di seguito se ne riportano alcuni tra i casi riscontrati.

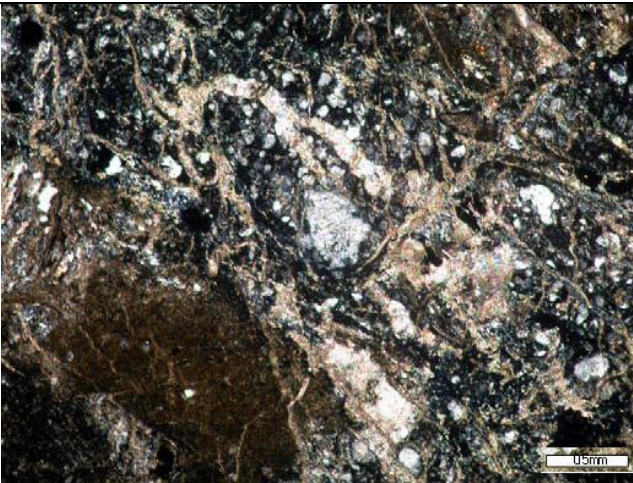




**Fig. 4.16:** sezione sottile GBI54, scisto filladico, progressiva 11+791 km. Immagine a nicols incrociati. Evidenze di carbonato di calcio secondario.



**Fig. 4.17:** sezione sottile GBI50, paragneiss quarzoso, progressiva 11+801 km. Immagine a nicols incrociati. Evidenze di carbonato di calcio secondario.



**Fig. 4.18:** sezione sottile GBI51, cataclasite, progressiva 11+809 km. Immagine a nicols incrociati. Evidenze di carbonato di calcio secondario.

L'alterazione fisica in termini di vuoti e microfratture influenza in misura determinante il comportamento meccanico di molte rocce. La porosità complessiva risulta essere costituita da diversi elementi rappresentativi delle caratteristiche di micro e macroscala a seconda delle loro dimensioni; si parla infatti di pori e microfessure se le dimensioni risultano essere inferiori al mm (scala microscopica), macrofessure invece se le dimensioni superano il mm (scala macroscopica). In tab. 4.7 si riassume quanto detto e si classifica il mezzo in base alle caratteristiche dei suoi vuoti.

| SCALA        | TIPO DI VUOTO |                             | TIPO DI MEZZO                  |             |
|--------------|---------------|-----------------------------|--------------------------------|-------------|
|              | Micro < 1mm   | Pori                        | Intercristallici/integranulari | Continuo    |
| Microfessure |               | Diaclassi/giunti/scissosità | Discontinuo                    |             |
| Macro > 1mm  | Macrofessure  | Macrofessure                |                                | Discontinuo |
|              |               | Canali/cavità carsiche      |                                |             |

**Tab. 4.7: porosità alla diversa scala**

La micro fessurazione diffusa ha una notevolissima influenza sulle caratteristiche elastiche delle rocce cristalline, le quali, nonostante valori molto bassi della porosità, possono presentare valori di deformabilità elevati [Rotonda, Ribacchi; 1995]. Anche l'anisotropia che caratterizza molti materiali tipicamente contenuti nelle rocce è per lo più legata alla presenza di sistemi di microfratture orientate, mentre l'influenza sull'anisotropia dell'orientazione dei minerali costituenti, anche quando appare ad un esame a vista molto evidente, risulta spesso del tutto subordinata o trascurabile.

Anche il tensore della permeabilità risulta condizionato dalla presenza di sistemi di microfessure orientate; le variazioni di apertura di tali microfessure, sotto l'azione delle sollecitazioni applicate, determinano variazioni di più ordini di grandezza della permeabilità ed inducono una anisotropia che si sovrappone a quella eventualmente connessa alle microfessure già presenti [Rotonda, Ribacchi; 1995].



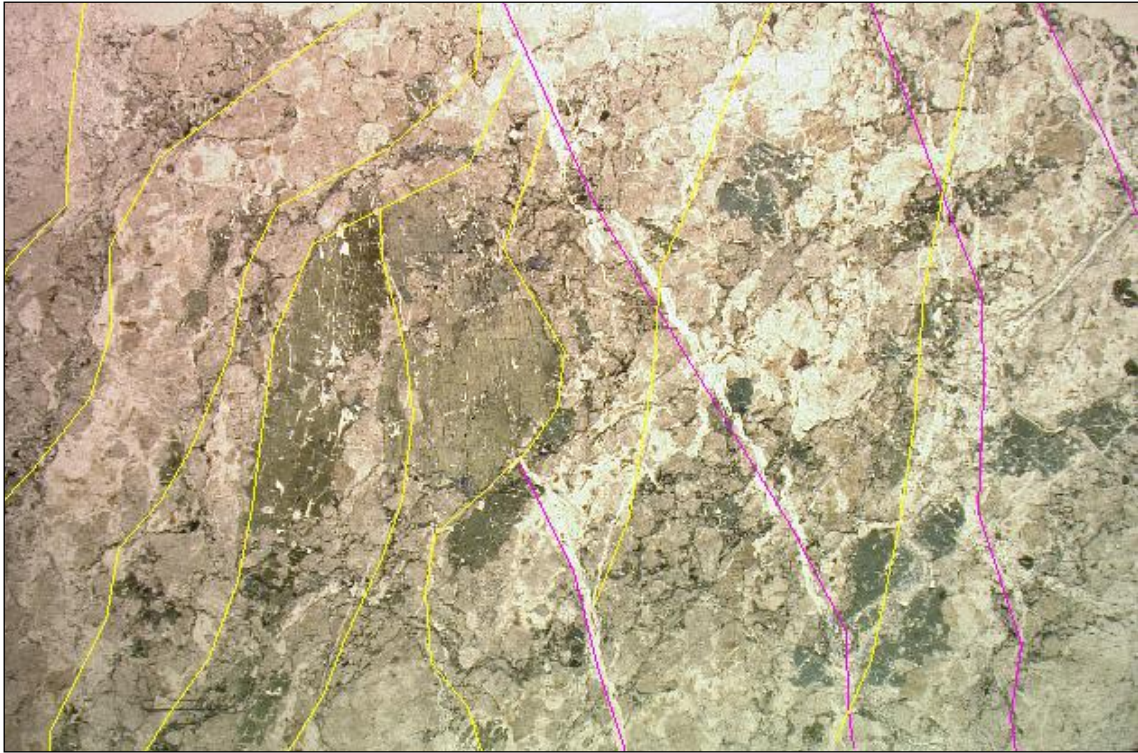
Molte delle sezioni sottili analizzate presentano una microfratturazione diffusa e una presenza rilevante di vuoti che ne caratterizzano fortemente la resistenza geomeccanica alla macroscale. In particolare:

*Tonaliti*: la roccia presenta una microstruttura olocristallina granulare ipidiomorfa e risulta deformata e alterata. Si notano diversi sistemi di microfratture e in alcune sezioni sono presenti diversi vuoti; i minerali risultano spesso allungati e allineati secondo le direzioni di fratturazione principali.

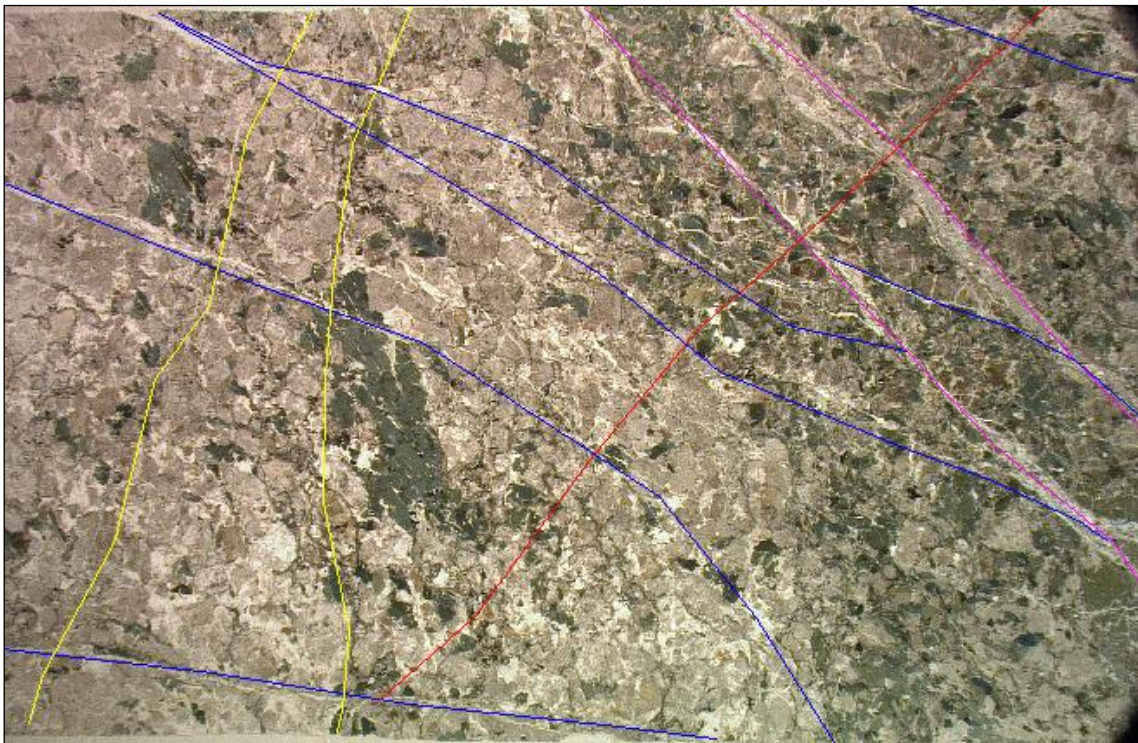


**Fig. 4.18: sezione sottile GBI44, progressiva 11+575 km. Sistemi di microfratture.**





**Fig. 4.19: sezione sottile GBI47, progressiva 11+735. Sistemi di microfratture.**



**Fig. 4.20: sezione sottile GBI46, progressiva 11+747 km. Sistemi di microfratture.**

Come si nota dalle sezioni riportate nelle immagini sovrastanti, la microfratturazione è diffusa ovunque con diversi sistemi di microfratture indicati nei diversi colori. In figura 4.18 si nota un solo sistema di microfratturazione in direzione N-S, in fig. 4.19 i sistemi risultano essere due mentre in fig. 4.20 abbiamo tre sistemi di microfratture nelle 3 direzioni indicate più un probabile master joint in colore rosso.

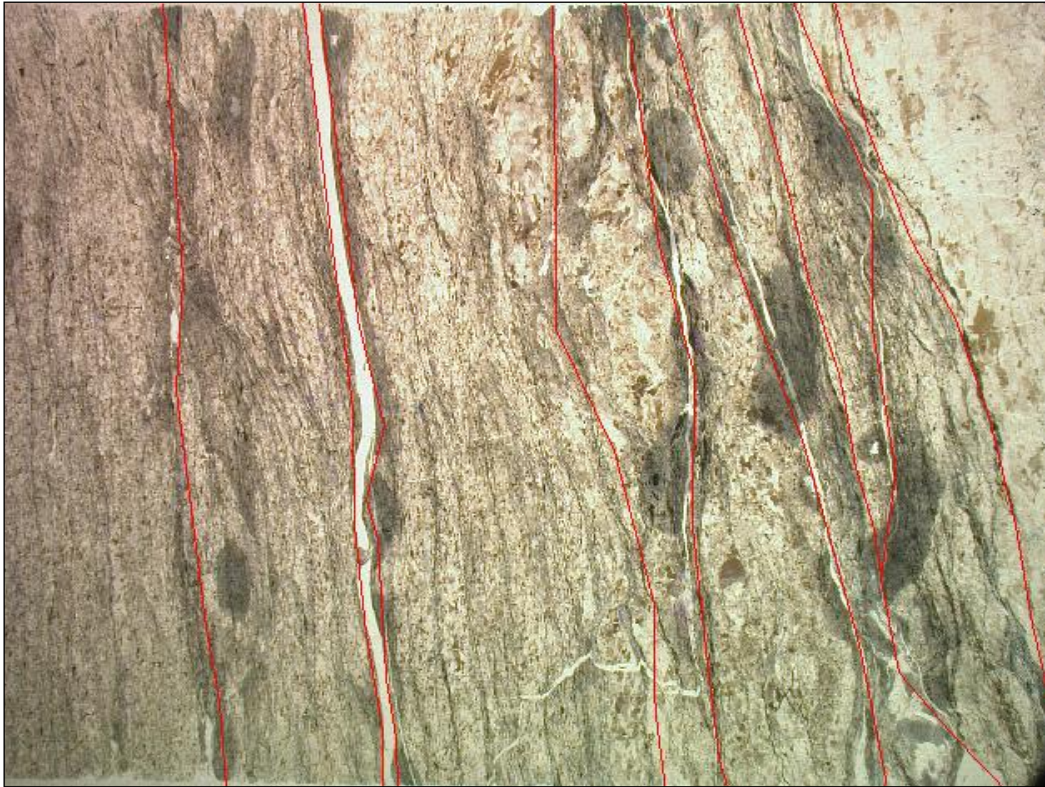
Per avere un'informazione quantitativa circa l'intensità di fratturazione nelle diverse sezioni di tonalite, di seguito si riporta una stima dell'intercetta; si misura dunque la distanza tra due microfratture anche non appartenenti alla stessa famiglia lungo una linea in direzione della scistosità principale e lungo una linea perpendicolare ad essa.

| Tonaliti |             |                 |     |
|----------|-------------|-----------------|-----|
| Sez      | Progr. [km] | Intercetta [mm] |     |
|          |             | //              | X   |
| GBI44    | 11+575      | -               | 2.6 |
| GBI43    | 11+610      | 7.8             | 3   |
| GBI45    | 11+633      | 10              | 3.4 |
| GBI47    | 11+735      | 6.2             | 3.6 |
| GBI46    | 11+747      | 4.5             | 4.5 |

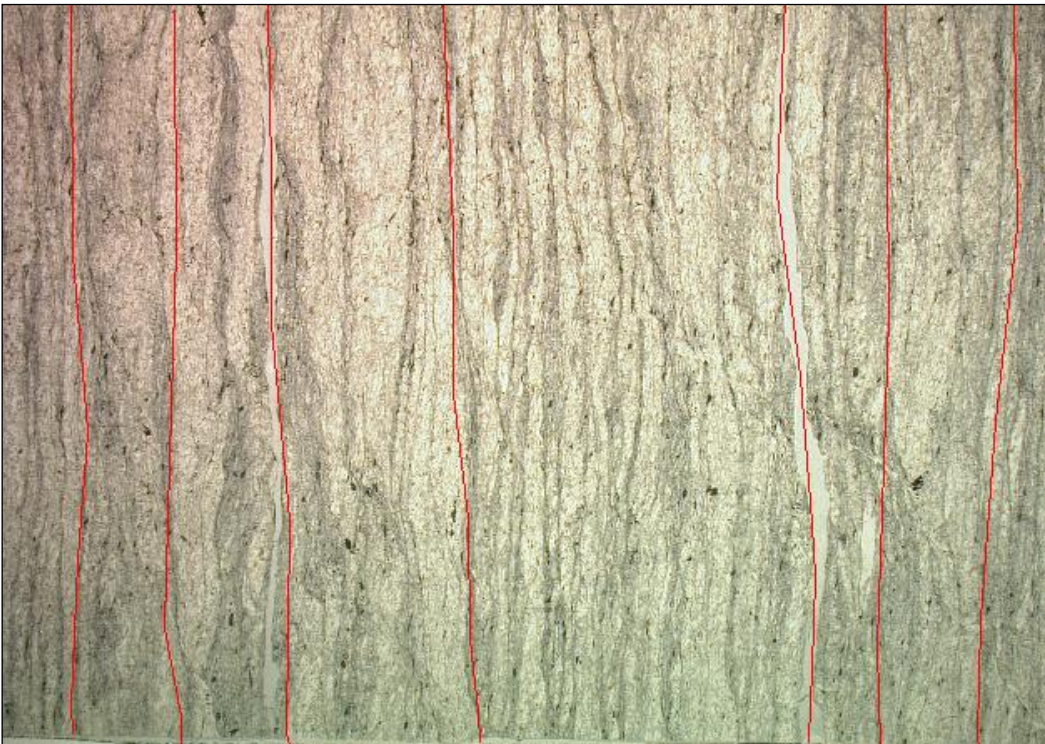
**Tab. 4.8: intercetta microfratture delle sezioni sottili di tonaliti**

*Scisti*: la roccia presenta una microstruttura scistosa caratterizzata dall'alternanza di domini quarzo-feldspatici e livelli lepidoblastici a grana più fine. La roccia è fratturata ed alterata.





**Fig. 4.21: sezione sottile GBI53, progressiva 11+760 km, scisto filladico. Sistemi di microfratture e scistosità planare.**



**Fig. 4.22: sezione sottile S752, progressiva 11+784 km. Sistemi di microfratture e scistosità planare**

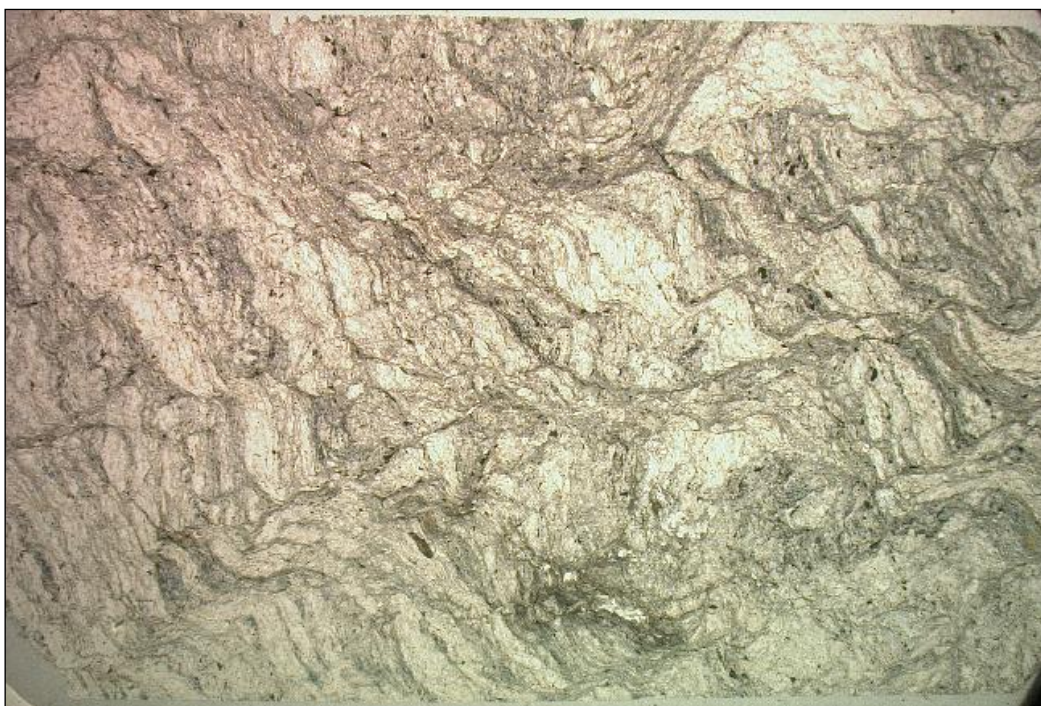


Le sezioni sottili riflettono marcatamente la scistosità caratterizzante la roccia e anche le fratture seguono perfettamente tale direzionalità. Di seguito si riportano i valori di intercetta stimati per le diverse sezioni sottili di scisti; si noti come solo in un caso è presente una seconda famiglia di fratture perpendicolare alla scistosità.

| Scisti |             |                 |      |
|--------|-------------|-----------------|------|
| Sez    | Progr. [km] | Intercetta [mm] |      |
|        |             | //              | X    |
| GBI53  | 11+760      | -               | 3.8  |
| S730   | 11+762      | -               | 3.3  |
| GBI52  | 11+783      | 6.7             | 3.3  |
| S752   | 11+784      | -               | 5    |
| GBI54  | 11+747      | -               | 4.5  |
| 11838  | 11+838      | -               | 5.35 |

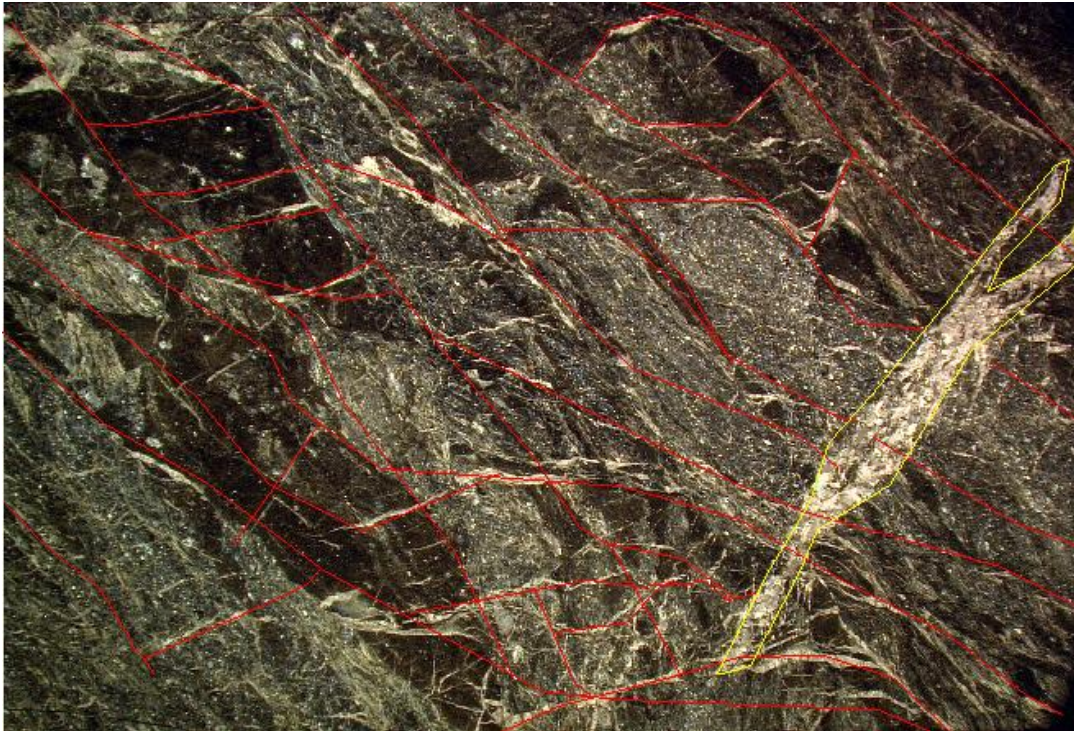
**Tab. 4.9: valori di intercetta nelle sezioni sottili di scisti**

*Gneiss*: le rocce presentano una microstruttura gneis sica caratterizzata dall'alternanza di domini quarzo-feldspatici e livelli lepidoblastici a grana più fine. La roccia è fratturata e debolmente alterata.



**Fig. 4.23: sezione sottile GBI50, progressiva 11+801 km. Microfratture assenti.**





**Fig. 4.24: sezione sottile 11810, progressiva 11+810 km. Sistemi di microfratture.**

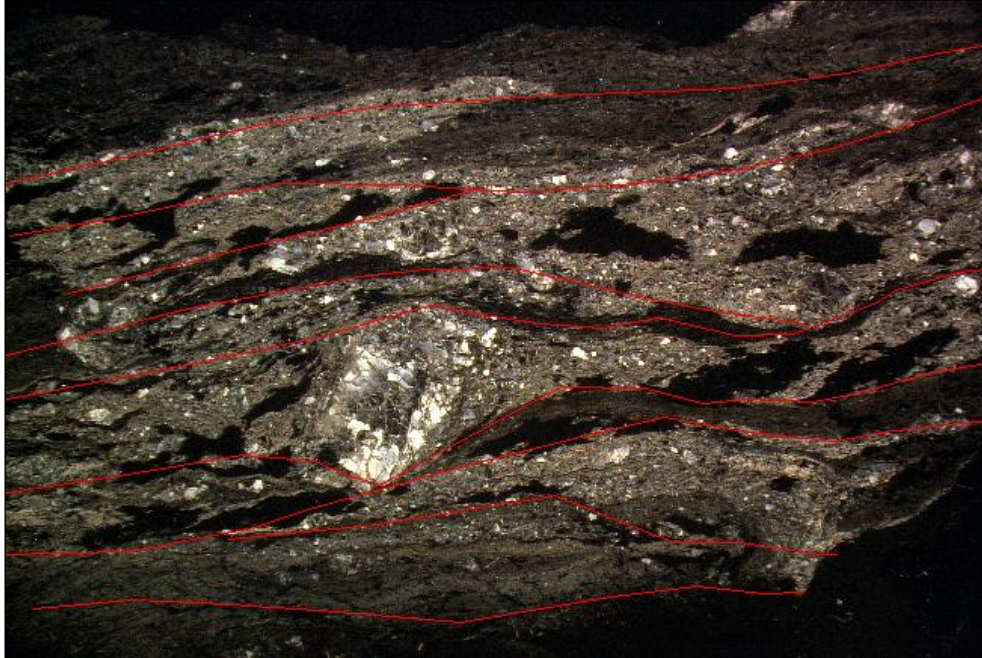
La situazione risulta essere molto diversificata nell'intorno di pochi metri. Come mostrano le immagini sovrastanti, si passa da una situazione di totale assenza di microfratture (fig. 4.23) a una situazione completamente alterata (fig. 4.24) con presenza di fratturazione diffusa, presenza di fascia milonitica a grana molto fine (in giallo) e totale stravolgimento della normale configurazione della roccia. In questo secondo caso si è vicini alla fascia delle cataclasiti che si sviluppa un paio di metri dopo. Come per gli altri litotipi, è stata effettuata una stima dell'intercetta delle fratture lungo due linee guida tra loro perpendicolari, in modo da avere un'idea quantitativa dell'intensità di fratturazione.

| <b>Gneiss</b> |             |                 |      |
|---------------|-------------|-----------------|------|
| Sez           | Progr. [km] | Intercetta [mm] |      |
|               |             | //              | X    |
| GBI49         | 11+795      | -               | 14.4 |
| GBI50         | 11+801      | -               | -    |
| GBI51         | 11+809      | 4.7             | 5.3  |
| 11810         | 11+810      | 4.4             | 2.8  |
| S7178         | 11+854      | -               | 9.8  |
| 11980         | 11+980      | -               | -    |

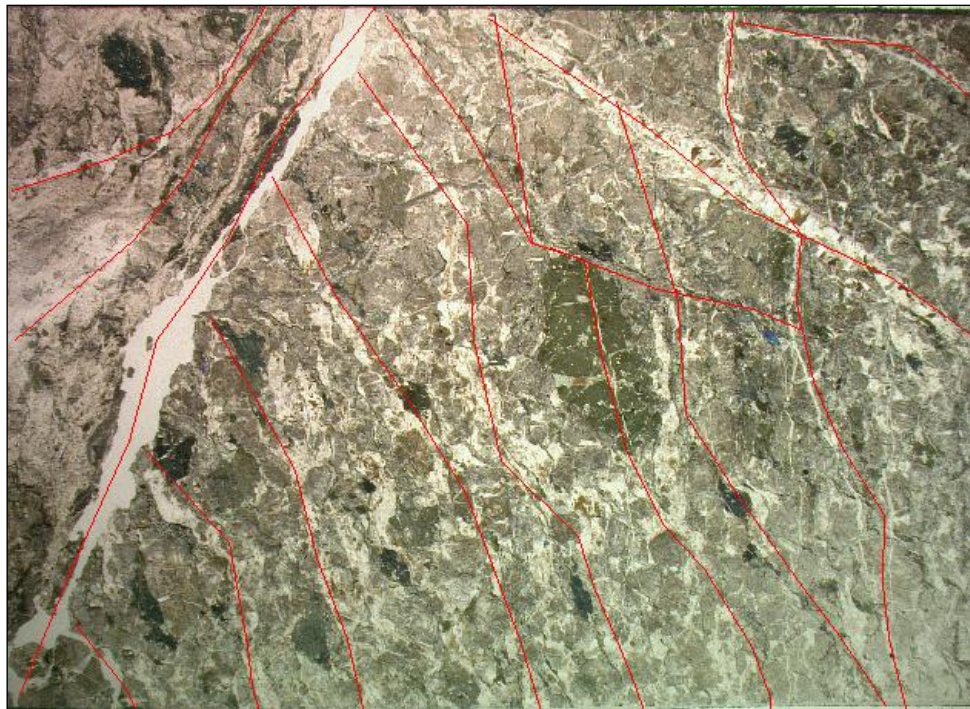
**Tab. 4.10: intercetta calcolata sulle sezioni sottili di gneiss**



*Cataclasiti*: la roccia presenta una microstruttura caratterizzata da frammenti angolari immersi in una matrice a grana fine/molto fine. La roccia è estremamente alterata e fratturata.



**Fig. 4.25:** sezione sottile GBI57, progressiva 11+816 km, cataclasite. Microfratture, vuoti e scistosità.



**Fig. 4.26:** sezione sottile 11973, progressiva 11+973, cataclasite. Microfratture, fratture aperte, vuoti.

Le sezioni sottili riflettono le scarse caratteristiche di resistenza della roccia in termini di resistenza alla compressione; si notino infatti le numerose fratture presenti, talvolta anche macro ( $> 1\text{mm}$ ) e i numerosi vuoti che caratterizzano queste sezioni sottili. Si riporta di seguito una stima dell'intercetta delle varie famiglie di fratture presenti.

| Cataclasiti |             |                 |     |
|-------------|-------------|-----------------|-----|
| Sez         | Progr. [km] | Intercetta [mm] |     |
|             |             | //              | X   |
| GBI56       | 11+812      | -               | 2.7 |
| GBI57       | 11+816      | -               | 2.6 |
| S789        | 11+821      | 4.2             | 2   |
| GBI58       | 11+822      | -               | 3.2 |
| 11952       | 11+952      | -               | 4.3 |
| 11973       | 11+973      | 3.5             | 2.4 |

**Tab. 4.11: intercetta delle fratture presenti nelle cataclasiti**

I valori di intercetta sono ragionevolmente inferiori a quelli stimati per le altre litologie.

Oltre alle microfratture, come già accennato, i vuoti presenti all'interno della sezione sottile riflettono anch'essi scarse proprietà di resistenza della roccia. Per una corretta stima di questi ultimi si è resa necessario una metodologia che andasse oltre l'osservazione al microscopio ottico.

Pertanto nel capitolo successivo verrà illustrata la procedura automatizzata realizzata per l'identificazione dei vuoti nelle varie sezioni sottili, seguita da un tentativo di correlazione di tali grandezze stimate con le grandezze di resistenza.

## Capitolo 5

# Correlazione tra le caratteristiche microscopiche ed i parametri di resistenza della roccia

Obiettivo del presente lavoro di tesi è da un lato caratterizzare alla diversa scala le rocce interessate dal cunicolo esplorativo della Galleria di Base del Brennero nel tratto di avanzamento all'interno del lineamento Periadriatico, dall'altro è quello di cercare una correlazione tra le caratteristiche alla diversa scala riscontrate.

Nei capitoli precedenti, sono stati illustrati i parametri di resistenza di tali rocce ricavati dalle prove geotecniche di laboratorio (cap. 3) ed in seguito (cap. 4) sono state analizzate le sezioni sottili di roccia disponibili per il tratto preso in considerazione, in modo da evidenziarne caratteristiche petrografiche di tipo mineralogico e micro strutturale. Nel presente capitolo, invece, ci si pone l'obiettivo di ricercare un metodo di analisi di immagini, calibrato e validato sulle immagini delle 30 sezioni sottili, che fornisca risultati quantitativi a livello microscopico, tali da poter essere correlati con i valori dei parametri di resistenza ricavati dalle prove geotecniche.

### 5.1 Analisi di immagini digitali con MATLAB®

Quale strumento per raggiungere l'obiettivo preposto si è scelto MATLAB, linguaggio di alto livello per il calcolo numerico, l'analisi e la visualizzazione dei dati. Nato

principalmente come programma destinato alla gestione di matrici, in seguito alle numerose evoluzioni tecnologiche e alla nascita dei differenti *tools* che lo caratterizzano, risulta essere uno degli strumenti più utilizzati nell'industria e nelle università a supporto dei più disparati campi di studio.

Tra i diversi strumenti dai quali può trarre utilizzo, MATLAB mette a disposizione centinaia di funzioni, utili per l'analisi delle immagini, grazie alla presenza di un particolare tool, quale è *Image Processing Toolbox*. Tale strumento fornisce un set completo di algoritmi riferimento-standard, funzioni e applicazioni per l'elaborazione delle immagini, l'analisi, la visualizzazione e lo sviluppo di algoritmi.

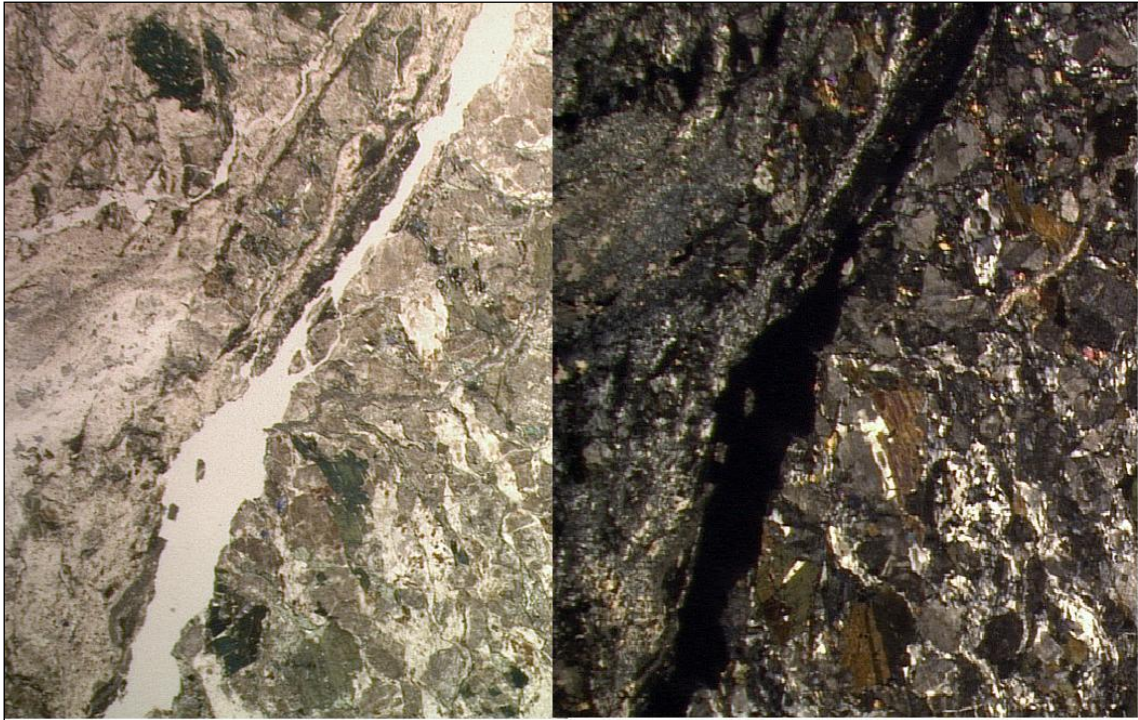
È possibile migliorare le immagini, metterle a fuoco, rilevare forme, ridurre i disturbi, segmentare le immagini, eseguire trasformazioni geometriche e registrare le immagini.

## **5.2 Calcolo della percentuale di vuoti della sezione sottile**

Grazie all'osservazione al microscopio ottico delle diverse sezioni sottili di roccia, si è osservato come molte di esse fossero caratterizzate dalla presenza di vuoti più o meno diffusi, di diversa forma e dimensione.

In seguito all'osservazione congiunta della stessa sezione sottile a nicols paralleli ed incrociati, si è notato come il vuoto fosse rappresentato da tutte quelle aree che contemporaneamente mostravano colore bianco nella prima modalità di osservazione e nero nella seconda. Tali "difetti" caratterizzanti la singola sezione sottile, avranno sicuramente una ripercussione sulle caratteristiche della roccia alla scala più grande, influenzandone i valori di resistenza. Per vuoto si intende qualsiasi apertura presente nella sezione sottile, che al microscopio ottico appare bianca nell'osservazione a nicols paralleli e nera mediante osservazione a nicols incrociati (fig. 5.1).

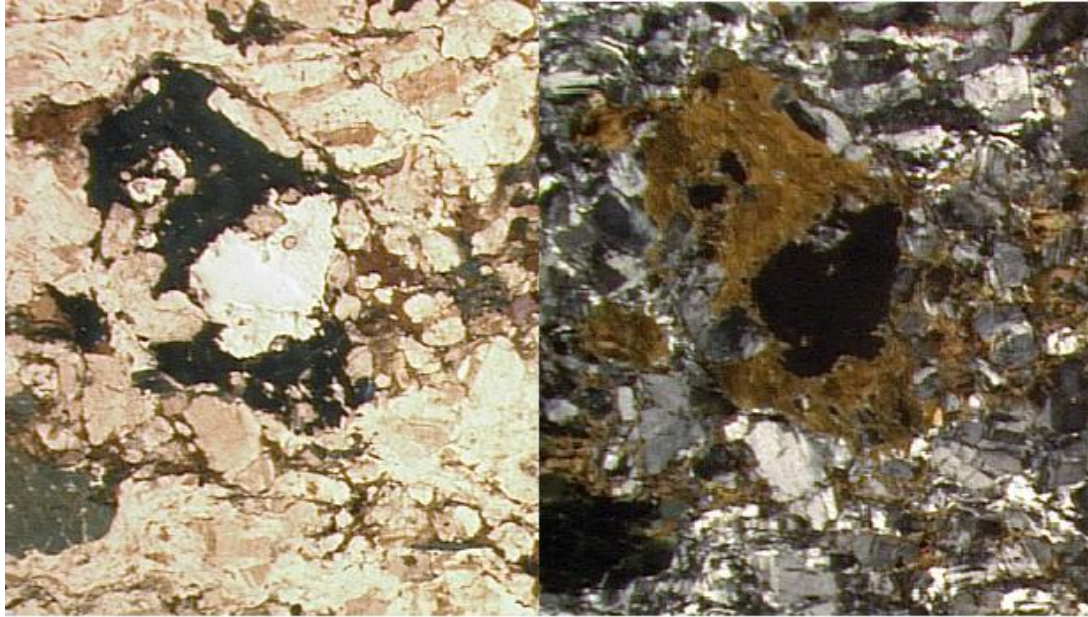




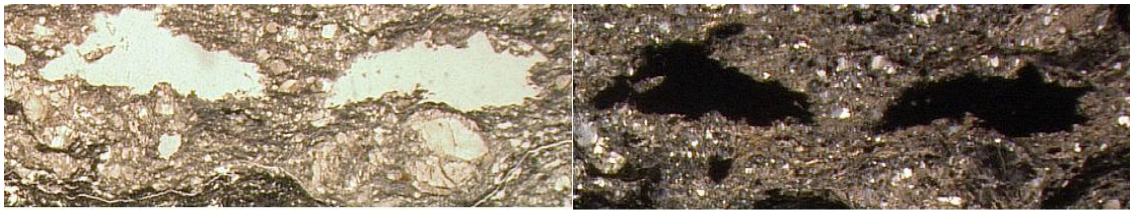
**Fig. 5.1: esempio di identificazione di un vuoto attraverso l'osservazione contemporanea delle due immagini della stessa sezione sottile (nicols paralleli a sinistra, nicols incrociati a destra).**

I vuoti possono essere di forma pseudo circolare, più o meno grande e più o meno regolare, di forma allungata in una direzione preferenziale a seguire la scistosità di insieme, ed infine vere e proprie fratture longitudinali aperte che attraversano l'intera sezione in una direzione definita (fig. 5.2).





**Fig. 5.2 a): esempio di vuoto pseudo – circolare**



**Fig. 5.2 b): esempio di vuoto allungato secondo una direzione preferenziale**



**5.2 c): esempio di frattura longitudinale aperta**



### 5.2.1 Identificazione dei pixel bianchi e neri

Il primo passaggio consiste nel riuscire ad identificare all'interno dell'immagine rappresentante la sezione sottile, il giusto numero di pixel che corrispondano alle aree bianche (per l'osservazione a nicols //) e a quelle nere (per l'osservazione a nicols X).

Un'immagine digitale, cioè la rappresentazione di un'immagine sul computer, si compone di pixel che costituiscono le unità minime di informazione luminosa. Esistono diverse modalità per memorizzare un file rappresentante un'immagine; le principali sono le seguenti due:

- Scala di grigi
- RGB

Ogni pixel è rappresentato da un determinato numero di bit, dipendentemente dal numero di colori che questo può assumere. Nella modalità scala di grigi, ogni pixel dell'immagine contiene un livello di grigio compreso tra 0 e 1; nella modalità RGB ogni pixel è rappresentato da un insieme di bit che indicano nell'ordine: l'intensità di rosso, quella di verde e quella di blu (RGB) che deve essere associata al relativo punto dell'immagine per poter essere rappresentato correttamente sullo schermo. Essenzialmente la differenza tra un'immagine a scala di grigi e un'immagine RGB è il numero dei così detti "canali di colore": un'immagine a scala di grigi ne ha uno solo; un'immagine RGB ne possiede tre.

Le immagini delle sezioni sottili a disposizione sono di tipo RGB ad alta risoluzione (8 bpp); pertanto ciascun pixel consiste di tre componenti differenti (RGB), ciascuna delle quali può avere un'intensità variabile tra 0 e 255; ciò che si osserva in ciascun pixel è la combinazione additiva delle tre.

L'obiettivo è quello di trovare tutti i pixel che nell'osservazione a N// risultano bianchi e tutti i pixel che nell'osservazione a NX risultano neri; il passo successivo sarà l'intersezione delle due di modo da evidenziare le regioni potenzialmente corrispondenti al vuoto, cioè che sono contemporaneamente bianche (N//) e nere

(NX). Naturalmente, quello che corrisponde al bianco puro, identificato con il codice 255, così come il nero puro, identificato con il codice 0, identifica un colore impossibile da riscontrarsi nella realtà, affetta da imperfezioni imputabili alla modalità con cui la foto è stata scattata dall'operatore, dalla luminosità presente in quel momento, dal modo in cui i minerali risultavano essere orientati e quindi dal modo in cui essi riflettevano la luce in quel dato momento. Pertanto, la ricerca delle aree bianche e delle aree nere, dovrà essere effettuata in modo iterativo, identificando una soglia ottimale per i pixel bianchi e una altrettanto ottimale per i pixel neri, che permettano l'identificazione del "giusto" numero di pixel bianchi e neri.

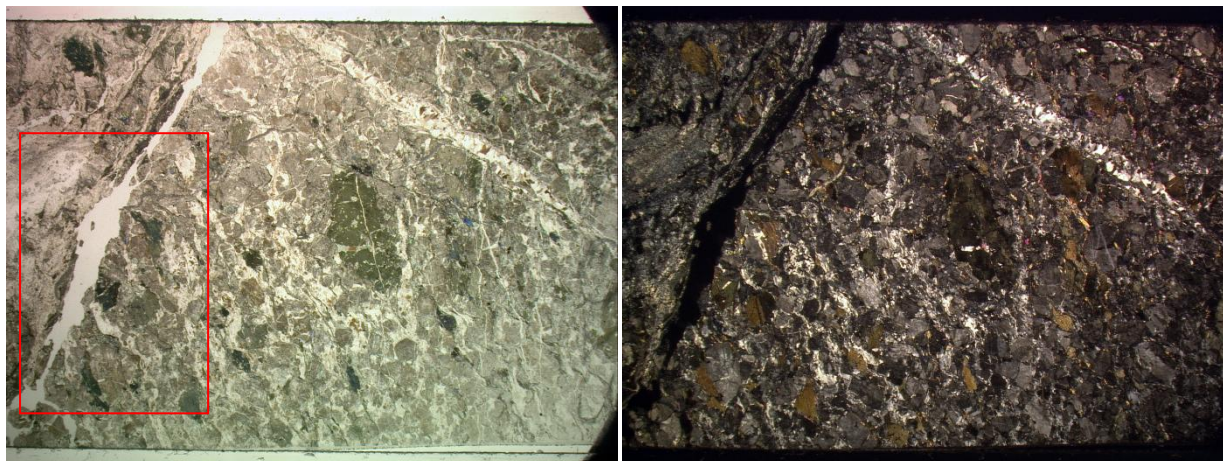
Per rendere l'operazione computazionalmente più agevole, si è deciso di innanzitutto di convertire l'immagine da RGB a scala di grigi, in modo tale da velocizzare la ricerca dei pixel in funzione della soglia data. Successivamente si è fissata una soglia per la ricerca dei pixel bianchi nella prima immagine ed una soglia per la ricerca dei pixel neri nella seconda immagine, la prima "sufficientemente" più bassa di 255, la seconda "sufficientemente" più alta di 0. Il valore di soglie ottimo è stato opportunamente calibrato su una sezione sottile che si prestasse al facile riconoscimento dei vuoti, senza bisogno di osservazione microscopica. Le soglie hanno significato analogo ma complementare: la soglia bianca sarà infatti un limite inferiore al di sopra del quale verranno considerati i pixel come vuoti potenziali; la soglia nera sarà invece un limite superiore, per cui i pixel selezionati saranno quelli con valore inferiore o uguale ad esso.

Pertanto l'algoritmo (riportato nella versione integrale in Allegato 4 – Script Matlab), in questa fase, dovrà effettuare le seguenti operazioni:

- Ricevere in ingresso le due immagini della stessa sezione sottile
- Convertire ciascuna delle due immagini da RGB a scala di grigi
- Fissate le due soglie ricercare:
  - o Nell'immagine a nicols//: tutti i pixel che hanno un valore sopra il livello della soglia (che tendono quindi al colore bianco)
  - o Nell'immagine a nicolsX: tutti i pixel che hanno un valore sotto il livello di soglia (che tendono quindi al colore nero)

- Moltiplicare le due matrici e mostrare in un'immagine finale i pixel selezionati contemporaneamente in entrambe le ricerche precedenti


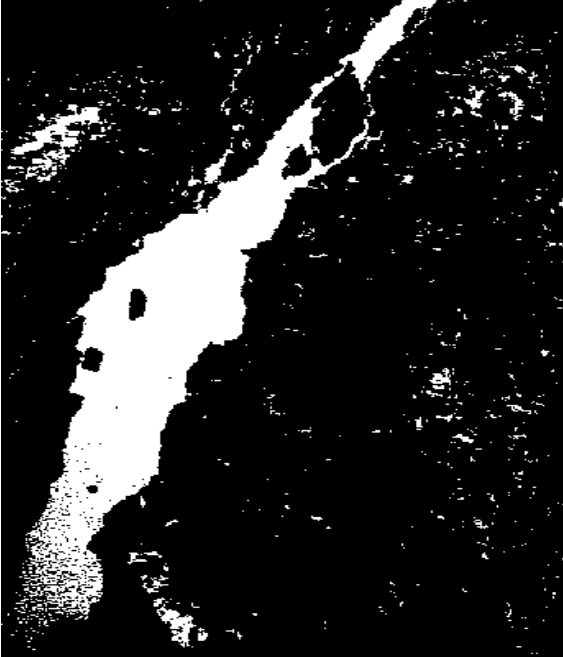


Di seguito si riporta la sezione sottile utilizzata per la calibrazione delle soglie ed alcuni dei tentativi effettuati prima di raggiungere l'ottimo.



**Fig. 5.3:** sezione utilizzata per la calibrazione delle soglie ottimali; nel riquadro rosso il tratto di vuoto utilizzato per la calibrazione delle soglie.

Calibrazione soglia pixel bianchi:

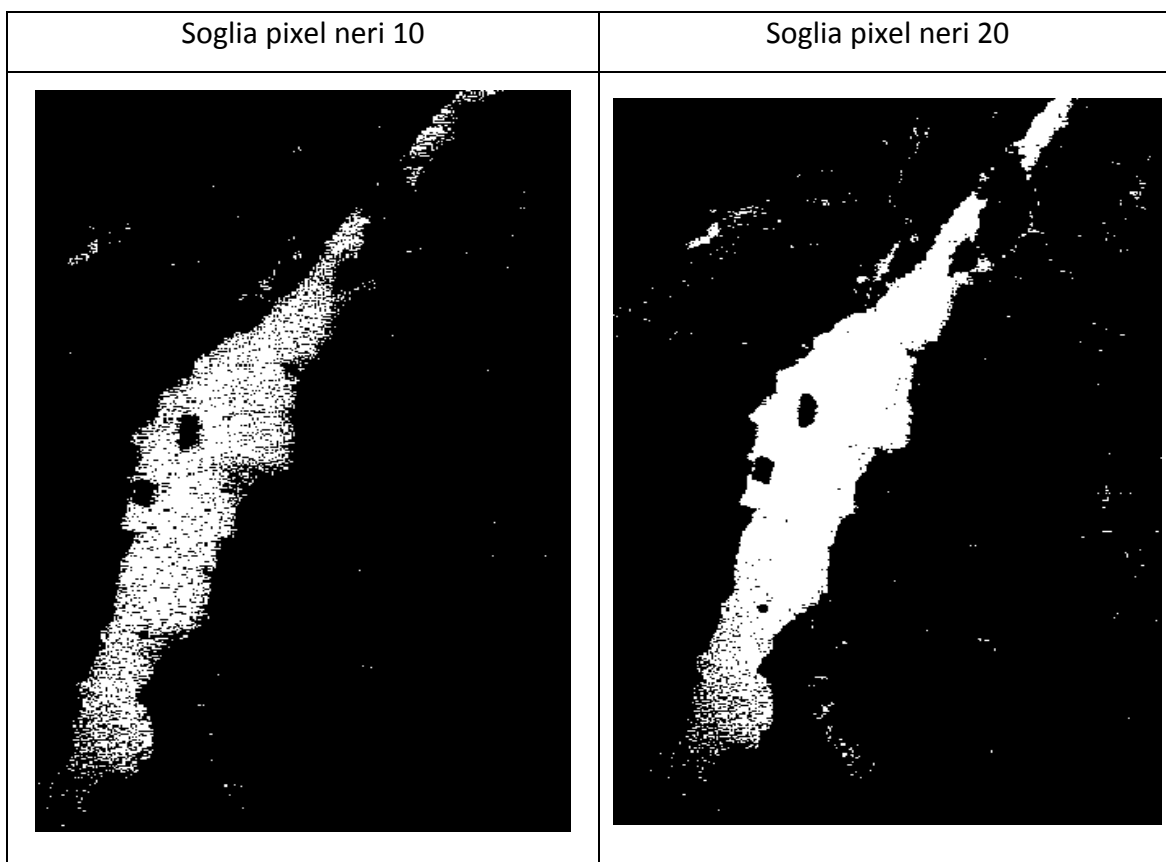
| Soglia pixel bianchi 220 | Soglia pixel bianchi 210 |
|--------------------------|--------------------------|
|                          |                          |

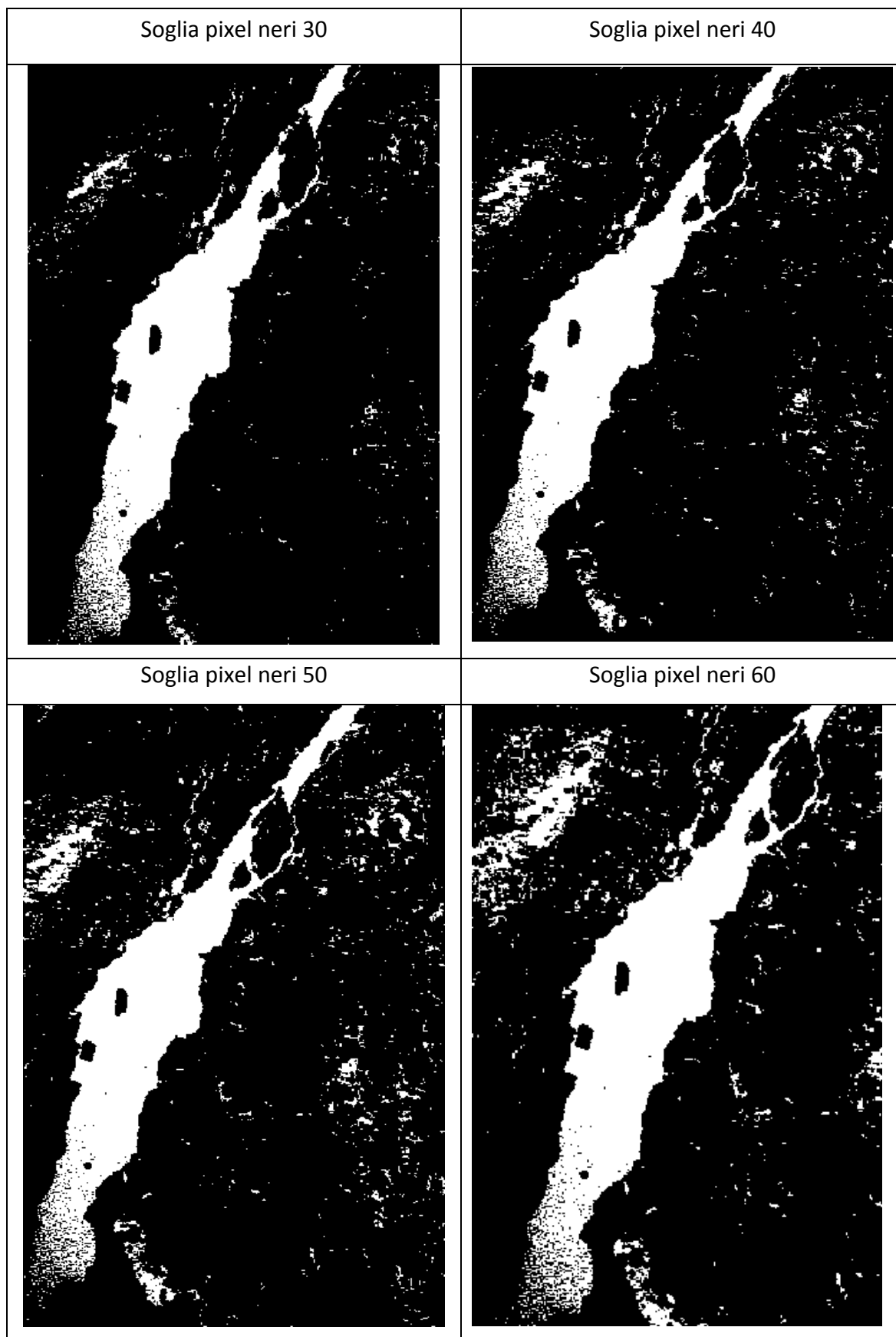
| Soglia pixel bianchi 200   | Soglia pixel bianchi 190  |
|--|---|
|  A binary image showing a white, irregular shape against a black background. The shape is somewhat elongated and has several small, dark spots within it. The edges are slightly blurred. |  A binary image showing a white, irregular shape against a black background. The shape is similar to the one in the first image but appears slightly more defined and has more internal detail. |
| Soglia pixel bianchi 180   | Soglia pixel bianchi 170  |
|  A binary image showing a white, irregular shape against a black background. The shape is similar to the others but appears slightly more defined and has more internal detail.         |  A binary image showing a white, irregular shape against a black background. The shape is similar to the others but appears slightly more defined and has more internal detail.               |

Le figure sovrastanti rappresentano i risultati ottenuti dall'intersezione delle matrici risultanti dalla selezione dei pixel bianchi e di quelli neri; si noti come, a soglia nera fissata, facendo variare la soglia bianca, diminuendola, il particolare della sezione sottile di fig. 5.3 risulta sempre meglio definito e rappresentato. A partire dalla soglia 190 però, ad una ulteriore diminuzione di soglia, si osserva un aumento rapido delle aree che vengono considerate vuoti ma che in realtà non lo sono, falsando così la rappresentazione finale. Si è deciso di considerare come soglia di selezione dei pixel bianchi ottimale quella corrispondente al valore 190.

Si noti infine, come i bordi dell'immagine al diminuire della soglia risultino sempre meglio definiti; questo però contrasta la comparsa sempre meno trascurabile di falsi vuoti che non possono essere considerati nel computo finale. Per tale motivo, si è deciso che nella fase successiva si procederà ad un ridimensionamento dell'immagine intersezione di modo che i bordi non influiscano sul calcolo percentuale dei vuoti rispetto al totale dell'immagine considerata.

Calibrazione soglia pixel neri:







Anche per la calibrazione della soglia dei pixel neri valgono le considerazioni effettuate nel caso precedente; ora, all'aumentare della soglia considerata, mantenendo invece fissa la soglia bianca, i vuoti rilevati aumentano sempre di più. La soglia ottima in questo caso è 40 che, come 190 nel caso dei pixel bianchi, rappresenta il miglior compromesso tra vuoti correttamente rilevati e falsi vuoti che disturbano l'immagine di intersezione finale.

### 5.2.2 Effetti di bordo

Come già accennato nel paragrafo precedente, per molte delle immagini elaborate, i bordi non rappresentano un contributo significativo, principalmente per due motivi: la modalità con cui è stata creata la sezione sottile la rende spesso disgregata ai bordi che presentano grossi vuoti che nulla hanno a che fare con i vuoti della roccia stessa (fig. 5.4) e in secondo luogo la modalità con cui l'immagine è stata ripresa (condizioni di luminosità, bordi sfuocati, presenza di parti estranee alla sezione sottile ecc.) (fig. 5.5).

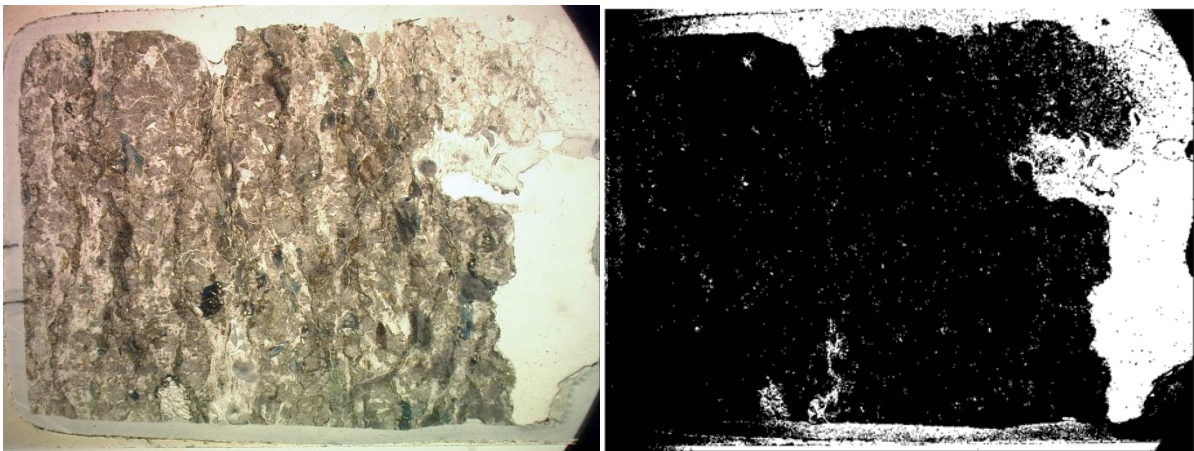
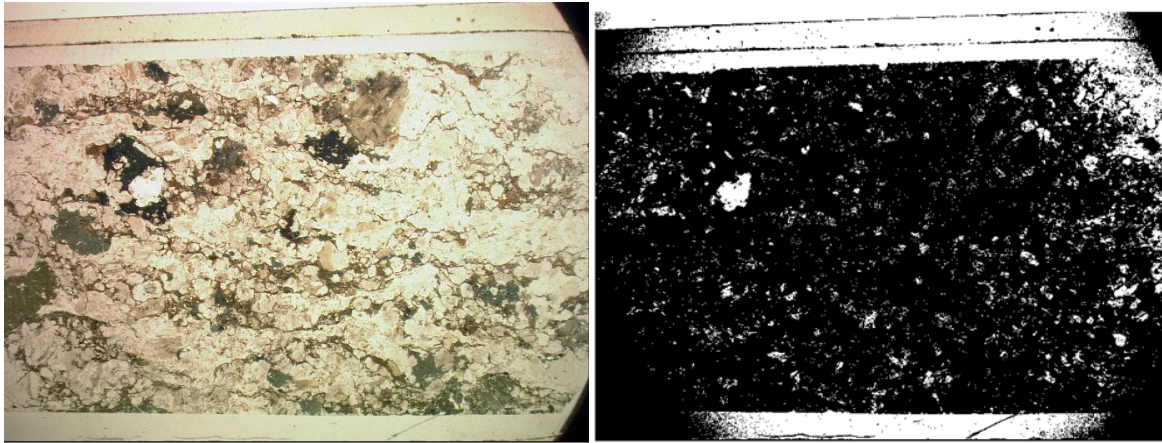


Fig. 5.4: esempio di vuoto al bordo destro dovuto alla ricostruzione della sezione sottile

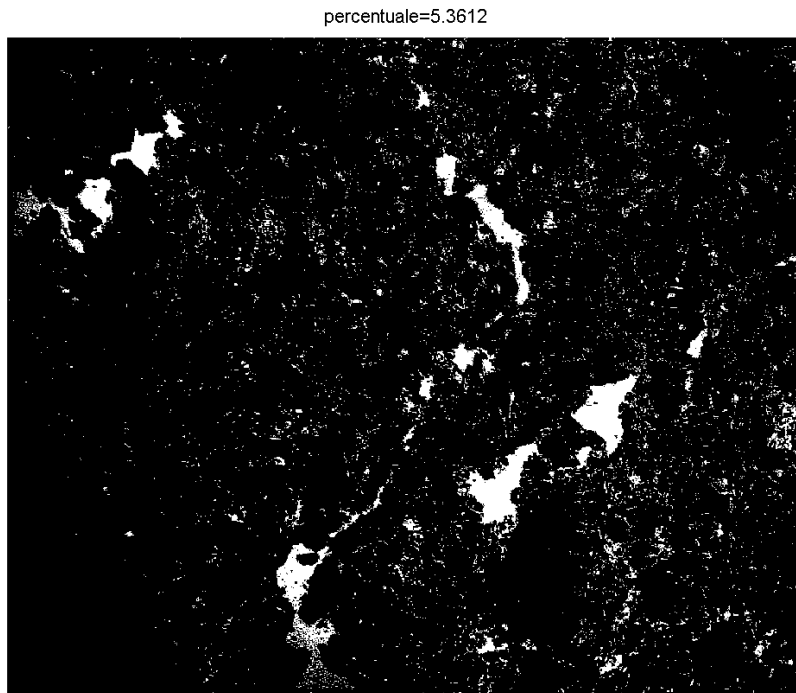


**Fig. 5.5: esempio di bordi sfuocati (destra e sinistra) ed estranei alla sezione sottile (superiore e inferiore)**

Per queste ragioni, i bordi verranno rimossi dall'immagine ottenuta prima di procedere al calcolo della percentuale di vuoto rispetto al totale della sezione sottile.

### **5.2.3 Filtraggio dei falsi vuoti**

Procedendo al calcolo della percentuale di pixel vuoti rispetto al totale della sezione considerata, si osserva che in molte delle immagini ottenute sono presenti una serie di pixel che l'algoritmo ha rilevato come vuoti ma che in realtà non lo sono (fig. 5.6), nonostante in fase di calibrazione si sia cercato di minimizzare tale effetto il più possibile. Tali falsi vuoti sono costituiti essenzialmente da minerali opachi, che si presentano neri (nicolsX) e bianchi (nicols//), quali ad esempio ematite, magnetite, pirite, grafite e spinelli.

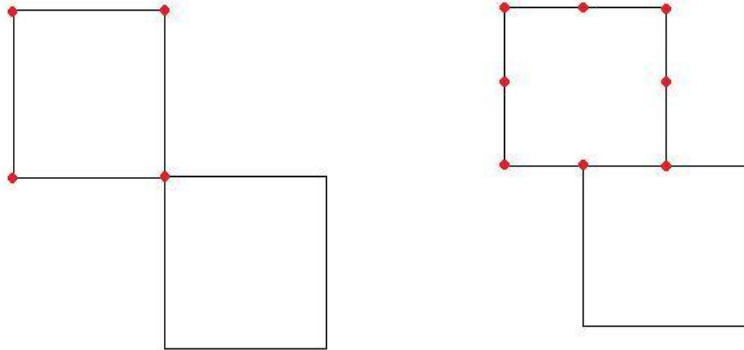


**Fig. 5.6: esempio di falsi vuoti rilevati dall'algoritmo: pixel singoli o a gruppi di qualche unità rilevati dall'algoritmo come vuoti**

La percentuale di vuoti rilevata dall'algoritmo quindi contiene anche l'errore dei pixel che disturbano l'immagine. Per ovviare a questo problema si è deciso di utilizzare una funzione implementata in MATLAB che provveda al postprocessamento dell'immagine e rimuova il meglio possibile il rumore di fondo rappresentato dai pixel sparsi per l'immagine.

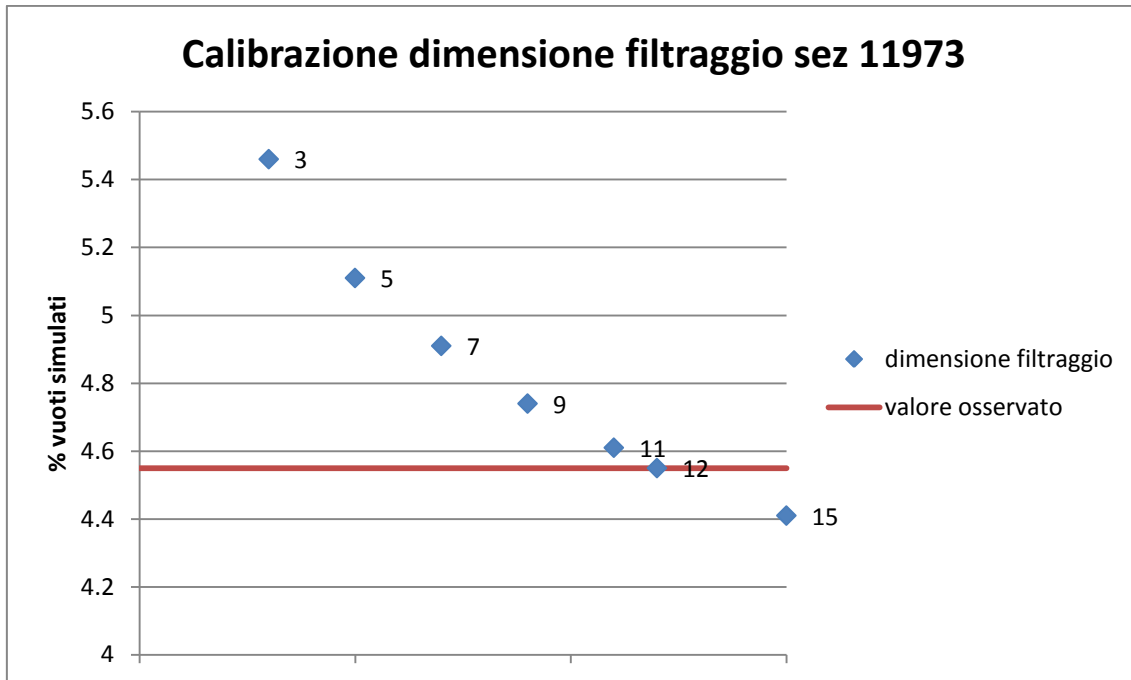
La funzione in questione è *"bwareaopen"*, che richiede in ingresso la definizione di due parametri: "P" e "conn"; il parametro *P* definisce il numero massimo di oggetti connessi che verranno rimossi, mentre il parametro *conn* specifica la modalità di connessione da considerare. In sintesi, tale funzione permette di rimuovere i più piccoli gruppi di pixel connessi tra loro che rappresentano il disturbo delle immagini ottenute. Il parametro *P* potrà essere reso piccolo o grande a piacere a seconda della dimensione degli oggetti che si intende eliminare, mentre il parametro *conn* può assumere solamente due valori pari a 4 o 8. Il valore di connessione pari a 4 considera connessi due pixel se e solo se condividono almeno uno dei 4 vertici, mentre dando in ingresso

al parametro con il valore 8 due pixel vengono considerati connessi se condividono almeno uno degli 8 vertici (fig. 5.7).



**Fig. 5.7: definizione del parametro Conn della funzione Bwareaopen; a sinistra connessione a 4 vertici, a destra connessione a 8 vertici.**

Per rendere il filtraggio più cautelativo si è deciso di utilizzare il parametro conn pari a 4; in questo modo verranno rimossi meno oggetti rispetto all'utilizzo del valore 8. Per quanto riguarda invece il parametro P, la ricerca del valore ottimale dovrà essere effettuata iterativamente cercando il risultato che massimizzi l'efficacia del metodo. Il valore ottimo è stato calibrato sulla base di una sezione sottile della quale sono stati misurati i vuoti (in percentuale areale) con l'aiuto del microscopio ottico e di un software grafico quale *Imagej* per la misura delle aree selezionate. Di seguito si riportano i grafici relativi alla calibrazione del parametro P.

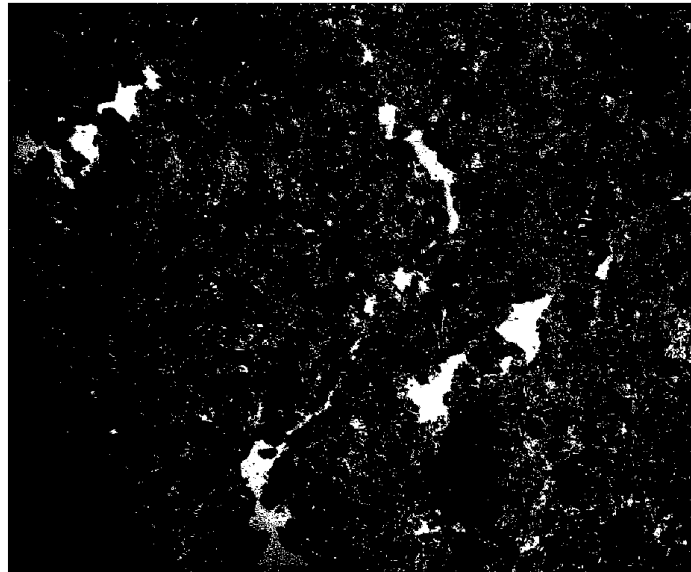


**Fig. 5.8: calibrazione parametro P dimensione del filtraggio sulla sezione campione 11973**

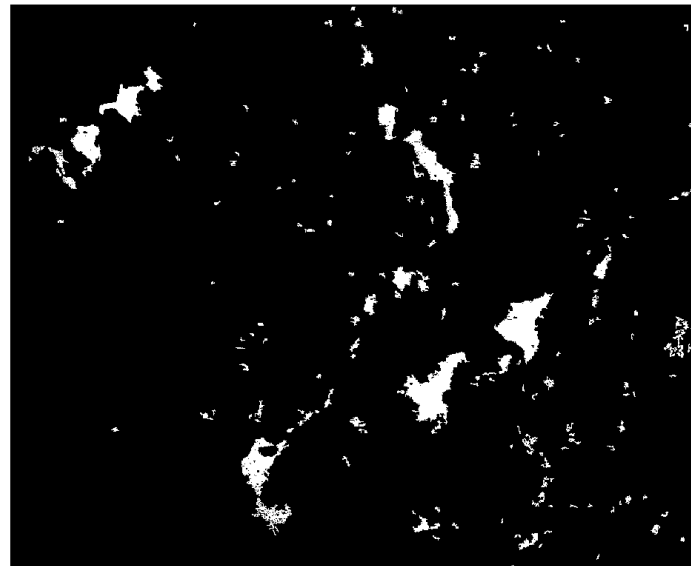
Come si osserva nel grafico sovrastante, le simulazioni sono state effettuate per un valore P pari a: 5, 7, 9, 11, 12, 15. Il valore ottimale che meglio approssima la percentuale misurata di vuoti della sezione sottile è il valore 12. Di seguito si riportano i risultati grafici pre e post processamento utilizzando come valore di filtraggio quello ricavato dalla calibrazione precedente, ovvero 12 e come soglie i valori di 40 (pixel neri) e 190 (pixel bianchi).



percentuale=5.3612

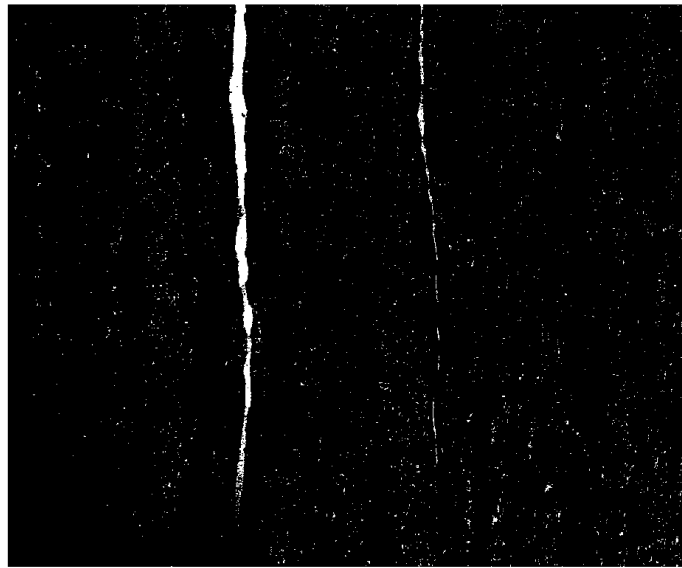


percentuale=3.3285

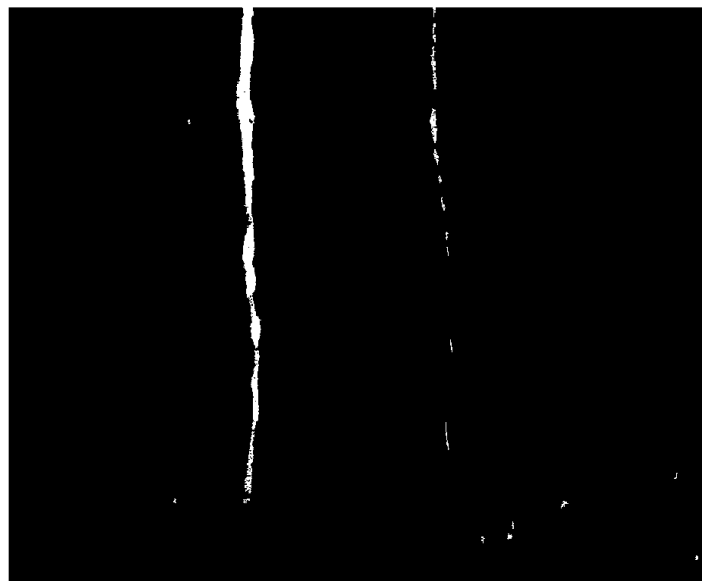


**Fig. 5.9: sezione S730: preprocessamento e postprocessamento.**

percentuale=1.6921



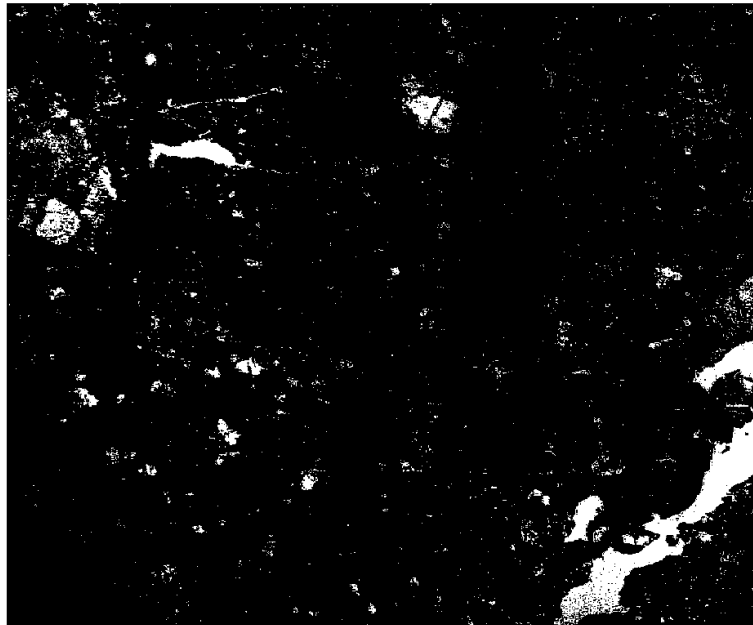
percentuale=1.0556



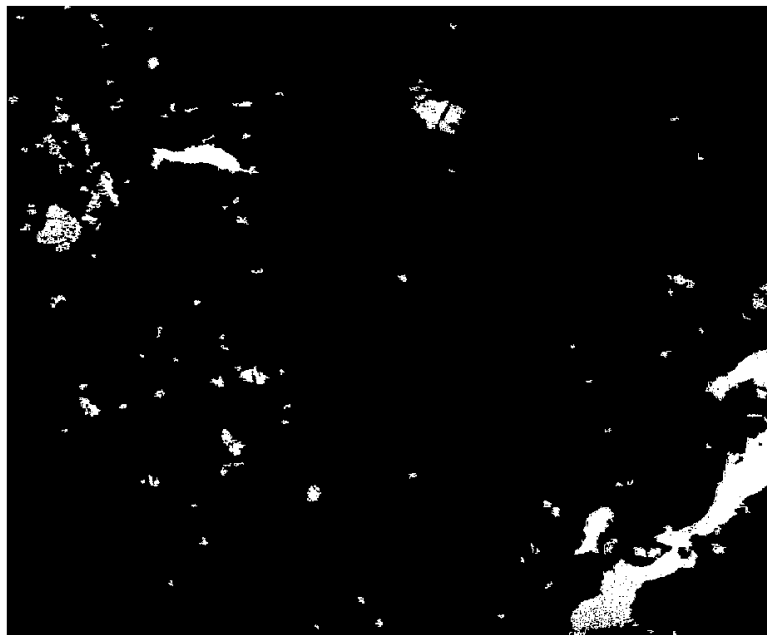
**Fig. 5.10: sezione S752 preprocessingamento e postprocessingamento**

29 Aprile 2014

percentuale=4.5892



percentuale=3.6862



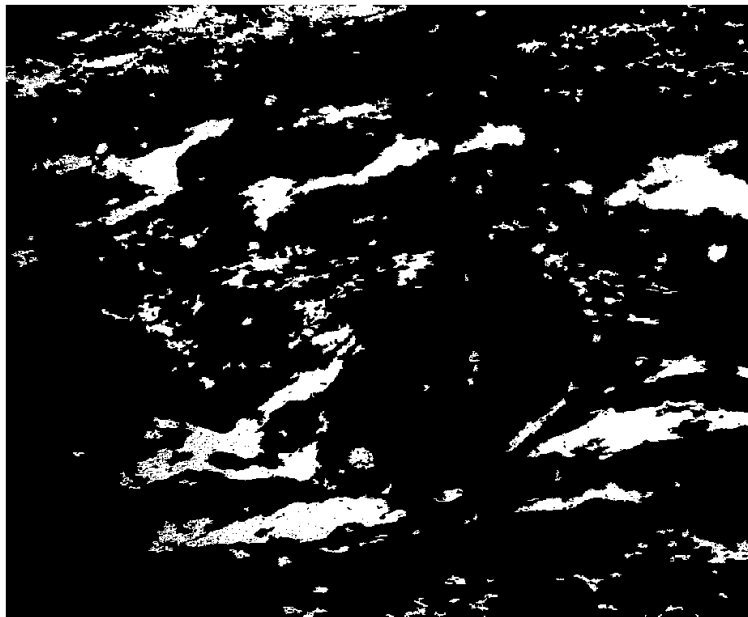
**Fig. 5.11: sezione S7301 preprocessamento e postprocessamento**

29 Aprile 2014

percentuale=13.3424



percentuale=11.306



**Fig. 5.12: sezione GBI57 preprocessamento e postprocessamento**

#### 5.2.4 Validazione dell'algoritmo

Il modello così proposto per l'analisi delle immagini introdotte a due a due, con il successivo calcolo della percentuale di vuoti, richiede la definizione in ingresso di 3 variabili: la soglia per la ricerca dei pixel bianchi, la soglia per la ricerca dei pixel neri e la dimensione del filtraggio da effettuare per la rimozione dei falsi vuoti. I risultati in termini di percentuale dipenderanno ovviamente dal valore congiunto di tali parametri di ingresso; la soluzione ottima presentata è la seguente:

- Soglia bianca: 190
- Soglia nera: 40
- P: 12

Tale soluzione non sarà ovviamente univoca; essa rappresenta una tra le varie possibilità che permette di simulare un valore di vuoti simulato il più vicino possibile a quello osservato sperimentalmente. È intuitivo comprendere che, ad esempio, al diminuire della restrizione delle soglie, e quindi all'aumentare dei pixel selezionati come vuoti, dovrà essere aumentata la dimensione del filtraggio in modo da rimuovere più vuoti e viceversa. Di seguito si riporta un grafico di validazione dell'intero modello su una sezione non utilizzata in fase di calibrazione, ma per la quale fosse possibile (come per la precedente sezione 11973 usata in calibrazione) una misura ottica dei vuoti.

Fissate le soglie pari a 40 per i pixel neri e 190 per i bianchi, al variare della dimensione del filtraggio, la soluzione ottimale è ancora una volta un filtraggio con dimensione 12.



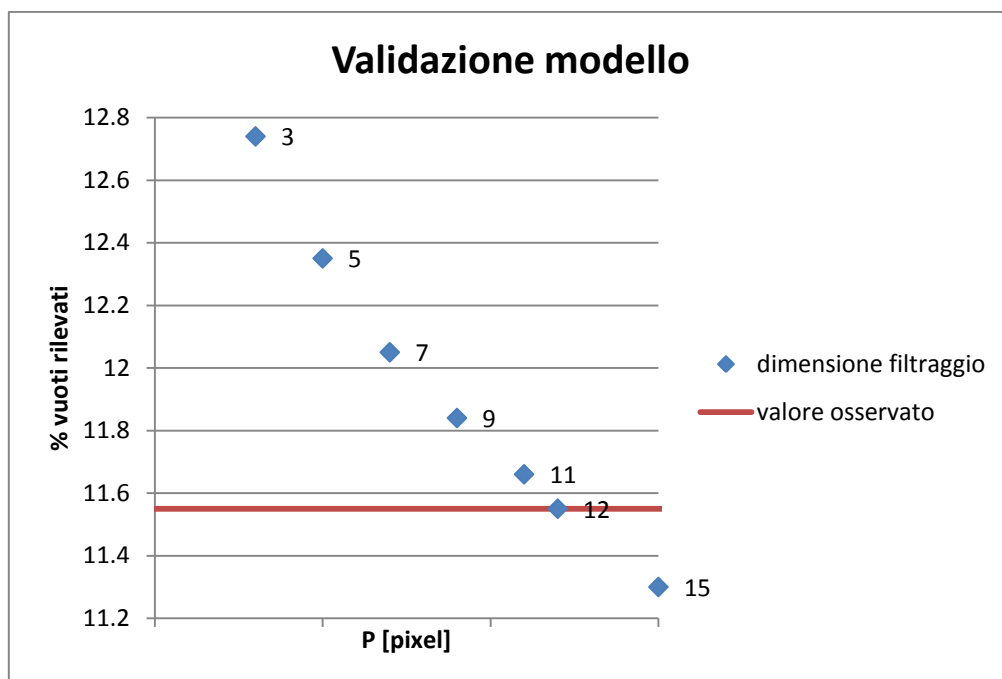


Fig. 5.13: validazione del modello attraverso la sez GBI57

Fissata invece la dimensione del filtraggio, al variare delle soglie dei pixel bianchi e neri i valori ottimali sono, ancora una volta, 190 e 40.

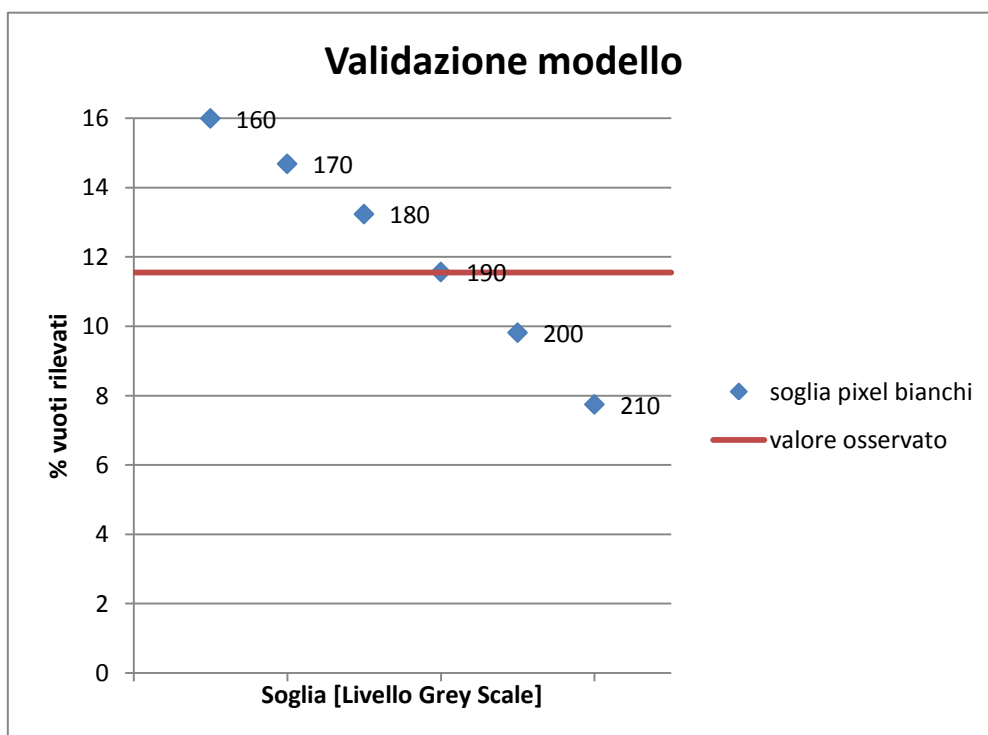
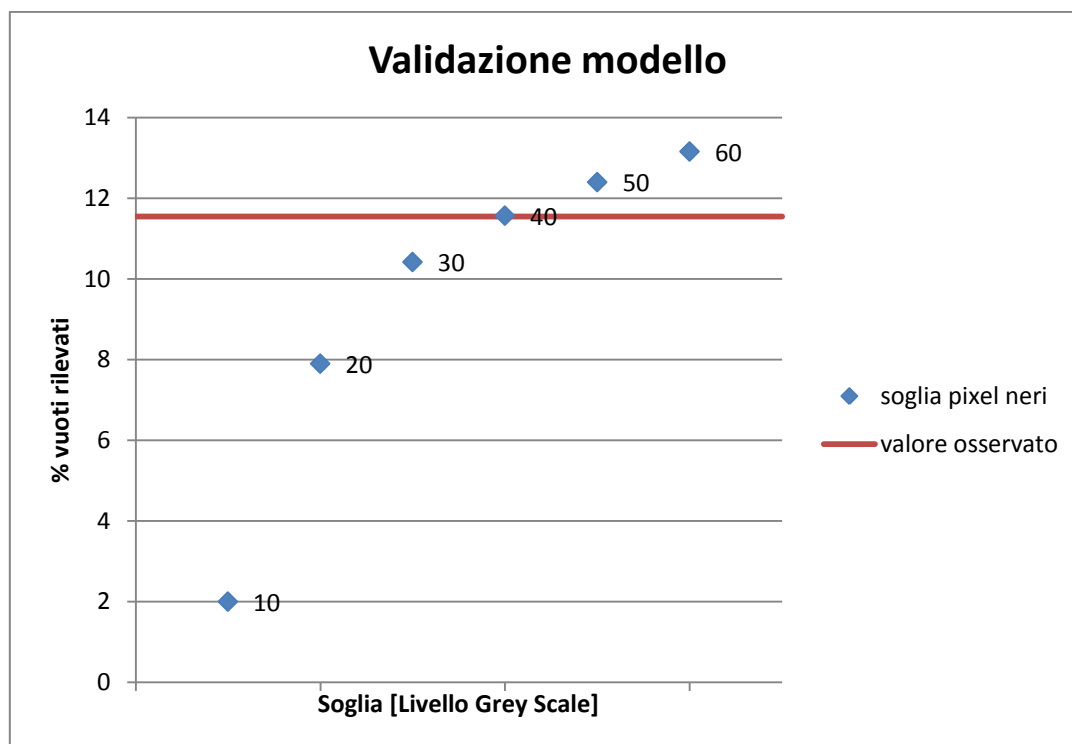


Fig. 5.14: validazione del modello attraverso la sez GBI57



**Fig. 5.15: validazione del modello attraverso la sez GBI57**

I risultati ottenuti attraverso l'implementazione dell'algoritmo nonché il confronto tra le grandezze ricavate alle diverse scale vengono illustrati nel capitolo successivo.

## Capitolo 6

# Discussione dei risultati e utilizzo applicativo

### 6.1 Risultati ottenuti

Di seguito si riportano i risultati ottenuti per ciascuna sezione sottile (Tab. 6.1). Delle 31 sezioni sottili disponibili, 1 (GBI52, progressiva 11783 m) non è stata considerata nell'analisi perché la rilevazione dei pixel bianchi/neri risultava completamente distorta e poco rappresentativa della realtà. Le ipotesi alla base di tale anomalia sono riconducibili a difetti di fotografia oppure alla presenza di minerali opachi (neri nell'immagine a nicols //, bianchi in quella a nicols X) che l'algoritmo ha erroneamente identificato come vuoti.

| Sezione sottile | Progressiva [m] | Vuoti [%] | Tipologia di vuoto                                |
|-----------------|-----------------|-----------|---|
| GBI44           | 11575           | 0,54      | Micro-pori  |
| GBI43           | 11610           | 2,05      | Micro-pori  |
| GBI45           | 11633           | 0,69      | Micro-pori  |
| GBI47           | 11735           | 3,27      | Micro-pori  |
| GBI48           | 11735           | 3,26      | Micro-pori  |
| GBI46           | 11747           | 0,61      | Micro-pori  |
| GBI53           | 11760           | 2,09      | Grandi vuoti allungati in direzioni preferenziali |
| S730            | 11762           | 3,33      | Grandi vuoti allungati in direzioni preferenziali |
| S752            | 11784           | 1,06      | Grandi vuoti allungati in direzioni preferenziali |

|       |       |       |   |
|-------|-------|-------|---|
| GBI54 | 11791 | 0,15  | Micro-pori  |
| GBI49 | 11795 | 0,11  | Micro-pori  |
| GBI50 | 11801 | 0,45  | Micro-pori  |
| GBI51 | 11809 | 0,50  | Micro-pori  |
| 11810 | 11810 | 0,00  | Micro-fratture  |
| GBI56 | 11812 | 1,37  | Grandi vuoti allungati<br>in direzioni<br>preferenziali |
| GBI57 | 11816 | 11,57 | Grandi vuoti allungati<br>in direzioni<br>preferenziali |
| S789  | 11821 | 4,87  | Grandi vuoti allungati<br>in direzioni<br>preferenziali |
| GBI58 | 11822 | 7,43  | Micro-pori  |
| 11838 | 11838 | 4,94  | Micro-pori  |
| S7113 | 11845 | 0,02  | Micro-pori  |
| S7178 | 11910 | 0,32  | Micro-pori  |
| 11952 | 11952 | 1,59  | Micro-pori  |
| S7220 | 11952 | 2,20  | Micro-pori  |
| 11973 | 11973 | 4,56  | Grandi vuoti allungati<br>in direzioni<br>preferenziali |
| 11980 | 11980 | 3     | Micro-pori  |
| S7269 | 12001 | 0,58  | Micro-pori  |
| S7301 | 12033 | 3,69  | Grandi pori allungati<br>in direzioni<br>preferenziali  |
| S7334 | 12066 | 0,15  | Micro-pori  |
| S7350 | 12082 | 0,00  | Micro-pori  |

**Tab. 6.1: percentuale di vuoti corrispondenti alle varie sezioni sottili**

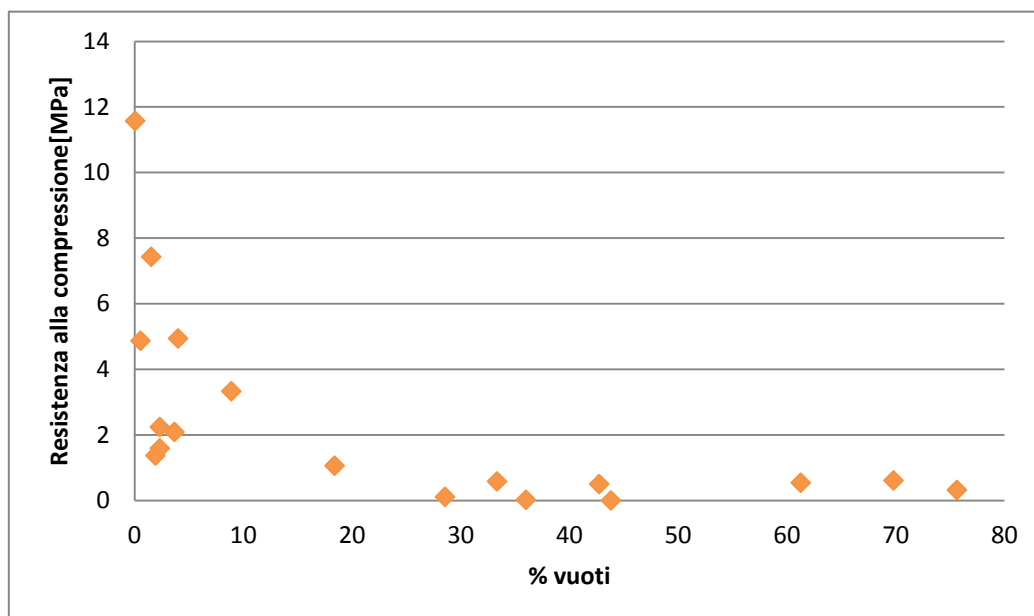
Di seguito si riporta una media dei valori ottenuti per ciascun litotipo presente.

| Litotipo    | Vuoti [%] |
|-------------|-----------|
| Cataclasite | 5,00      |
| Paragneiss  | 3,20      |
| Tonaliti    | 1,74      |
| Scisti      | 1,33      |
| Gneiss      | 0,27      |

**Tab. 6.2: media dei vuoti per ciascun litotipo**

Come dimostrano vari studi di letteratura sull'argomento, la presenza di vuoti alla micro-scala può essere messa in relazione con la resistenza alla compressione monoassiale del campione di roccia intatta.

Il grafico di figura 6.1 evidenzia l'esistenza di una relazione inversa tra la resistenza alla compressione monoassiale della roccia intatta e la percentuale di vuoti presenti alla microscala. I valori risultano però estremamente dispersi ed è difficile individuare delle buone correlazioni tra i dati.

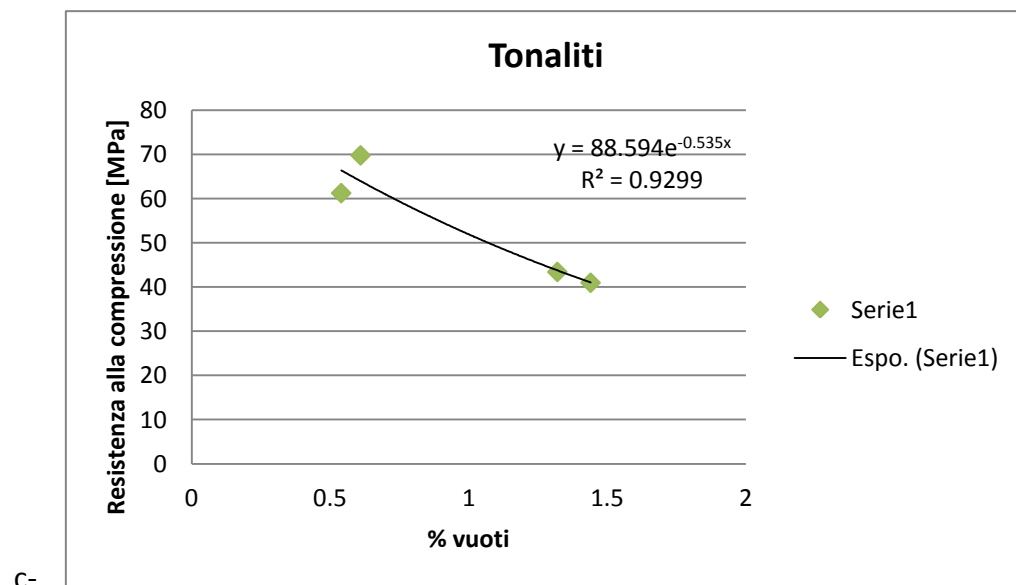
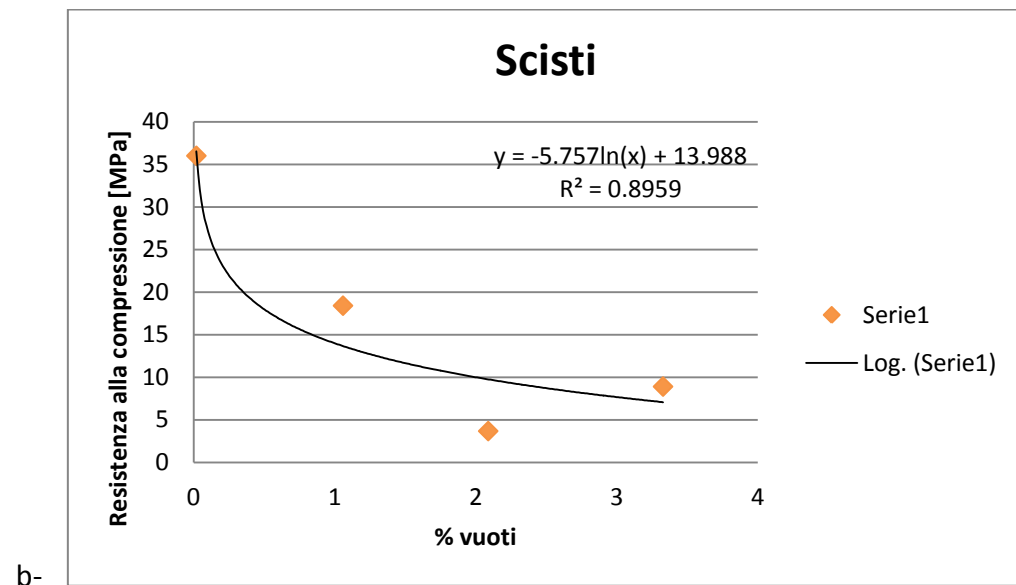
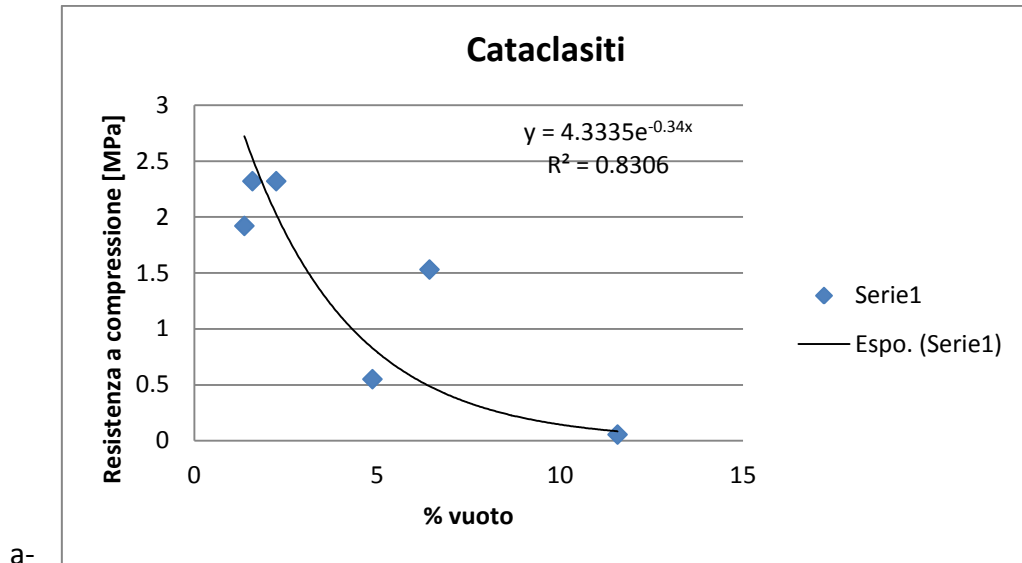


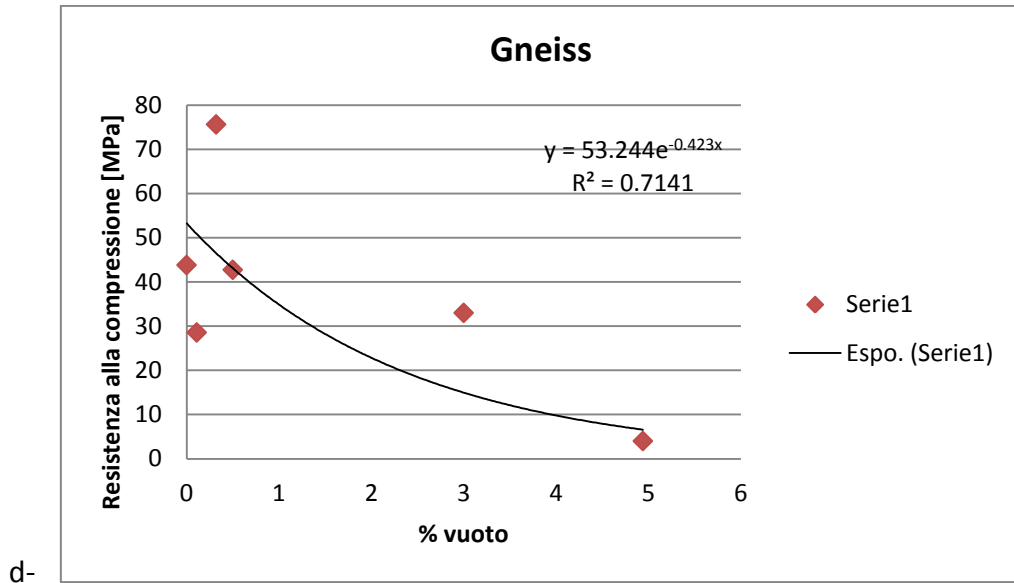
**Fig. 6.1: Correlazioni tra la resistenza alla compressione monoassiale campione e la % di vuoti sezione sottile corrispondente.**

A tal proposito, si riporta dapprima una correlazione tra le due grandezze sulla base della diversa litologia considerata (fig. 6.2).



29 Aprile 2014





**Fig. 6.2: correlazione tra la resistenza alla compressione monoassiale e la % di vuoti nella sezione sottile nelle diverse litologie incontrate.**

Come ben noto, la resistenza meccanica è in larga misura condizionata anche dallo stato di fratturazione dell'ammasso roccioso. La correlazione illustrata in fig. 6.3 è fatta tenendo conto anche dell'indice RQD, rappresentativo dello stato di fratturazione dell'ammasso roccioso. La correlazione risulta essere di tipo logaritmico per valori di RQD maggiori del 65% e secondo legge di potenza per valori di RQD inferiori al 30%, mentre per i valori intermedi si osserva una notevole dispersione dei dati che rende difficile l'individuazione di un trend.

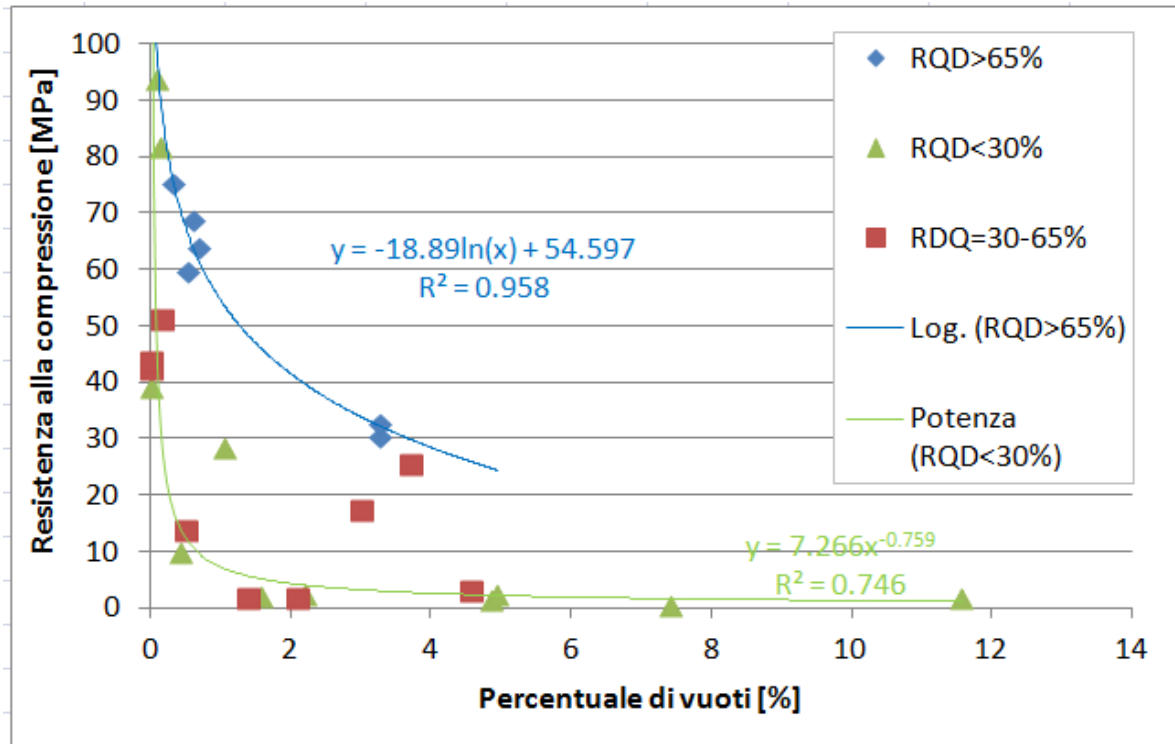


Fig. 6.3: Correlazioni tra la resistenza alla compressione monoassiale campione e la % di vuoti sezione sottile corrispondente, sulla base dei valori dell'indice RQD.

Un'altra correlazione tra le caratteristiche alla micro-scala e quelle alla meso-scala è stata fatta sulla base della forma dei vuoti riscontrati nelle sezioni sottili: da un lato micro-pori di forma pseudo circolare, dall'altro fratture longitudinali e grossi vuoti allungati secondo direzioni preferenziali. Come appare evidente dal grafico di figura 6.4, questa caratteristica è determinante per il comportamento meccanico della roccia, così come già illustrato nel capitolo 4 (vedi Cap. 4 – Caratterizzazione alla micro-scala).

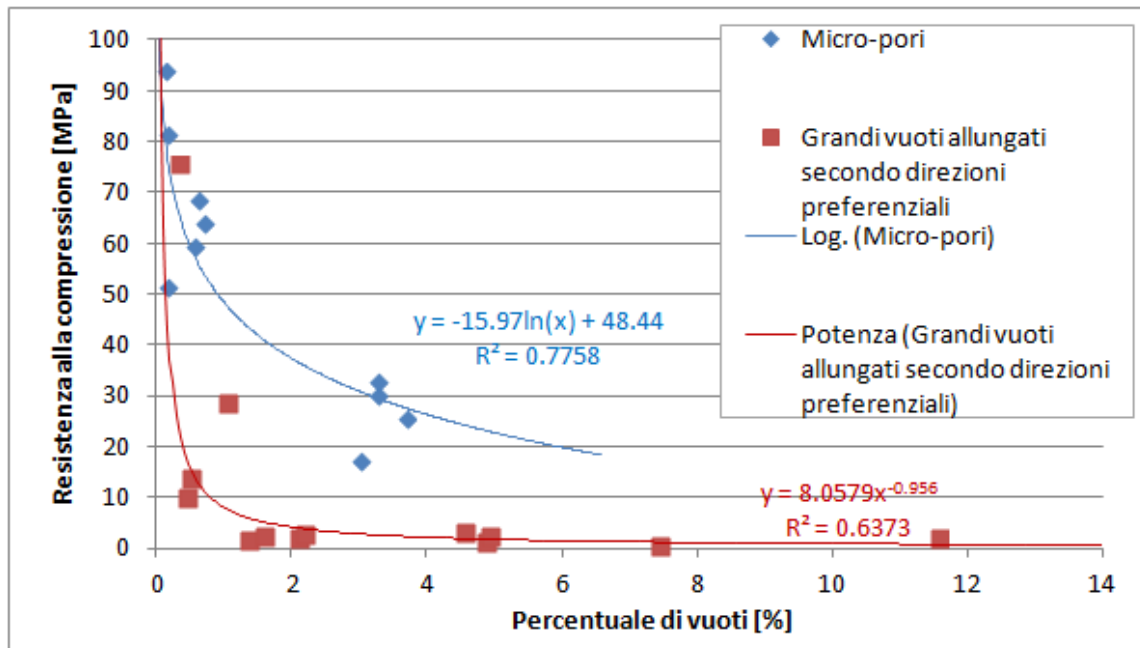


Fig. 6.3: Correlazione tra le grandezze di micro-scala (% di vuoti) e di meso-scala (resistenza alla compressione) sulla base della distribuzione dei vuoti all'interno della sezione sottile.

È evidente come la presenza di grandi vuoti allungati in direzioni preferenziali peggiori notevolmente le condizioni della roccia in termini di resistenza alla compressione che diminuisce molto più rapidamente rispetto alla presenza di micro-pori. Si osserva infatti come nel caso di grandi vuoti allungati già ad una percentuale di vuoti pari al 2%, la resistenza alla compressione risulta essere nulla, contro un valore di circa 20-30 MPa nel caso di presenza di micro-pori.

Infine, si riporta in allegato (Allegato 5 – Confronto alle diverse scale) un'immagine riassuntiva di confronto delle grandezze ricavate alle diverse scale di analisi.

## 6.2 Utilizzo applicativo delle correlazioni ricavate

In presenza di ammassi rocciosi fratturati per la presenza di più sistemi di discontinuità, che lo scompongono in blocchi, è necessario valutare un comportamento globale dell'ammasso in termini di resistenza. Non esistono però

prove dirette, in sito o in laboratorio, in grado di fornire univocamente un modello di comportamento dell'ammasso. Si ricorre pertanto a:

- Modelli indiretti basati su indici di qualità (classificazioni geomeccaniche)
- Criteri di rottura empirici o semiempirici
- Modelli matematici (back analysis)

Gli indici di qualità derivanti dalle classificazioni geomeccaniche permettono una stima approssimata del comportamento dell'ammasso. Per alcuni di essi vengono fornite le correlazioni tra le classi di qualità dell'ammasso e i relativi parametri di resistenza (coesione ed angolo d'attrito). I criteri di rottura empirici permettono di attribuire un dominio di resistenza ad un ammasso roccioso, a partire dalle proprietà del materiale roccia che costituisce i singoli blocchi dell'ammasso e dall'influenza delle discontinuità sul comportamento dell'ammasso stesso.

Infine, i metodi di back analysis permettono di valutare la resistenza dell'ammasso roccioso tramite modellazione numerica di un fenomeno reale, di cui sono note le condizioni al contorno e cinematisimo [Gattinoni et al.; 2012].

Per il caso di studio considerato, nel seguito si farà uso prima di una classificazione geomeccanica e poi di un criterio di rottura empirico.

### 6.2.1 Il criterio di Hoek e Brown: il problema della stima del parametro $m_i$

Il criterio di rottura empirico più diffuso e utilizzato è quello di Hoek&Brown, caratterizzato da un dominio di resistenza non lineare, i cui parametri sono dedotti sperimentalmente da esperienze incrociate in laboratorio e in sito. Rispetto alla formulazione originaria del 1980, questo criterio è stato modificato dagli Autori nel corso degli anni e perfezionato, anche per la sua applicazione alle rocce tenere e alle formazioni più complesse. Nel seguito se ne illustra la versione più recente:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left( m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^\alpha$$

Dove:

$\sigma_1'$  e  $\sigma_3'$  = sforzi principali maggiore e minore a rottura

$\sigma_c$  = resistenza alla compressione monoassiale del materiale roccia intatto

$m_b, s, \alpha$  = coefficienti che dipendono dalle caratteristiche dell'ammasso roccioso



Tali coefficienti possono essere calcolati attraverso le seguenti formule:

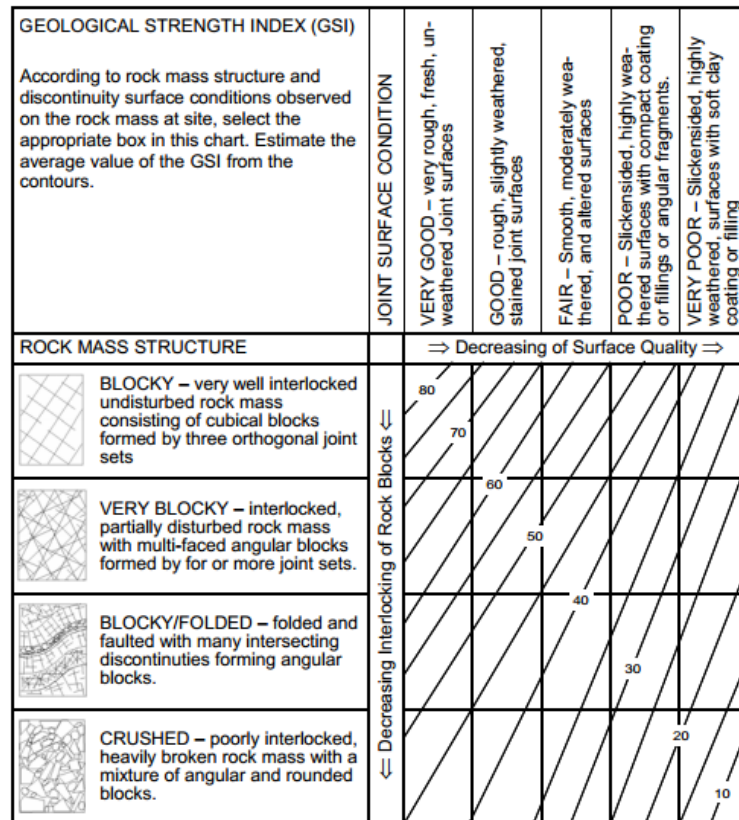
$$m_b = m_i e^{\frac{GSI-100}{28-14D}}$$

$$s = e^{\frac{GSI-100}{9-3D}}$$

$$\alpha = 0.5 + \frac{1}{6} \left( e^{\frac{-GSI}{15}} - e^{\frac{-20}{3}} \right)$$

In cui:

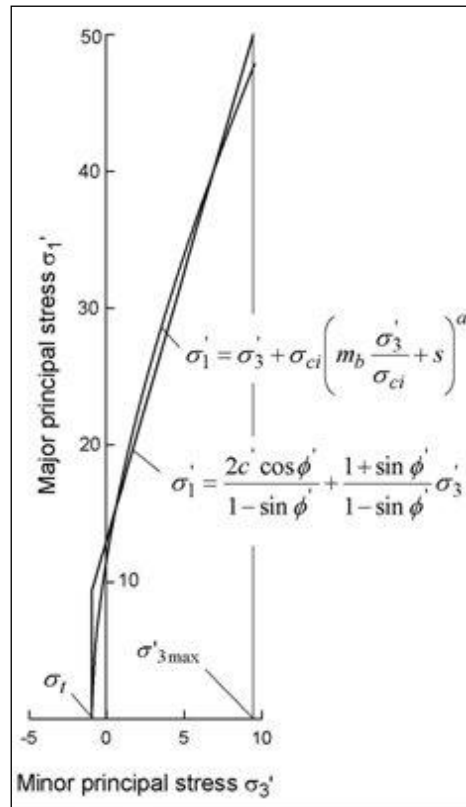
- $m_i$  è un fattore tipico della roccia intatta ed è ottenuto con un'interpolazione ai minimi quadrati di un set di prove triassiali con l'equazione che esprime il dominio di rottura della roccia intatta oppure ricavato da valori di letteratura.
- **GSI** (Geological Strength Index) è un indice di qualità dell'ammasso roccioso variabile tra 5 e 100, funzione delle condizioni geomeccaniche e del grado di alterazione. Per la determinazione di questo parametro esistono correlazioni che lo legano all'indice RMR di Bieniawski. Queste correlazioni non sono affidabili per ammassi rocciosi di qualità molto basse ( $GSI < 25$ ); per questi casi il GSI si ricava tramite abachi analoghi a quelli riportati in fig. 6.4.
- **D** è il fattore di disturbo, che tiene conto dell'impatto delle tecnologie di scavo sugli ammassi considerati e/o delle deformazioni subite dall'ammasso a seguito o prima dello scavo. Varia tra 0 (ammassi non disturbati) e 1 (ammassi disturbati).



**Fig. 6.4: Abaco per la stima del GSI in funzione del grado di fratturazione e delle condizioni di alterazione dell’ammasso roccioso.**

In fig. 6.5 si riporta un esempio di dominio alla Hoek-Brown, dove si riconosce l’intercetta con l’asse degli sforzi massimi (resistenza a compressione monoassiale). Gli stessi Autori hanno riconosciuto che tale valore non è applicabile ai fini progettuali, in quanto eccessivamente cautelativo. Per la applicazioni ingegneristiche, si propone quindi un valore diverso della resistenza, resistenza a compressione di ammasso ed indicata con il simbolo  $\sigma_{cm}$ . Questa grandezza rappresenta, sul piano  $\sigma_1$ - $\sigma_3$ , il punto di intersezione tra l’asse degli sforzi massimi e la retta interpolante la curva di involuppo e analiticamente vale:

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \frac{(m_b + 4s - a(m_b - 8s)) \cdot (\frac{m_b}{4} + s)^{a-1}}{2 \cdot (1+a)(2+a)}$$



**Fig. 6.5: Criterio di Hoek & Brown**

Per ottenere i valori di resistenza alla compressione di ammasso alle varie progressive e in corrispondenza dei vari litotipi attraversati dal cunicolo, è necessaria la stima dei parametri  $s$ ,  $\alpha$  e  $m_b$  le cui formule sono state sopra riportate. La stima dei primi due dipende esclusivamente dal valore di GSI e dal fattore di disturbo  $D$ ; GSI viene valutato con l'ausilio dell'abaco di fig. 6.5, mentre il valore di  $D$  è stato posto ovunque uguale a 0.

Per quanto riguarda invece il parametro  $m_b$ , esso dipende dal coefficiente  $m_i$ , tipico del materiale roccia e connesso ai caratteri petrografici e alla sua tessitura; tale coefficiente può essere ricavato sulla base di valori di letteratura già presenti e tabulati per diverse litologie, oppure dedotto tramite l'interpolazione ai minimi quadrati di risultati di prove triassiali.

La stima di quest'ultimo parametro risulta spesso difficile e affetta da errori, pertanto di seguito si è deciso di confrontare tre stime dello stesso ricavate sulla base di approcci differenti e da esse ricavarne le resistenze a compressione degli ammassi rocciosi  $\sigma_{cm}$ , secondo la formula sopra esposta.

Dapprima, per ricavare i parametri caratterizzanti il criterio di Hoek-Brown, si è resa necessaria la stima del GSI, che di seguito viene riportata per i due sondaggi alle diverse progressive (tab. 6.3 e 6.4).

| <b>Sondaggio SAV6</b>       |                        |       |            |
|-----------------------------|------------------------|-------|------------|
| <b>Litotipo</b>             | <b>Progressiva [m]</b> |       | <b>GSI</b> |
| <b>Tonaliti</b>             | 11506                  | 11610 | 65.95      |
|                             | 11610                  | 11729 | 71.35      |
| <b>Tonaliti milonizzate</b> | 11725                  | 11758 | 63.1       |
| <b>Scisti filladici</b>     | 11758                  | 11793 | 32.7       |
| <b>Gneiss</b>               | 11793                  | 11809 | 42.9       |
| <b>Cataclasiti</b>          | 11809                  | 11835 | 37.6       |

Tab. 6.3: GSI valutato per gli ammassi rocciosi del sondaggio SAV6 [Relazioni BBT; 2013]

| <b>Sondaggio SAV7</b>               |                        |         |            |
|-------------------------------------|------------------------|---------|------------|
| <b>Litotipo</b>                     | <b>Progressiva [m]</b> |         | <b>GSI</b> |
| <b>Tonaliti milonizzate</b>         | 11732                  | 11763.6 | 55.5       |
| <b>Scisti filladici</b>             | 11763.6                | 11784.8 | 34.3       |
| <b>Paragneiss quarzosi</b>          | 11784.8                | 11789.8 | 49.0       |
| <b>Scisti filladici</b>             | 11789.8                | 11805.7 | 34.0       |
| <b>Paragneiss quarzosi</b>          | 11805.7                | 11815.3 | 45.8       |
| <b>Cataclasiti</b>                  | 11815.3                | 11829.7 | 40.5       |
| <b>Paragneiss quarzosi</b>          | 11829.7                | 11833.4 | 46.5       |
| <b>Cataclasiti</b>                  | 11833.4                | 11836.4 | 36.1       |
| <b>Scisti filladici</b>             | 11836.4                | 11845.7 | 37.9       |
| <b>Cataclasiti</b>                  | 11845.7                | 11849   | 33.5       |
| <b>Scisti filladici</b>             | 11849                  | 11889.5 | 35.0       |
| <b>Paragneiss quarzosi</b>          | 11889.5                | 11896.7 | 46.0       |
| <b>Cataclasiti</b>                  | 11896.7                | 11901.5 | 31.0       |
| <b>Paragneiss quarzosi</b>          | 11901.5                | 11915.2 | 49.8       |
| <b>Scisti filladici</b>             | 11915.2                | 11921.4 | 33.1       |
| <b>Paragneiss quarzosi</b>          | 11921.4                | 11944.9 | 47.5       |
| <b>Scisti filladici-cataclasiti</b> | 11944.9                | 11978.8 | 29.7       |
| <b>Paragneiss quarzosi</b>          | 11978.8                | 11990.4 | 42.7       |
| <b>Scisti quarzitici</b>            | 11990.4                | 11999.6 | 53.5       |
| <b>Quarzite</b>                     | 11999.6                | 12064.7 | 62.1       |
| <b>Gneiss anfibolitici</b>          | 12064.7                | 12082.5 | 47.6       |

Tab. 6.4: GSI valutato per gli ammassi rocciosi del sondaggio SAV7 [Relazioni BBT; 2013]

La condizione peggiore è presentata nel caso degli scisti e delle cataclasiti, in entrambi i sondaggi effettuati, caratterizzati da un GSI di circa 35. Come già accennato i

parametri  $\alpha$  e  $s$  dipendono unicamente dal GSI, pertanto il parametro sul quale verranno effettuate le successive considerazioni che porteranno a stime di resistenza di ammasso diverse, è il parametro  $m_i$ .

Si è deciso di valutare il parametro  $m_i$  sia sulla base di valori presi dalla letteratura che sulla base dei risultati delle prove di compressione e trazione indiretta a disposizione; da tali valori si è poi calcolato il valore di resistenza alla compressione dell'ammasso roccioso  $\sigma_{cm}$  (vedi tab. 6.5 e 6.6).

| <b>Litotipo</b>             | <b><math>\sigma_{ci}</math> [Mpa]</b> | <b>GSI</b> | <b><math>s</math></b> | <b><math>\alpha</math></b> | <b><math>m_{i\_lett.}</math></b> | <b><math>m_b</math></b> | <b><math>\sigma_{cm}</math> [MPa]</b> |
|-----------------------------|---------------------------------------|------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| <b>Tonaliti milonizzate</b> | 40                                    | 55.0       | 0.00127               | 0.51137                    | 25                               | 5.01                    | 12.03                                 |
| <b>Scisti filladici</b>     | 5                                     | 35.0       | 0.00003               | 0.61921                    | 20                               | 1.96                    | 0.88                                  |
| <b>Paragneiss quarzosi</b>  | 40                                    | 45.0       | 0.00127               | 0.51137                    | 20                               | 2.81                    | 8.79                                  |
| <b>Cataclasiti</b>          | 3                                     | 32.5       | 0.00002               | 0.63624                    | 20                               | 1.80                    | 0.50                                  |
| <b>Quarziti</b>             | 50                                    | 60.0       | 0.00387               | 0.50573                    | 20                               | 4.79                    | 14.98                                 |
| <b>Gneiss anfibolici</b>    | 30                                    | 45.0       | 0.00042               | 0.52234                    | 20                               | 2.81                    | 6.59                                  |

**Tab. 6.5: parametri del criterio di rottura di Hoek-Brown e resistenza alla compressione degli ammassi rocciosi; valori del parametro  $m_i$  presi dalla letteratura.**

| <b>Litotipo</b>             | <b><math>\sigma_{ci}</math> [Mpa]</b> | <b>GSI</b> | <b><math>s</math></b> | <b><math>\alpha</math></b> | <b><math>m_{i\_prove}</math></b> | <b><math>m_b</math></b> | <b><math>\sigma_{cm}</math> [MPa]</b> |
|-----------------------------|---------------------------------------|------------|-----------------------|----------------------------|----------------------------------|-------------------------|---------------------------------------|
| <b>Tonaliti milonizzate</b> | 40                                    | 55.0       | 0.00127               | 0.51137                    | 8                                | 1.60                    | 7.04                                  |
| <b>Scisti filladici</b>     | 5                                     | 35.0       | 0.00003               | 0.61921                    | 5                                | 0.49                    | 0.44                                  |
| <b>Paragneiss quarzosi</b>  | 40                                    | 45.0       | 0.00127               | 0.51137                    | 8                                | 1.12                    | 5.61                                  |
| <b>Cataclasiti</b>          | 3                                     | 32.5       | 0.00002               | 0.63624                    | 6                                | 0.54                    | 0.27                                  |
| <b>Quarziti</b>             | 50                                    | 60.0       | 0.00387               | 0.50573                    | 12.5                             | 3.00                    | 12.06                                 |
| <b>Gneiss anfibolici</b>    | 30                                    | 45.0       | 0.00042               | 0.52234                    | 8.75                             | 1.23                    | 4.39                                  |

**Tab. 6.6: parametri del criterio di rottura di Hoek-Brown e resistenza alla compressione degli ammassi rocciosi; valori del parametro  $m_i$  ricavati dalle prove triassiali sui campioni.**

La resistenza degli ammassi rocciosi interessati dal cunicolo calcolata sulla base dei risultati delle prove a disposizione, risulta per tutti i litotipi inferiore rispetto a quella calcolata utilizzando per il parametro  $m_i$  valori di letteratura. La differenza tra le due stime risulta essere intorno al 50% per tonaliti, scisti e cataclasiti, circa il 30% per gli gneiss e attorno al 20% per le quarziti (tab. 6.7).

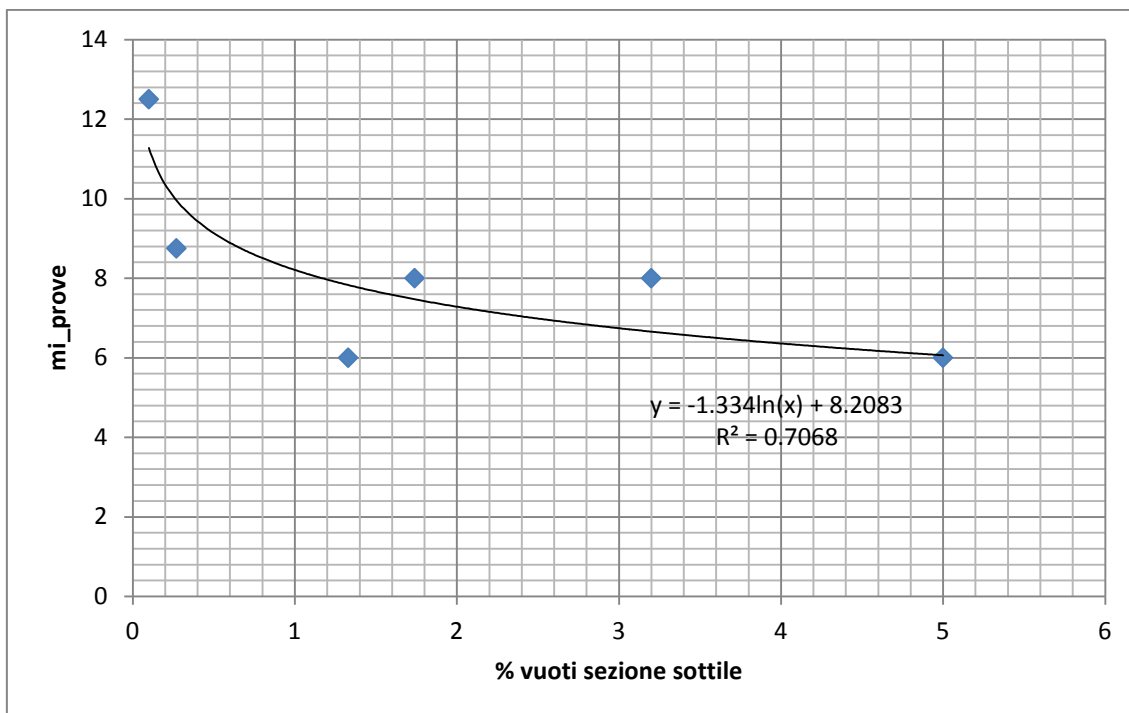


| <b>Litotipo</b>      | <b><math>\Delta</math> [%]</b> |
|----------------------|--------------------------------|
| Tonaliti milonizzate | 41                             |
| Scisti filladici     | 50                             |
| Paragneiss quarzosi  | 36                             |
| Cataclasiti          | 46                             |
| Quarziti             | 19                             |
| Gneiss anfibolici    | 33                             |

**Tab. 6.7:** differenza tra le due stime di resistenza alla compressione di ammasso (tab 6.5 e 6.6)

Come già accennato, il parametro  $m_i$  risulta correlato alle caratteristiche petrografiche e microstrutturali della roccia. Pertanto, si propone un tentativo di correlazione tra i valori dei parametri  $m_i$  ottenuti sulla base delle prove di compressione monoassiale e trazione indiretta effettuate sui campioni prelevati e le caratteristiche strutturali alla microscala evidenziate attraverso lo studio delle sezioni sottili. Avendo calcolato le percentuali di vuoti presenti nelle varie sezioni sottili alla microscala (vedi cap. 5), si è deciso di utilizzare come grandezza microstrutturale rappresentativa della roccia la stessa percentuale di vuoti delle sezioni sottili analizzate.

Di seguito (fig. 6.6) si riporta un esempio di correlazione logaritmica tra le due grandezze mediate per ciascun litotipo. La scelta di effettuare la correlazione sulla base delle differenti tipologie è stata effettuata per permettere un adeguato confronto con i valori del parametro  $m_i$  ricavati da letteratura, forniti per l'appunto per le diverse tipologie.



**Fig. 6.6: esempio di correlazione tra la % di vuoti alla microscala e il parametro  $m_i$  del criterio di Hoek-Brown calcolato sulla base dei risultati di prove alla mesoscala**

Ricavata la relazione tra le due grandezze, risulta quindi possibile stimare un nuovo parametro  $m_i$  sulla base delle sole caratteristiche petrografiche e microstrutturali ricavati dalle sezioni sottili, utile soprattutto nel caso in cui non si hanno a disposizione i risultati delle prove. Di seguito si riporta l'elenco dei parametri così stimati, posti a confronto con gli stessi ricavati sulla base della letteratura (tab. 6.8).

| Litotipo | Sezione sottile | Progressiva [m] | $m_i$ _micro | $m_i$ _lett |
|----------|-----------------|-----------------|--------------|-------------|
| T        | GBI44           | 11575           | 9            | 25          |
| T        | GBI43           | 11610           | 7            | 25          |
| T        | GBI45           | 11633           | 9            | 25          |
| TM       | GBI47           | 11735           | 7            | 25          |
| TM       | GBI48           | 11735           | 7            | 25          |
| TM       | GBI46           | 11747           | 9            | 25          |
| SF       | GBI53           | 11760           | 7            | 20          |
| SF       | S730            | 11762           | 7            | 20          |
| SF       | S752            | 11784           | 8            | 20          |
| SF       | GBI54           | 11791           | 11           | 20          |
| PQ       | GBI49           | 11795           | 11           | 20          |
| PQ       | GBI50           | 11801           | 9            | 20          |
| PQ       | GBI51           | 11809           | 9            | 20          |
| PQ       | 11810           | 11810           | 11           | 20          |

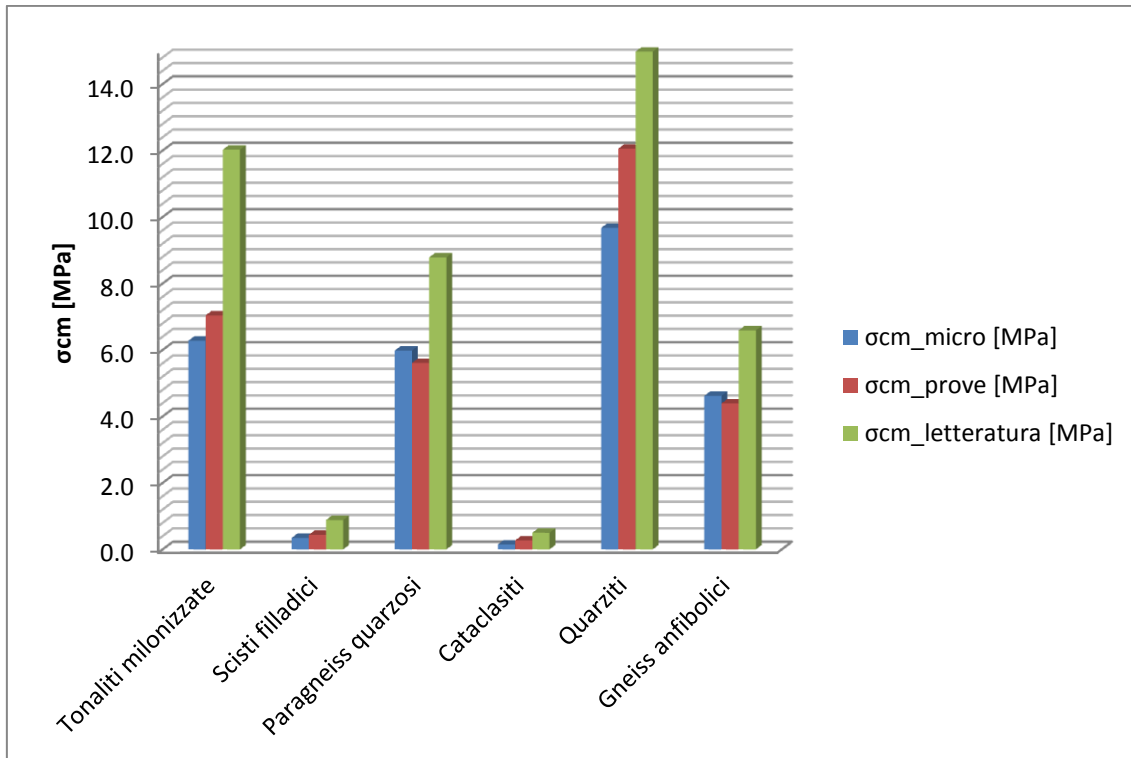
|    |       |       |    |    |
|----|-------|-------|----|----|
| C  | GBI56 | 11812 | 8  | 20 |
| C  | GBI57 | 11816 | 5  | 20 |
| C  | S789  | 11821 | 6  | 20 |
| C  | GBI58 | 11822 | 6  | 20 |
| SF | 11838 | 11838 | 6  | 20 |
| SF | S7113 | 11845 | 13 | 20 |
| PQ | S7178 | 11910 | 10 | 20 |
| C  | 11952 | 11952 | 8  | 20 |
| C  | S7220 | 11952 | 7  | 20 |
| C  | 11973 | 11973 | 6  | 20 |
| PQ | 11980 | 11980 | 7  | 20 |
| Q  | S7269 | 12001 | 9  | 20 |
| Q  | S7301 | 12033 | 6  | 20 |
| Q  | S7334 | 12066 | 11 | 20 |
| GA | S7350 | 12082 | 11 | 20 |

**Tab. 6.8: parametro  $m_i$  ricavato da caratteristiche microstrutturali**

Infine, dati i nuovi parametri  $m_i$ , è stato possibile ricalcolare la resistenza a compressione degli ammassi per ciascun litotipo. Di seguito se ne riporta il confronto finale con le resistenze calcolate sulla base dei valori di  $m_i$  ricavati dalle prove e da letteratura (tab. 6.9); le differenze vengono evidenziate ancor meglio attraverso il grafico di figura 6.7.

| <b>Litotipo</b>                 | <b><math>\sigma_{cm}</math><br/>microstruttura<br/>[MPa]</b> | <b><math>\sigma_{cm}</math><br/>prove sui campioni<br/>[MPa]</b> | <b><math>\sigma_{cm}</math><br/>letteratura<br/>[MPa]</b> |
|---------------------------------|--|--|---|
| <b>Tonaliti<br/>milonizzate</b> | 6.3  | 7.0  | 12.0  |
| <b>Scisti filladici</b>         | 0.3  | 0.4  | 0.9   |
| <b>Paragneiss<br/>quarzosi</b>  | 6.0  | 5.6  | 8.8   |
| <b>Cataclasiti</b>              | 0.1  | 0.3  | 0.5   |
| <b>Quarziti</b>                 | 9.7  | 12.0   | 15.0  |
| <b>Gneiss<br/>anfibolici</b>    | 4.6  | 4.4  | 6.6   |

**Tab. 6.9: resistenze a compressione degli ammassi rocciosi a confronto**



**Fig. 6.7: confronto tra stime di resistenza alla compressione di ammasso.**

La stima di resistenza effettuata con parametri di letteratura è certamente una sovrastima della resistenza degli ammassi rocciosi reali, in quanto non tiene in considerazione delle condizioni di fratturazione ed alterazione della roccia. Utilizzare dei valori di resistenza più elevati per le scelte progettuali potrebbe essere rischioso e comprometterebbe la stabilità dei lavori di scavo. Le stime di resistenza effettuate adoperando le prove di laboratorio e le caratteristiche microstrutturali invece sono sicuramente più vicine alla realtà e quindi maggiormente affidabili ai fini progettuali.

Nella pratica, si è soliti ricorrere a valori di letteratura di tale parametro per ragioni puramente economiche e di praticità. Effettuare prove di laboratorio, infatti, richiede oltre che a costi elevati, tempistiche di attesa dei risultati spesso incompatibili con le esigenze di progettazione, nonché notevoli difficoltà di campionamento. Al contrario, utilizzare le caratteristiche microscopiche derivanti dall'analisi delle sezioni sottili e dall'utilizzo di un algoritmo come quello proposto, comporta sicuramente costi, tempi d'attesa e difficoltà di campionamento ridotti.

Pertanto, utilizzare caratteristiche alla microscala per la determinazione delle resistenze di ammasso globale, risulta essere una scelta sensata e degna di sviluppi futuri.

## Conclusioni

Obiettivo del presente lavoro di tesi è stato quello di caratterizzare da un punto di vista geomeccanico le rocce di faglia interessate dagli scavi del cunicolo esplorativo inserito nel contesto della realizzazione della Galleria di Base del Brennero, nei pressi di Val di Mules (BZ). La realizzazione di un cunicolo esplorativo si è resa necessaria dal momento che, grazie agli studi geologici previsionali, era stata messa in luce la criticità della zona da attraversare a causa della presenza di uno dei principali lineament tettonici dell'arco alpino, il Lineamento Periadriatico.

La presenza di zone di faglia lungo lo sviluppo progettuale di una struttura sotterranea è causa di significativi problemi legati alla sua realizzazione; in tali zone, gli ammassi rocciosi possono essere così fratturati da comportarsi non più come una roccia ma come un materiale sciolto. Pertanto, nella progettazione dell'opera, è necessario tenere conto della scarsa resistenza di tali materiali, nonché del potenziale rischio di infiltrazione dell'acqua sotterranea e dell'eventuale accesso alla cavità da parte di gas nocivi. Pertanto, una conoscenza approfondita delle caratteristiche tecniche di suddetti materiali risulta essere necessaria ai fini di una corretta conduzione degli scavi in avanzamento.

Per questi motivi, si è deciso di effettuare un'analisi combinata alle diverse scale delle rocce di faglia interessate dal cunicolo, nella loro tratta più critica, che si estende per circa 1 km al di sotto di val di Mules.



Dopo aver inquadrato il contesto tettonico all'ampia scala, si è passati all'analisi delle litologie interessate dall'attraversamento e nell'ordine, procedendo da Sud a Nord: Tonaliti, Scisti, Gneiss, Cataclasiti e Quarziti.

Grazie ai due sondaggi in avanzamento effettuati dalla società conducente i lavori, è stato possibile valutare un indice qualitativo rappresentativo dell'ammasso roccioso, l'RQD, che è risultato essere molto basso lungo tutta la tratta e, in alcuni tratti più critici, addirittura non valutabile poiché la roccia si presentava totalmente disgregata.

Successivamente, sono stati analizzati i risultati delle prove geotecniche di laboratorio effettuate sui campioni prelevati, e nello specifico: prova di compressione monoassiale, prova di trazione indiretta, prova di taglio diretto, Point Load Test, velocità di propagazione delle onde S e P, test di durabilità. I risultati hanno confermato quanto dedotto dagli RQD, mostrando valori di resistenza alla compressione molto bassi ed evidenziando le tratte più critiche in corrispondenza di Scisti e Cataclasiti.

Si è passati poi allo studio delle sezioni sottili, preparate presso il Laboratorio di Petrografia dell'Università degli Studi di Milano e analizzate presso il Politecnico di Milano con un apposito microscopio da petrografia. All'interno di un contesto di caratterizzazione geomeccanica di rocce interessate dai lavori di scavo, un'analisi petrografica e microstrutturale è in grado di fornire tutti quei parametri propri della tessitura del materiale che si riflettono direttamente sul comportamento meccanico e che altrimenti non sarebbero evidenziati. Dall'analisi al microscopio ottico le sezioni sottili sono risultate estremamente alterate, fratturate e con minerali costituenti la roccia difficilmente riconoscibili e identificabili.

Quale caratteristica rappresentativa della roccia alla microscala, si è deciso di utilizzare la percentuale di vuoti presente all'interno della sezione sottile. A tale scopo, è stato implementato un algoritmo in MATLAB® che fosse in grado di riconoscere i vuoti nella sezione sottile, algoritmo che è stato poi opportunamente calibrato e validato. Le misure ottenute sono state poi messe in relazione con la resistenza a compressione ottenuta dalle prove geotecniche sui campioni di roccia alle medesime progressive delle sezioni sottili, ottenendo una correlazione di tipo parabolico. All'aumentare della

percentuale di vuoti presenti nella sezione sottile, la resistenza della roccia diminuisce. Anche da questa valutazione, si è notato come la condizione peggiore fosse rappresentata dalle Cataclasiti e dagli Scisti.

Quale riscontro applicativo delle correlazioni tra le differenti scale, è stata effettuata la stima della resistenza degli ammassi rocciosi interessati dallo scavo con l'ausilio di un opportuno criterio di rottura. Il criterio di rottura adottato si basa sul calcolo di alcuni parametri empirici, uno dei quali, in particolar modo, risulta essere di difficile stima a causa della sua natura connessa alle caratteristiche petrografiche microstrutturali della roccia. Per tale motivo, si è deciso di effettuare la stima finale di resistenza, adottando dapprima dei valori di letteratura del parametro stesso (approccio comunemente adottato nella pratica professionale) e successivamente due stime di esso basate sulle prove geotecniche di laboratorio e sulle caratteristiche petrografiche alla microscala.

I risultati sono stati messi a confronto in un grafico finale il quale evidenzia come utilizzare valori di letteratura per il suddetto parametro porta, per qualsiasi litotipo, a delle sovrastime della resistenza d'ammasso. Al contrario, le stime di resistenza ricavate sulla base delle prove di laboratorio e quelle derivanti dalle caratteristiche microstrutturali, risultano essere comparabili e significativamente inferiori alla stima da letteratura.

Evidentemente, la stima di resistenza effettuata con parametri di letteratura è certamente una sovrastima della resistenza degli ammassi rocciosi reali, in quanto non tiene in considerazione delle condizioni di fratturazione ed alterazione della roccia. Utilizzare dei valori di resistenza più elevati per le scelte progettuali potrebbe essere rischioso e comprometterebbe la stabilità dei lavori di scavo. Le stime di resistenza effettuate adoperando le prove di laboratorio e le caratteristiche microstrutturali invece sono sicuramente più vicine alla realtà e quindi maggiormente affidabili ai fini progettuali.

Nella pratica, si è soliti ricorrere a valori di letteratura di tale parametro per ragioni puramente economiche e di praticità. Effettuare prove di laboratorio, infatti, richiede oltre che a costi elevati, tempistiche di attesa dei risultati spesso incompatibili con le esigenze di progettazione, nonché notevoli difficoltà di campionamento. Al contrario,

29 Aprile 2014

utilizzare le caratteristiche microscopiche derivanti dall'analisi delle sezioni sottili e dall'utilizzo di un algoritmo come quello proposto, comporta sicuramente costi, tempi d'attesa e difficoltà di campionamento ridotti.

Pertanto, utilizzare caratteristiche alla microscala per la determinazione delle resistenze di ammasso globale, risulta essere una scelta sensata e degna di sviluppi futuri.

## **Allegati**

- **Allegato 1: RQD alle varie progressive**
- **Allegato 2: Risultati delle prove geotecniche**
- **Allegato 3: Documentazione fotografica**
- **Allegato 4: Script di Matlab**
- **Allegato 5: Confronto alle diverse scale**

## ALLEGATO 1

### Indice RQD alle varie progressive

| Progressiva [m] | RQD [%] |
|-----------------|---------|
| 11732           | 86      |
| 11743           | 90      |
| 11747.8         | 86      |
| 11752.4         | 82      |
| 11757.3         | 66      |
| 11763.6         | 26      |
| 11774.2         | 22      |
| 11779.8         | 22      |
| 11785.8         | 42      |
| 11790.8         | 14      |
| 11798.7         | 18      |
| 11808.1         | 34      |
| 11814.1         | 34      |
| 11820.7         | 14      |
| 11825.7         | 58      |
| 11830.7         | 44      |
| 11835.4         | 36      |
| 11840.5         | 6       |
| 11849           | 38      |
| 11855           | 14      |
| 11861.3         | 38      |
| 11868.8         | 22      |
| 11874.9         | 14      |
| 11879.9         | 14      |
| 11890.5         | 46      |
| 11895.7         | 20      |
| 11902.5         | 38      |
| 11907.6         | 54      |
| 11912.6         | 50      |
| 11917.8         | 30      |
| 11923.7         | 62      |
| 11928.5         | 58      |
| 11933.8         | 38      |
| 11938.7         | 80      |
| 11945.9         | 10      |
| 11955.1         | 14      |



29 Aprile 2014

|         |    |
|---------|----|
| 11965.4 | 18 |
| 11975.8 | 18 |
| 11980.6 | 22 |
| 11985.5 | 30 |
| 11991.5 | 18 |
| 11997.8 | 54 |
| 12002.2 | 66 |
| 12006.4 | 62 |
| 12011.2 | 66 |
| 12015.5 | 62 |
| 12020   | 58 |
| 12024.8 | 42 |
| 12029.1 | 50 |
| 12033.5 | 42 |
| 12038.2 | 46 |
| 12042.3 | 30 |
| 12047.1 | 26 |

## ALLEGATO 2

### Risultati delle prove geotecniche

#### Prova di compressione monoassiale

| Progressiva [m] | Litotipo | $\sigma_0$ [Mpa] | Classificazione |
|-----------------|----------|------------------|-----------------|
| 11574.80        | TD       | 44.58            | bassa           |
| 11575.00        | TD       | 59.91            | media           |
| 11575.90        | TD       | 9.79             | molto bassa     |
| 11576.60        | TD       | 59.69            | media           |
| 11628.00        | TD       | 51.74            | media           |
| 11631.00        | TD       | 80.25            | media           |
| 11628.50        | TD       | 77.75            | media           |
| 11630.00        | TD       | 46.94            | bassa           |
| 11645.00        | TD       | 81.92            | media           |
| 11645.50        | TD       | 33.91            | bassa           |
| 11733.00        | TD       | 30.60            | bassa           |
| 11736.00        | TD       | 25.82            | bassa           |
| 11737.60        | TD       | 33.05            | bassa           |
| 11741.90        | TD       | 61.27            | media           |
| 11742.30        | TD       | 14.80            | molto bassa     |
| 11742.40        | TD       | 63.92            | media           |
| 11745.30        | TD       | 79.77            | media           |
| 11746.40        | TD       | 69.02            | media           |
| 11747.50        | TD       | 70.60            | media           |
| 11748.50        | TD       | 34.70            | bassa           |
| 11749.50        | TD       | 49.15            | bassa           |
| 11750.50        | TD       | 44.78            | bassa           |
| 11751.00        | TD       | 87.27            | media           |
| 11752.00        | TD       | 76.33            | media           |
| 11753.10        | TD       | 53.29            | media           |
| 11754.40        | TD       | 63.44            | media           |
| 11755.00        | TD       | 35.45            | bassa           |
| 11755.80        | TD       | 28.36            | bassa           |
| 11756.00        | TD       | 27.84            | bassa           |
| 11760.50        | SF       | 2.12             | molto bassa     |
| 11760.60        | SF       | 3.25             | molto bassa     |
| 11768.00        | SF       | 3.23             | molto bassa     |
| 11775.00        | PQ       | 53.81            | media           |
| 11777.00        | PQ       | 57.57            | media           |
| 11777.90        | PQ       | 21.62            | molto bassa     |

29 Aprile 2014

|          |    |       |             |
|----------|----|-------|-------------|
| 11778.50 | PQ | 75.73 | media       |
| 11779.00 | PQ | 81.87 | media       |
| 11779.30 | PQ | 78.14 | media       |
| 11785.20 | SF | 28.71 | bassa       |
| 11786.50 | PQ | 59.59 | media       |
| 11786.80 | PQ | 75.63 | media       |
| 11787.20 | SF | 3.21  | molto bassa |
| 11788.10 | PQ | 45.78 | bassa       |
| 11788.30 | PQ | 33.19 | bassa       |
| 11788.60 | PQ | 81.87 | media       |
| 11795.30 | G  | 94.13 | media       |
| 11805.40 | G  | 10.54 | molto bassa |
| 11805.70 | G  | 29.14 | bassa       |
| 11806.90 | SF | 10.25 | molto bassa |
| 11807.70 | G  | 14.02 | molto bassa |
| 11808.00 | SF | 10.24 | molto bassa |
| 11809.00 | PQ | 42.74 | bassa       |
| 11809.40 | G  | 5.89  | molto bassa |
| 11812.10 | C  | 1.90  | molto bassa |
| 11812.50 | PQ | 29.35 | bassa       |
| 11812.70 | C  | 4.50  | molto bassa |
| 11813.40 | SF | 1.02  | molto bassa |
| 11813.55 | SF | 2.27  | molto bassa |
| 11814.10 | SF | 2.14  | molto bassa |
| 11814.80 | C  | 13.22 | molto bassa |
| 11815.25 | C  | 16.73 | molto bassa |
| 11815.70 | C  | 3.09  | molto bassa |
| 11821.80 | C  | 0.55  | molto bassa |
| 11822.00 | C  | 1.53  | molto bassa |
| 11824.50 | C  | 1.49  | molto bassa |
| 11826.90 | C  | 22.90 | molto bassa |
| 11829.00 | C  | 1.96  | molto bassa |
| 11830.40 | SF | 5.46  | molto bassa |
| 11830.90 | SF | 9.76  | molto bassa |
| 11831.70 | PQ | 17.93 | molto bassa |
| 11832.40 | PQ | 17.77 | molto bassa |
| 11832.60 | PQ | 30.67 | bassa       |
| 11832.90 | PQ | 30.61 | bassa       |
| 11835.80 | C  | 2.62  | molto bassa |
| 11848.70 | PQ | 39.41 | bassa       |
| 11850.10 | PQ | 99.60 | media       |
| 11852.90 | PQ | 46.18 | bassa       |
| 11861.10 | SF | 2.71  | molto bassa |

29 Aprile 2014

|          |    |        |             |
|----------|----|--------|-------------|
| 11865.90 | SF | 3.96   | molto bassa |
| 11870.50 | PQ | 30.67  | bassa       |
| 11875.40 | PQ | 24.37  | molto bassa |
| 11880.70 | PQ | 6.31   | molto bassa |
| 11891.70 | SF | 13.31  | molto bassa |
| 11893.50 | PQ | 125.26 | alta        |
| 11894.70 | PQ | 13.00  | molto bassa |
| 11906.30 | PQ | 45.43  | bassa       |
| 11909.20 | PQ | 75.64  | media       |
| 11911.30 | PQ | 39.58  | bassa       |
| 11912.10 | PQ | 67.32  | media       |
| 11922.10 | SF | 4.16   | molto bassa |
| 11926.20 | SF | 7.68   | molto bassa |
| 11929.30 | PQ | 21.95  | molto bassa |
| 11928.60 | PQ | 17.21  | molto bassa |
| 11931.80 | PQ | 9.95   | molto bassa |
| 11937.20 | SF | 6.44   | molto bassa |
| 11938.40 | PQ | 9.31   | molto bassa |
| 11951.70 | C  | 2.32   | molto bassa |
| 11958.50 | C  | 2.76   | molto bassa |
| 11969.60 | C  | 3.25   | molto bassa |
| 11978.80 | PQ | 17.50  | molto bassa |
| 11981.50 | PQ | 73.54  | media       |
| 11985.20 | PQ | 33.04  | bassa       |
| 12001.00 | Q  | 33.34  | bassa       |
| 12001.33 | Q  | 25.39  | bassa       |
| 12003.00 | Q  | 66.57  | media       |
| 12006.70 | Q  | 68.21  | media       |
| 12009.90 | Q  | 36.07  | bassa       |
| 12015.60 | Q  | 51.30  | media       |
| 12019.90 | Q  | 67.92  | media       |
| 12029.70 | Q  | 64.67  | media       |
| 12036.30 | Q  | 25.88  | bassa       |
| 12040.30 | Q  | 78.17  | media       |
| 12052.50 | Q  | 126.22 | alta        |
| 12052.70 | Q  | 110.18 | alta        |
| 12059.50 | Q  | 47.11  | bassa       |
| 12062.00 | Q  | 45.51  | bassa       |
| 12068.30 | GA | 51.58  | media       |
| 12072.20 | GA | 24.78  | molto bassa |
| 12075.10 | GA | 31.68  | bassa       |
| 12080.70 | GA | 33.28  | bassa       |
| 12082.20 | GA | 43.82  | bassa       |

**Prova di trazione indiretta**

| <b>Progressiva [m]</b> | <b>T [MPa]</b> | <b>Litotipo</b> |
|------------------------|----------------|-----------------|
| 11569.60               | 5.47           | T               |
| 11575.60               | 4.91           | T               |
| 11575.90               | 3.25           | T               |
| 11628.50               | 11.60          | T               |
| 11630.40               | 11.38          | T               |
| 11630.50               | 9.37           | T               |
| 11632.50               | 10.96          | T               |
| 11645.40               | 6.02           | T               |
| 11732.30               | 10.07          | T               |
| 11733.00               | 9.50           | T               |
| 11736.00               | 6.72           | T               |
| 11737.20               | 8.40           | T               |
| 11742.40               | 9.05           | T               |
| 11742.70               | 4.14           | T               |
| 11746.00               | 1.98           | T               |
| 11748.00               | 7.32           | T               |
| 11750.00               | 1.12           | T               |
| 11753.00               | 6.86           | T               |
| 11755.00               | 2.32           | T               |
| 11755.80               | 4.27           | T               |
| 11756.00               | 1.27           | T               |
| 11760.30               | 0.17           | S               |
| 11762.20               | 0.18           | S               |
| 11766.00               | 0.66           | S               |
| 11768.00               | 0.68           | S               |
| 11773.00               | 3.78           | G               |
| 11779.00               | 6.16           | G               |
| 11779.20               | 1.44           | S               |
| 11780.00               | 1.69           | S               |

29 Aprile 2014

|          |      |   |
|----------|------|---|
| 11781.00 | 1.75 | S |
| 11785.30 | 2.45 | S |
| 11787.00 | 4.36 | G |
| 11795.60 | 1.55 | G |
| 11795.70 | 8.85 | G |
| 11795.80 | 4.62 | G |
| 11795.90 | 3.55 | G |
| 11805.00 | 5.70 | G |
| 11805.30 | 3.01 | G |
| 11805.90 | 7.28 | G |
| 11806.00 | 2.44 | S |
| 11808.90 | 4.34 | G |
| 11809.00 | 7.09 | G |
| 11809.20 | 2.70 | G |
| 11812.90 | 0.11 | C |
| 11814.50 | 0.46 | C |
| 11815.25 | 0.78 | C |
| 11815.50 | 0.63 | C |
| 11821.00 | 0.20 | C |
| 11823.60 | 0.27 | C |
| 11825.20 | 0.54 | C |
| 11828.60 | 2.14 | S |
| 11829.00 | 0.16 | C |
| 11834.90 | 0.29 | C |
| 11837.10 | 3.02 | G |
| 11844.00 | 5.28 | S |
| 11848.00 | 1.66 | G |
| 11850.00 | 3.32 | G |
| 11852.50 | 0.32 | S |
| 11856.00 | 2.14 | G |
| 11867.30 | 0.65 | S |
| 11875.40 | 1.64 | G |



29 Aprile 2014

|          |       |    |
|----------|-------|----|
| 11878.90 | 4.07  | G  |
| 11891.40 | 0.61  | S  |
| 11901.70 | 2.03  | G  |
| 11906.60 | 8.23  | G  |
| 11911.70 | 9.32  | G  |
| 11922.40 | 0.53  | S  |
| 11928.60 | 3.71  | G  |
| 11932.50 | 1.30  | G  |
| 11939.50 | 0.47  | S  |
| 11941.00 | 0.26  | S  |
| 11949.50 | 2.11  | C  |
| 11949.70 | 0.59  | C  |
| 11951.70 | 0.21  | C  |
| 11979.30 | 4.79  | G  |
| 11981.50 | 5.45  | G  |
| 12001.40 | 2.26  | Q  |
| 12009.60 | 1.13  | Q  |
| 12015.60 | 6.46  | Q  |
| 12023.00 | 0.78  | Q  |
| 12029.70 | 4.33  | Q  |
| 12036.50 | 0.76  | Q  |
| 12040.00 | 1.40  | Q  |
| 12049.00 | 10.35 | Q  |
| 12060.50 | 4.53  | Q  |
| 12072.50 | 3.69  | GA |
| 12074.20 | 4.66  | GA |
| 12079.20 | 2.18  | GA |

**Point Load Test**

| <b>Progressiva [m]</b> | <b>Is50 [MPa]</b> | <b>Litotipo</b> |
|------------------------|-------------------|-----------------|
| 11574.00               | 4.86              | T               |
| 11574.10               | 3.07              | T               |
| 11574.20               | 5.42              | T               |
| 11575.00               | 2.61              | T               |
| 11576.00               | 5.51              | T               |
| 11576.10               | 2.91              | T               |
| 11576.20               | 2.00              | T               |
| 11630.60               | 3.60              | T               |
| 11630.70               | 1.55              | T               |
| 11631.00               | 5.25              | T               |
| 11632.00               | 0.94              | T               |
| 11632.20               | 0.73              | T               |
| 11645.00               | 6.33              | T               |
| 11732.70               | 1.73              | T               |
| 11732.80               | 0.26              | T               |
| 11732.90               | 1.26              | T               |
| 11737.30               | 2.94              | T               |
| 11737.40               | 2.71              | T               |
| 11737.50               | 1.34              | T               |
| 11738.30               | 3.12              | T               |
| 11742.70               | 1.50              | T               |
| 11743.80               | 2.74              | T               |
| 11753.00               | 1.81              | T               |
| 11755.80               | 2.76              | T               |
| 11755.90               | 1.77              | T               |
| 11756.00               | 0.78              | T               |
| 11758.40               | 1.09              | T               |
| 11758.50               | 0.69              | T               |
| 11758.60               | 0.27              | T               |
| 11760.00               | 0.37              | S               |
| 11762.00               | 0.39              | S               |
| 11762.20               | 0.76              | S               |
| 11779.50               | 0.79              | S               |
| 11781.00               | 0.10              | S               |
| 11781.30               | 0.24              | S               |
| 11783.00               | 0.51              | S               |
| 11783.20               | 0.70              | S               |
| 11785.30               | 1.31              | S               |
| 11787.30               | 0.34              | S               |

29 Aprile 2014

|          |      |   |
|----------|------|---|
| 11802.00 | 0.37 | G |
| 11802.10 | 2.92 | G |
| 11802.30 | 2.18 | G |
| 11802.40 | 0.62 | G |
| 11802.50 | 0.67 | G |
| 11805.90 | 3.42 | G |
| 11806.00 | 0.70 | G |
| 11806.10 | 0.35 | G |
| 11807.00 | 1.51 | G |
| 11812.10 | 0.33 | C |
| 11815.10 | 0.10 | C |
| 11815.50 | 0.10 | C |
| 11815.70 | 0.03 | C |
| 11815.90 | 0.10 | C |
| 11816.00 | 0.03 | C |
| 11816.20 | 0.10 | C |
| 11816.40 | 0.36 | C |
| 11822.80 | 0.05 | C |

### Velocità di propagazione onde P e S

| Progressiva [m] | Vp [m/s] | Vs [m/s] | litotipo |
|-----------------|----------|----------|----------|
| 11574.8         | 4096.7   | 2383.1   | T        |
| 11575           | 3203.6   | 1904.7   | T        |
| 11575.6         | 4078.3   | np       | T        |
| 11576.6         | 3803.5   | 2115.8   | T        |
| 11628           | 3914.2   | 2194     | T        |
| 11630           | 4217.3   | 2268     | T        |
| 11631           | 4219.1   | 2445.4   | T        |
| 11645           | 3751     | 2197.7   | T        |
| 11645.5         | 3930.4   | 2197.7   | T        |
| 11733           | 3926.9   | 2352     | T        |
| 11736           | 4297.1   | 2252.9   | T        |
| 11737.6         | 4057.6   | 2173.7   | T        |
| 11741.9         | 4167.7   | 2476     | T        |
| 11742.3         | 4177     | 2212.2   | T        |
| 11742.4         | 4742     | 2772.7   | T        |
| 11745           | 3985.1   | 2409.7   | T        |
| 11746.4         | 3767.5   | 2114.8   | T        |
| 11751           | 3797.7   | 2536.7   | T        |

29 Aprile 2014

|          |        |        |    |
|----------|--------|--------|----|
| 11753.1  | 4085.4 | 2397.1 | T  |
| 11755.8  | 3242.6 | 1943.6 | T  |
| 11756    | 3168.2 | 1953.1 | T  |
| 11760.3  | 1660.8 | 930.4  | S  |
| 11779    | 2528.8 | 1543.3 | G  |
| 11785.2  | 1458.7 | 940    | S  |
| 11795.3  | 4275.9 | 2638.3 | G  |
| 11805.4  | 3750.7 | 1991.2 | G  |
| 11805.7  | 3045.7 | 1789.5 | G  |
| 11807.7  | 2899.1 | 1805.6 | G  |
| 11809    | 3303.9 | 1826   | G  |
| 11809.4  | 3489.1 | 1945.5 | G  |
| 11812.1  | 1616.5 | NP     | C  |
| 11812.7  | 1561.4 | NP     | C  |
| 11813.4  | 1894.5 | 953.5  | S  |
| 11814.8  | 1868.8 | 990.8  | C  |
| 11815.25 | 1802.3 | 1002.4 | C  |
| 11815.7  | 1382   | NP     | C  |
| 11821.8  | 1018.8 | NP     | C  |
| 11832.9  | 4941.7 | 2556   | G  |
| 11850.1  | 3100   | 1977.5 | G  |
| 11852.9  | 2835   | 1514.9 | G  |
| 11870.5  | 1695.4 | 1043.6 | G  |
| 11894.7  | 1860.2 | 1100.7 | G  |
| 11909.2  | 3210.5 | 2103.4 | G  |
| 11912.1  | 3016.5 | 1975.4 | G  |
| 11928.3  | 3803.7 | 2190.8 | G  |
| 11937.2  | 1984.6 | 1005.4 | S  |
| 11951.7  | 2419   | NP     | C  |
| 12001    | 2382.4 | 1442.1 | Q  |
| 12006.7  | 3379.3 | 2169.7 | Q  |
| 12029.7  | 4155.6 | 2404.2 | Q  |
| 12040.3  | 3400.5 | 2218   | Q  |
| 12052.5  | 4988.1 | 2874.7 | Q  |
| 12068.3  | 4588.7 | 2609.4 | GA |
| 12082    | 5889.5 | 3079   | GA |

## Slake Durability Test

| Progressiva [m] | ID1 [%] | ID2 [%] | Litotipo | Grado di Durabilità |
|-----------------|---------|---------|----------|---------------------|
| 11732.70        | 99.20   | 98.80   | T        | molto alta          |
| 11736.00        | 99.00   | 98.80   | T        | alta                |
| 11742.70        | 98.50   | 96.20   | T        | alta                |
| 11755.00        | 98.90   | 98.60   | T        | alta                |
| 11758.60        | 96.50   | 88.80   | T        | medio alta          |
| 11760.30        | 81.60   | 74.80   | S        | bassa               |
| 11762.20        | 82.40   | 75.00   | S        | bassa               |
| 11763.30        | 89.70   | 83.80   | S        | media               |
| 11773.70        | 89.20   | 84.40   | S        | media               |
| 11775.00        | 98.80   | 97.90   | S        | alta                |
| 11779.20        | 81.10   | 70.00   | S        | bassa               |
| 11780.20        | 92.90   | 89.70   | S        | media               |
| 11781.20        | 79.00   | 78.10   | S        | bassa               |
| 11782.30        | 88.70   | 83.50   | S        | media               |
| 11783.30        | 89.30   | 84.90   | S        | media               |
| 11784.30        | 94.00   | 90.30   | S        | media               |
| 11785.30        | 96.40   | 94.20   | S        | medio alta          |
| 11786.20        | 96.70   | 95.70   | S        | medio alta          |
| 11791.30        | 98.50   | 97.70   | S        | alta                |
| 11792.30        | 98.10   | 96.70   | S        | alta                |
| 11812.10        | 56.40   | 46.80   | C        | molto bassa         |
| 11814.10        | 63.80   | 53.20   | C        | bassa               |
| 11815.50        | 67.10   | 59.30   | C        | bassa               |
| 11816.40        | 65.00   | 56.80   | C        | bassa               |
| 11818.10        | 73.00   | 63.50   | C        | bassa               |
| 11819.90        | 64.50   | 57.90   | C        | bassa               |
| 11821.00        | 52.40   | 46.40   | C        | molto bassa         |
| 11821.30        | 62.40   | 54.70   | C        | bassa               |
| 11829.00        | 73.00   | 65.30   | C        | bassa               |

## ALLEGATO 3 – Documentazione fotografica

Vedi album fotografico

## ALLEGATO 4 – Script Matlab

```
clear;
close all;

Bth=40;
Wth=190;
Numfilt=12;
Conn=4;

filenameA={'11+810a S7 300.tif';'11+952a S7 219.tif';'GBI51a S6
303.tif';'GBI53a S6 254.tif';'GBI56a S6 306.tif';'GBI57a S6
310.tif';'GBI58a S6 316.tif';'S7 89a.tif';'11+838a S6
328.tif';'11+973a S7 240.tif';'11+980a S7 248.tif';'GBI43a S6
104.tif';'GBI44a S6 69.tif';'GBI45a S6 127.tif';'GBI46a S6
241.tif';'GBI47a S6 229.tif';'GBI48a S6 229.tif';'GBI49a S6
289.tif';'GBI50a S6 295.tif';'GBI52a S6 277.tif';'GBI54a S6
285.tif';'S7 30a.tif';'S7 52a.tif';'S7 113a.tif';'S7 178a.tif';'S7
220a.tif';'S7 269a.tif';'S7 301 a.tif';'S7 334a.tif';'S7 350a.tif';};
filenameB={'11+810b S7 300.tif';'11+952b S7 219.tif';'GBI51b S6
303.tif';'GBI53b S6 254.tif';'GBI56b S6 306.tif';'GBI57b S6
310.tif';'GBI58b S6 316.tif';'S7 89b.tif';'11+838b S6
328.tif';'11+973b S7 240.tif';'11+980b S7 248.tif';'GBI43b S6
104.tif';'GBI44b S6 69.tif';'GBI45b S6 127.tif';'GBI46b S6
241.tif';'GBI47b S6 229.tif';'GBI48b S6 229.tif';'GBI49b S6
289.tif';'GBI50b S6 295.tif';'GBI52b S6 277.tif';'GBI54b S6
285.tif';'S7 30b.tif';'S7 52b.tif';'S7 113b.tif';'S7 178b.tif';'S7
220b.tif';'S7 269b.tif';'S7 301b.tif';'S7 334b.tif';'S7 350b.tif';};

Nfile=length(filenameA);

for i=1:Nfile
    B=ProcessImages_B_GrayScale(filenameB{i},Bth);
    W=ProcessImages_W_GrayScale(filenameA{i},Wth);
    BW=B.*W;
    BW=BW(200:900,50:900);
    K=find(BW==1);
    Perc=100*length(K)/numel(BW);
    disp(['percentuale=',num2str(Perc)])
    figure;
    imshow(BW);
    title(['percentuale=',num2str(Perc)])
    saveas(gcf,[filenameA{i}(1:end-
4), '_Bth',num2str(Bth), '_Wth',num2str(Wth), '_PreElab.png'])
    BW2=bwareaopen(BW,Numfilt,Conn);
    K=find(BW2==1);
    Perc2=100*length(K)/numel(BW2);
    figure;
    imshow(BW2);
    title(['percentuale=',num2str(Perc2)])
```



```

        saveas(gcf,[filenameA{i}(1:end-
4), '_Bth', num2str(Bth), '_Wth', num2str(Wth), '_PostElab.png'])
        close all
end

```

### Funzione "Process Images"

```

function B=ProcessImages_B_GrayScale(filename,Bth)

% set the threshold for white pixels
%Bth=40;

% read the original image in RGB component
Aorig=imread(filename);

% convert from RGB to grayscale
A=rgb2gray(Aorig);

% get the dimension of the picture
[r,c]=size(A);

% check if all the pixels are higher or lower than the threshold: the
% output is a matrix of 1 and 0
B1=(A<=Bth);

% initialize the output matrix to 0
B=zeros(r,c);

% look for the pixels with 1
I=find(B1==1);

% set 1 where the pixels of B1 are equal to 1
B(I)=1;

% plot the original image using imagesc to reduce the dimension on the
% screen
figure
imagesc(Aorig);
title(['Original ',filename,' image'])

% plot the output image with identified pixels to reduce the dimension
on the
% screen
figure
imagesc(B);
colormap(gray)
title(['Black pixels (B_{th} = ',num2str(Bth),')'])

end

```

**ALLEGATO 5 – COMPARAZIONE ALLE DIVERSE SCALE**

| Distance (m) | Photo | RQD (%) | GSI | $\sigma$ (MPa) | Thin section | Voids ratio (%) | Voids distribution |
|--------------|-------|---------|-----|----------------|--------------|-----------------|--------------------|
| 69           |       | 100     | 66  | 54.73          |              | 0.54            |                    |
| 127          |       | 100     | 72  | 64.17          |              | 0.69            |                    |
| 240          |       | 100     | 56  | 69.02          |              | 0.61            |                    |
| 255          |       | 80      | 56  | 3.25           |              | 3.33            |                    |
| 288          |       | 20      | 34  | 94.13          |              | 0.11            |                    |
| 298          |       | 20      | 34  | 10.25          |              | 0.46            |                    |
| 305          |       | 40      | 34  | 1.9            |              | 1.37            |                    |
| 310          |       | 40      | 34  | 2.14           |              | 11.57           |                    |
| 316          |       | 0       | 34  | 0.55           |              | 7.43            |                    |
| 329          |       | 40      | 41  | 2.62           |              | 4.94            |                    |
| 342          |       | 40      | 41  | 69.51          |              | 0.02            |                    |
| 403          |       | 60      | 35  | 75.64          |              | 0.32            |                    |
| 445          |       | 20      | 50  | 2.32           |              | 1.59            |                    |
| 462          |       | 20      | 48  | 3.25           |              | 4.56            |                    |
| 530          |       | 60      | 54  | 25.88          |              | 3.69            |                    |
| 562          |       | 20      | 62  | 51.98          |              | 0.15            |                    |

## Bibliografia

- BBT SE, *Schede di Progetto: Galleria di Base del Brennero*, 2010 – 2014.
- Bistacchi A., Dal Piaz G., Massironi M., *Geological outline of the Alps*, pp. 175 – 180, 2003.
- Cancelli A., Canuti P., Civita M., Francani V., Genevois R., Pellegrini M., Tazioli G., Zavatti A., *Quaderni di Geologia Applicata Vol. 2*, in AA.VV (a cura di), *Quaderni di Tecniche di Protezione Ambientale*, Bologna, Pitagora Editrice, 2003.
- Conti P., Ferranti L., Oldow S. P., *Active fragmentation of Adria, the North African promontori, central mediterranean orogen*, *Geology*, pp. 779 – 782, 2002.
- Deere D.U., Deere D.W. *The Rock Quality Designation index in practice*, Symposium on Rock Classification Systems for Engineering Purposes, Cincinnati, Ohio, USA 1987.
- Dal Piaz G., *History of tectonic interpretations of the Alps*, *Journal of Geodynamics*, Elsevier, 2003.
- Da Mommio A., *Portale di Petrografia online*, 2007.
- Di Fiore G., *Evoluzione morfotettonica delle aree alpine “Sempione” e “Brennero” attraverso studi termocronologici di bassa temperatura*, Dottorato di Ricerca in Scienze della Terra XIV Ciclo, Dipartimento di Scienze della Terra, Bologna, 2011.

- Gattinoni P., Pizzarotti E., Scattolini E., Scesi L., *Stabilità dei pendii e dei fronti di scavo in roccia*, PEI Edizioni, Parma, 2011.
- International Society of Rock Mechanics, *Raccomandazioni sulle prove geotecniche di laboratorio*, Associazione Geotecnica Italiana, 1994.
- International Society of Rock Mechanics, *Metodi suggeriti per la descrizione petrografica delle rocce*, Associazione Geotecnica Italiana, 2001.
- Kissling E., Schmid S. M., *The arc of Western Alps in the light of geophysical data on deep crustal structure*, *Tectonics*, pp. 62-85, 2000.
- Lucian C., Wangwe E. M., *The Usefulness of Rock Quality Designation (RQD) in determining the Strength of the Rock*, *International Referred Journal of Engineering and Science (IRJES)*, vol. 2, issue 9, pp. 36-40, 2013.
- Muller K., *The Alpine evolution of the Southern Alps around the Giudicarie faults: a late Cretaceous to Early Eocene transfer zone*, *Tectonophysics*, Elsevier, 2006.
- Passchier C. W., Trouw R. A. J., *Microtectonics*, Springer, 2005.
- Pomella H., Scholger U., Stipp M., *The Northern Giudicarie and the Meran-Mauls fault in the light of new paleomagnetic and geochronological data from boudinaged Oligocene tonalities*, *International Journal of Earth Sciences*, pp. 1827 – 1850, 2011.
- Ramsay J. G., Huber M. I., *The techniques of modern structural geology*, Vol. 1: *Strain Analysis*, 1984.

29 Aprile 2014

- Selverstone J., *Evidence for eastwest crustal extension in the Eastern Alps: implications for the unroofing history of the Tauern window* Tectonics vol. 7, pp. 87-105, 2000.
- Sibson R. H., *Fault rocks and fault mechanics*, Jour. Geol. Soc., vol. 133, pp. 191-213, Great Britain, 1977.
- Vallejo G., *Geoingegneria*, Pearson, 2004.

