

Marmi s.r.l.

Via Alfio Maggiani 143 – CARRARA (MS)

CAVA FOSSA dei TOMEI

COMUNE DI VAGLI SOTTO (LU)

**PROGETTO DI COLTIVAZIONE DELLA CAVA FOSSA dei TOMEI ai
sensi della LR 35/15 e smi, RICHIESTA DI Autorizzazione
all'esercizio dell'attività estrattiva, Pronuncia di Compatibilità
Ambientale Pronuncia di Valutazione di Incidenza
Nulla osta**

ANALISI DELLE CARATTERISTICHE DEL LUOGO D'INTERVENTO

Studio geologico, geomorfologico, idrogeologico e geostrutturale

luglio 2026

Dott. Geol. Emanuele Sirgiovanni
Ordine Geologi Toscana n°654

PhD Geol. Luca Vaselli
Ordine Geologi Toscana n°1714

La Ditta
Marmi s.r.l.
Il Legale Rappresentante

1 - ASSETTO GEOGRAFICO, GEOLOGICO-GEOMORFOLOGICO, STRUTTURALE E GIACIMENTOLOGICO

Per quanto riguarda la ricostruzione dell'assetto geografico, geologico-geomorfologico e giacimentologico, si fa largamente riferimento agli studi di carattere geologico eseguiti di supporto al PABE Monte Pallerina.

1.1 - INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DELL'AREA IN ESAME

Il bacino estrattivo Monte Pallerina si sviluppa nel versante destro della valle di Arnetola. La valle è orientata in direzione circa Nord – Sud e il fondovalle è a circa 900 m slm. E' delimitata ad Ovest dal ripido e scosceso versante che unisce da Sud a Nord le cime del M. Macina (1566 m), del M. Sella (1739 m), M. Tambura (1895 m) e del M. Roccandagia (1717 m). Ad Est dal versante compreso tra il M. Pallerina (1248 m) e il M. Croce (1527 m). Verso Sud è chiusa dall'ampio circolo che corre tra il M. Fiocca (1709 m) e il M. Sella (1739 m) mentre verso Nord la valle si apre sull'abitato di Vagli di Sopra e sulla valle dell'Edron.

L'antica via Vandelli che collegava Modena con Massa attraversa questa valle e si inerpica nel versante sinistro fino a superare il crinale attraverso il Passo della Tambura.

1.2 – INQUADRAMENTO GEOMORFOLOGICO

1.2.1 – FORME E PROCESSI DERIVANTI DA ATTIVITÀ' GLACIALE E FLUVIALE

Forme morfologiche glaciali nella valle di Arnetola e nel bacino estrattivo di Pallerina

La valle di Arnetola è una ampia valle glaciale dove l'azione modellatrice dei ghiacciai ha impresso la tipica forma a "U". Morfologie riconducibili all'azione dei ghiacci sono individuabili nel tratto pianeggiante presente sul fondovalle, subito all'ingresso della valle, formatosi in seguito al riempimento di un piccolo lago di circolo che si è creato al momento del ritiro dei ghiacci. Probabilmente anche alcuni rilievi di forma tondeggiante che chiudono a Sud il tratto pianeggiante del fondovalle devono la loro forma all'azione dei ghiacci. Mancano, invece, i depositi e i cordoni morenici presenti subito all'uscita della valle di Arnetola, sui quali è costruito gran parte dell'abitato di Vagli di Sopra, e nel circolo glaciale di Campo Catino, alle pendici del M. Roccandagia.

Per quanto riguarda in particolare il bacino estrattivo di Colubraia al suo interno non sono presenti forme morfologiche riconducibili all'azione modellatrice dei ghiacci.

Forme morfologiche fluviali nella valle di Arnetola e nel bacino estrattivo di Pallerina

Gli estesi affioramenti di rocce carbonatiche non hanno consentito lo sviluppo di una rete idrica superficiale di una certa consistenza, fatta eccezione per la parte Sud della valle dove la presenza di rocce più impermeabili (cipollini e scisti sericitici) hanno permesso lo sviluppo di una rete di fossi che scendono dalle pendici del M. Fiocca e del Passo di Sella, con portate molto variabili nell'arco dell'anno, considerata la limitata estensione dei loro bacini di alimentazione. Tutti gli impluvi e i fossi che scendono dai versanti convergono a formare il Fosso Tambura che scorre nel fondovalle di Arnetola. Pur essendo la valle di Arnetola caratterizzata da una elevata piovosità - L. Piccini et al. (1999) stimano le precipitazioni in 3200 mm/anno – tuttavia il fosso è spesso asciutto o con portate molto ridotte in occasione di eventi meteorici particolarmente intensi.

Nel bacino estrattivo di Monte Pallerina si assiste ad una netta differenziazione nello sviluppo della rete idrica superficiale tra la parte Nord del bacino e quella Sud.

Nella parte Nord gli estesi affioramenti di rocce carbonatiche, l'acclività del versante e la limitata estensione delle litologie impermeabili, presenti solo in prossimità della linea di cresta, non hanno consentito lo sviluppo di una rete idrica superficiale che è praticamente assente.

Nella parte sud gli estesi affioramenti di rocce impermeabili presenti lungo le pendici del M. Fiocca e del M. Croce, la ridotta estensione degli affioramenti di rocce carbonatiche, una morfologia del versante meno acclive rispetto alla parte Nord hanno consentito lo sviluppo di un reticolo superficiale di fossi, alcuni anche molto incisi. Il reticolo idrico presente in questa parte del bacino estrattivo presenta un andamento tortuoso nonostante le ridotte portate e la limitata estensione; probabilmente la geometria del reticolo idrico è stata fortemente condizionata dalla complessa tettonica polifasata che ha interessato la zona del Bancaio Alto e della Fossa dei Tomei.

1.2.2 – FORME E PROCESSI DERIVANTI DA FENOMENI CARSIICI

Nella valle di Arnetola, nonostante la presenza di estesi affioramenti di rocce carbonatiche e di elevati livelli di precipitazioni, l'acclività dei versanti non ha consentito lo sviluppo di forme carsiche di tipo epigeo molto estese e marcate che invece si sono sviluppate in altre parti delle Alpi Apuane come nella vicina valle di Carcaraia, nel versante occidentale del M. Tambura, o nell'altipiano della Vetricia nel massiccio delle Panie. Nella valle di Arnetola sono presenti solo modeste e rare forme epicarsiche come vaschette di corrosione, scannellature, solchi di ruscellamento e fori carsici in corrispondenza di incroci di fratture.

Il carsismo ipogeo è invece molto sviluppato e si estende ben oltre i limiti geografici della valle di Arnetola. In superficie la presenza di questo fenomeno carsico si manifesta con pozzi e inghiottitoi che rappresentano l'ingresso di cavità carsiche che si sviluppano poi in profondità. Nella valle di Arnetola risultano censite al Catasto Grotte della Regione Toscana n. 37 cavità carsiche e alcune di queste hanno più ingressi in superficie. In particolare, nel bacino estrattivo di Monte Pallerina sono censite n. 16 cavità carsiche, alcune di queste sono più ingressi di un unico condotto carsico.

1.2.3 – FORME E PROCESSI DERIVANTI DA ATTIVITÀ ANTROPICHE

Nella valle di Arnetola è con l'estrazione del marmo che l'uomo ha lasciato la sua impronta sul territorio conferendogli nel tempo quell'insieme di forme e di colori che contribuiscono a creare il "paesaggio delle cave". I fronti di cava, i piazzali, i ravaneti, modificano l'assetto naturale dei luoghi, lo caratterizzano e creano macchie di colore che solo apparentemente appaiono estranee ai colori di fondo della valle ma non sono altro che l'altra faccia del marmo, quella nascosta che il lavoro della cava ha portato alla luce.

Le strade di cava, gli edifici e le opere murarie spesso realizzate a secco con bozze di marmo, le vie di lizza, i vecchi impianti di cava (derrick, argani, resti di vecchie linee di fili elicoidale ecc.), anch'essi contribuiscono a creare il "paesaggio delle cave" e molte di queste opere sono oggi considerate "opere di archeologia industriale" da conservare a futura memoria.

Nella valle di Arnetola il bacino estrattivo di Monte Pallerina è dove è presente la maggiore concentrazione di cave e dove più marcati sono tutti gli elementi che caratterizzano il "paesaggio delle cave". Nel tempo l'attività estrattiva si è concentrata in due poli. Un certo numero di cave dismesse vale a dire cave per le quali al momento non è vigente nessun provvedimento autorizzativo (definizione di cui all'art. 17 della Disciplina del Piano – PIT con valenza di Piano Paesaggistico), sono sparse all'interno del bacino estrattivo.

Il primo polo è quello della cava Piastra Bagnata posta nella parte Nord del bacino. È il polo più importante di tutto di tutto il comune di Vagli di Sotto. La cava Piastra Bagnata è una delle più grandi cave di marmo delle Alpi Apuane. È una cava di versante posta a mezza costa nel versante occidentale del Monte Pallerina a quota compresa tra 1030 m e 1160 m slm e si sviluppa lungo un fronte di circa 680 m. A valle della cava il ravaneto, ora inattivo, arriva fino sul fondovalle occupandone una parte. Un tempo nella zona della Piastra Bagnata erano presenti varie cave che si sono via via ampliate fino a creare un'unica cava gestita ora dalla Coop. Apuana Marmi. Delle cave originarie oggi è rimasto solo il nome a distinguere i vari fronti in cui si articola la cava Piastra Bagnata.

Il secondo polo estrattivo è quello della Fossa dei Tomei posto nella parte Sud del bacino estrattivo.

Anche in questo polo un tempo erano presenti varie cave che poi espandendosi hanno fatto sì che oggi tra una cava e l'altra di fatto non ci sia più soluzione di continuità e determinando inoltre una geometria dei fronti cava molto articolata. Il ravaneto si sviluppa verso Nord occupando parti dell'affioramento marmifero ma si estende anche sui piazzali di cava.

1.3 - INQUADRAMENTO GEOLOGICO

1.3.1 – ASSETTO STRATIGRAFICO

Il Dominio Toscano Metamorfico

Unità Metamorfica delle Apuane – “Autoctono”

L’“Autoctono” Auct. (Fig. 2) è costituito da una successione di formazioni litologiche di età mesozoica e terziaria e rappresenta l’elemento geologico principale del rilievo apuano. Essa poggia su un basamento paleozoico costituito da dolomie scistose, quarziti, porfiroidi, scisti porfirici e filladi inferiori. Quest’ultima è riferibile al Cambrico – Ordoviciano ed è la formazione più antica affiorante nella zona. che rappresentano la formazione più antica in discordanza. Il basamento registra la deformazione e il metamorfismo dell’Orogenesi ercinica.

Le formazioni mesozoiche dell’“Autoctono” hanno inizio con una successione sedimentaria di ambiente continentale – marino/costiero alla quale seguono le dolomie (formazione dei “Grezzoni”) riferibili ad un ambiente deposizionale di piattaforma carbonatica. Al tetto della formazione dei “Grezzoni” la presenza di brecce poligeniche (Brecce di Seravezza) e di scisti a cloritoide testimonia episodi di emersione della piattaforma carbonatica. La successione sedimentaria riprende poi con la formazione dei Marmi dolomitici e i Marmi s.l. che rappresentano lo sviluppo di una nuova piattaforma carbonatica.

Il progressivo sprofondamento della piattaforma carbonatica dei Marmi dà luogo ad una sedimentazione di mare aperto di tipo emipelagico e pelagico che ha inizio con la formazione dei Calcari Selciferi alla quale seguono Calcescisti, Diaspri, Calcari Selciferi a Entrochi, Cipollini, Scisti Sericitici. La serie dell’“Autoctono” si conclude con le arenarie Ologoceniche dello Pseudomacigno.

Discontinuità spaziali e temporali nella subsidenza della piattaforma carbonatica dei marmi ha portato alla sua suddivisione in blocchi subsidenti con conseguente instaurarsi di ambienti deposizionali diversificati che hanno dato origine a serie sedimentarie condensate e/o lacunose

osservabili nella successione stratigrafica presente nelle Apuane nord-orientali rispetto a quella delle Apuane centro- occidentali.

Unità di Massa

L'Unità di Massa è costituita da un basamento paleozoico sul quale poggia in discordanza una serie stratigrafica triassica caratterizzata dalla presenza di vulcaniti basiche del Trias medio.

Il basamento paleozoico è costituito da filladi mentre la copertura mesozoica ha inizio con un deposito di tipo continentale-costiero formato da conglomerati, arenarie e filladi a cui seguono rocce di piattaforma carbonatica (Marmi a Crinoidi e brecce con elementi marmorei). I successivi depositi sono rappresentati da vulcaniti basiche (Prasiniti) talvolta con livelli di filladi e conglomerati. La successione si chiude con depositi di origine continentale – litorale formati da quarziti e filladi (Filladi sericitiche e Anageniti).

Il Dominio Toscano non Metamorfico Falda Toscana

La serie stratigrafica della Falda Toscana (Fig. 2) inizia con la formazione triassica del “Calcere Cavernoso” formato da sedimenti dolomitico/evaporatici, seguono dei depositi di piattaforma carbonatica costituiti prima da calcari stratificati (calcari e marne a Rhaetavicula contorta) poi massicci (calcere massiccio). La successione continua con depositi emipelagici e pelagici costituiti da calcari con interstrati marnosi (calcari ad angulati, Rosso ammonitico), calcari selciferi, marne, radiolariti e calcilutiti selcifere ben stratificate (Maiolica), seguono le argilliti varicolori (Scaglia Toscana) e calcareniti a macroforaminiferi stratificate alternate ad argilliti (Calcere Nummulitico). Il termine superiore della serie stratigrafica è la formazione torbiditica dell'arenaria Macigno.

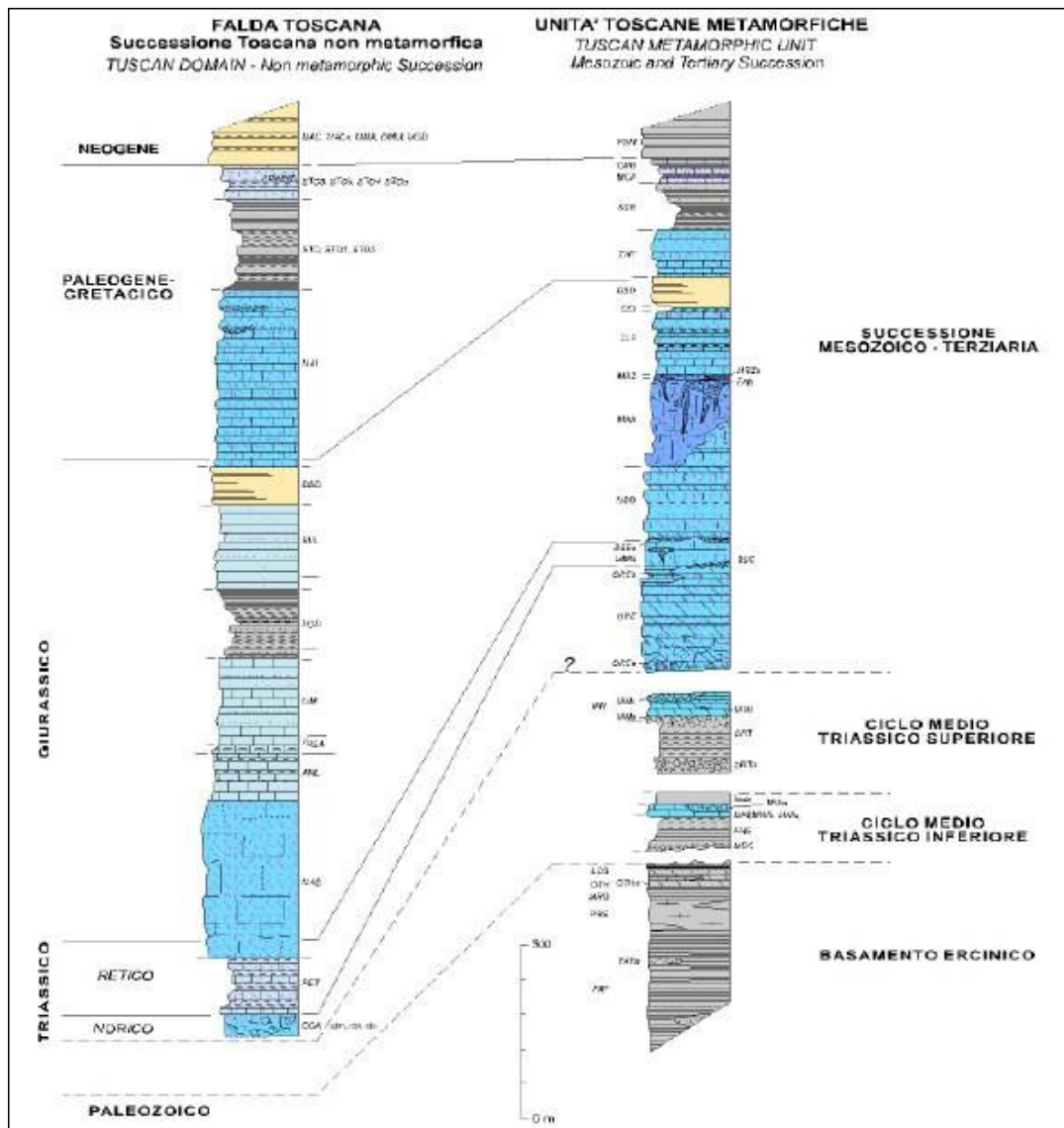


Fig. 1: Colonne stratigrafiche dell'Unità Metamorfica delle Apuane e della Falda Toscana

Le Unità Liguri

Le Unità Liguri sono costituite da vulcaniti basiche che rappresentano frammenti del fondale oceanico e coperture pelagiche costituite da Argilliti e Arenarie torbidity (Dominio Ligure interno) e da Flysch cretacei-paleogenici (Dominio Ligure esterno).

1.3.2 – ASSETTO TETTONICO

L'appennino settentrionale è una catena formatasi durante il Terziario in seguito alla sovrapposizione, avvenuta da Ovest verso Est, delle Unità Liguri sulla Falda Toscana e di questa sull'Unità di Massa e sull'Unità metamorfica delle Alpi Apuane.

L'evoluzione tettonica è avvenuta attraverso una prima fase di deformazione e metamorfismo alla quale è seguita una seconda fase con un regime tettonico di tipo distensivo che ha determinato il sollevamento delle Unità strutturali più profonde. Alla tettonica distensiva sono associate faglie con direzione appenninica e rigetti di oltre 2.000 m che hanno determinato la formazione del Graben del Serchio, che separa le Alpi Apuane dalla catena appenninica e l'affossamento del bacino della Versilia e di Sarzana. A queste faglie sono associate faglie minori trasversali con direzione NE – SW.

Nella morfostruttura negativa della valle del Serchio affiorano, oltre ai depositi fluvio lacustri post orogenetici (Depositi Rusciniiani e Villafranchiani), anche i terreni arenacei-marnoso-argillosi con vulcaniti del fondale oceanico appartenenti alle Unità Liguri e la formazione arenacea del Macigno della Falda Toscana.

Il sollevamento del nucleo metamorfico apuano e il conseguente scaricamento per effetto gravitativo delle Unità sovrapposte (Falda Toscana e Unità Liguri) ha fatto sì che la Falda Toscana cinga su tre lati il nucleo metamorfico apuano con esclusione della parte occidentale dove il contatto per faglia con le rocce metamorfiche è sepolto sotto la coltre di alluvioni della pianura versiliese.

Questa configurazione ad anello della Falda Toscana intorno al Nucleo Metamorfico Apuano fa sì che quest'ultimo rappresenti un classico esempio di “finestra tettonica” (vedi Fig. 3).

L'assetto strutturale del Nucleo Metamorfico Apuano condiziona fortemente la localizzazione e le caratteristiche giacimentologiche e strutturali dei marmi s. l., è quindi opportuno soffermarci brevemente sulla dinamica della tettonica plicativa che lo ha interessato.

L'assetto geometrico del nucleo metamorfico delle Alpi Apuane può essere interpretato in base a due episodi deformativi principali ai quali corrispondono cinematismi differenti. I due eventi deformativi sono indicati con D1 “prima fase” e D2 “seconda fase”.

- Evento D1: le prime fasi deformative del D1 sono di età compresa tra 27 e 20 Ma quando la placca Sardo – Corsa collide con la microplacca Adriatica determinando l'accavallamento delle unità tettoniche più superficiali non metamorfiche (Falda Toscana e Unità Liguri) su quelle più profonde (Unità del Complesso Metamorfico). Queste ultime, compreso la parte superiore del basamento, sono metamorfosate e deformate in pieghe isoclinali di varie dimensioni, fino a interessare dell'intera “finestra tettonica”. Le principali strutture plicative osservabili sono, da Ovest verso Est:

la Sinclinale di Carrara: rappresenta la struttura più occidentale dell'Autoctono"; il fianco inverso, laminato, stirato e rovesciato per circa 4 Km, scompare sotto la Falda Toscana a Nord di Carrara.

L'Anticlinale di Vinca: fa seguito verso Est alla sinclinale di Carrara ed è compresa tra questa e la sinclinale di M. Altissimo - Orto di Donna – M Corchia. Il nucleo della piega arriva a comprendere le filladi inferiori del basamento paleozoico. Lo sviluppo trasversale di questa struttura è di circa 15 Km.

Sinclinale di Orto di Donna – M. Altissimo: la traccia del piano assiale di questa struttura può essere seguito nel versante orientale del massiccio per una ventina di chilometri da Orto di Donna al M. Cavallo e più a sud nella sinclinale del M. Corchia e in quella di Puntato.

Anticlinale del M. Tambura: il nucleo della struttura è costituito dalle formazioni del basamento paleozoico che, nel fianco inverso laminato da un accavallamento, spesso giungono a contatto con la formazione dei Marmi dell'Autoctono. Anche la formazione dei "Grezzoni" (dolomie e calcari dolomitici) nel fianco inverso risultano fortemente ridotti di spessore. L'elisione è di natura tettonica ma il fatto che questa formazione non affiori a nucleo delle anticlinali più orientali (anticlinale del M. Sella, anticlinale del M. Sumbra, anticlinale del M. Pallerina) fa supporre che nella parte orientale della Alpi Apuane l'accavallamento si sia impostato in corrispondenza di una serie stratigrafica di un bacino di sedimentazione dove la dolomia triassica presentava spessori assai ridotti rispetto alla parte occidentale della Apuane.

- Evento D2: le fasi iniziali della deformazione D2 si sviluppano tra 11 e 8 Ma. Le strutture a pieghe isoclinali D1, originatesi probabilmente con piani assiali e scistosità prossimi all'orizzontale, sono state ripiegate in una grande struttura antiforme con direzione appenninica (NW-SE) di dimensioni pari alla "finestra tettonica" delle Alpi Apuane. Il sollevamento della struttura antiforme ha determinato un flusso di materia dalla zona di culminazione verso i fianchi con sviluppo di pieghe da aperte a chiuse di varie dimensioni, fino a lunghezze chilometriche e di faglie poste ai bordi del complesso metamorfico. Nella parte settentrionale della Alpi Apuane le pieghe D2 hanno senso di rovesciamento verso SW, le principali faglie di bordo sono poste nella valle del Serchio e presentano immersione verso NE. Nella parte meridionale le pieghe maggiori hanno invece senso di rovesciamento verso ENE, le faglie di bordo sono ubicate nella pianura versiliese e presentano immersione verso WSW. Le pieghe D2 sarebbero quindi generate da una tettonica gravitativa conseguente al sollevamento del complesso metamorfico indotto dall'attività delle faglie dirette presenti al bordo. La tettonica gravitativa avrebbe interessato anche la Falda Toscana presente ai bordi della "finestra tettonica".

Negli ultimi 2 milioni di anni le Alpi Apuane e le zone circostanti dell'Appennino settentrionale sono state interessate da importanti movimenti verticali stimabili in alcuni chilometri che hanno lasciato testimonianze nei depositi alluvionali fluvio-lacustri della Lunigiana, Garfagnana e Versilia, modellando la morfologia di questi territori, e nel sistema carsico apuano.

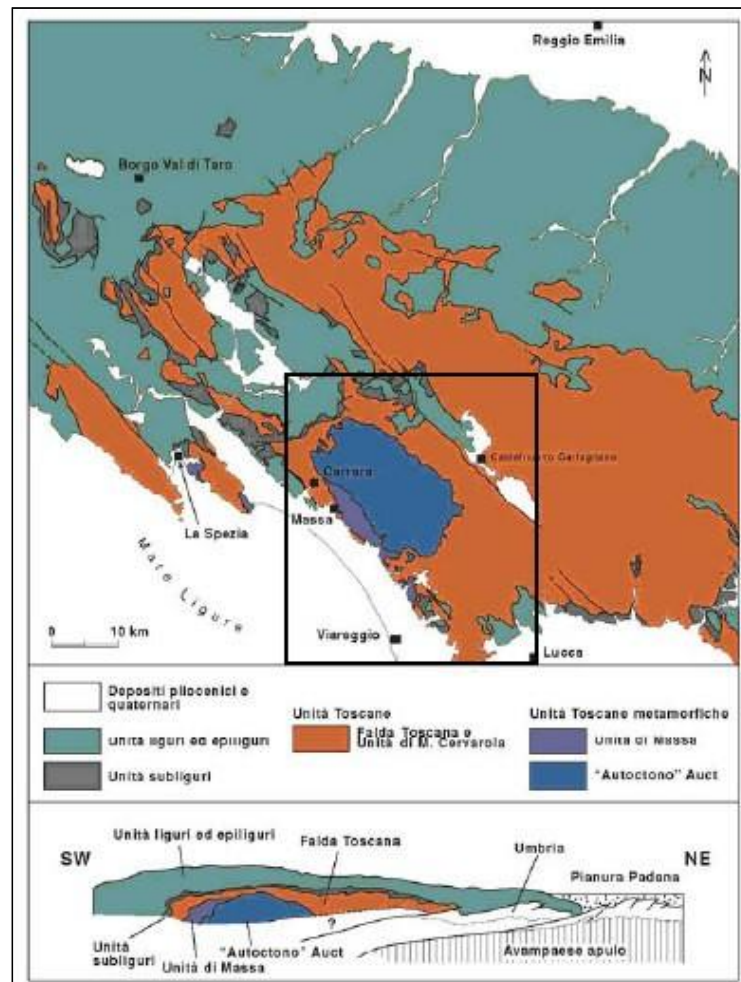


Fig. 2: Distribuzione delle principali unità tettoniche nell'Appennino Settentrionale (C.G.T. 2007)

Il passaggio dai depositi sedimentari del Dominio Toscano alla strutturazione attuale del massiccio apuano, con le geometrie di deformazione duttile che caratterizzano gli eventi D1 e D2, è inquadrabile all'interno di una storia deformativa realizzatasi in ambiente metamorfico caratterizzato da valori di temperatura massime di 380° - 460° C e valori di pressione di picco del metamorfismo compreso tra 0,4 e 0,6 GPa, corrispondente alla pressione di una coltre di rocce di circa 12 Km.

Il grado metamorfico è andato progressivamente diminuendo con il procedere della deformazione. All'inizio dell'evento D2 i valori di temperatura erano già scesi a circa 250° C. Tra i 5 e 2 Ma la temperatura era di circa 70°C ad una profondità di circa 4-5 Km.

Il grado metamorfico non è stato costante all'interno dell'"Autoctono"; esso decresce da occidente a orientale del massiccio apuano, come pure tra l'"Autoctono" e l'Unità di Massa.

Un decremento del grado metamorfico si osserva anche passando dalle unità geometricamente più profonde del Dominio Toscano (Unità di Massa e "Autoctono" Auct.) fino alle Unità Liguri. La diminuzione non è graduale ma subisce una evidente discontinuità passando dal Complesso Metamorfico alla Falda Toscana. Quest'ultima presenta facies riferibili alla fase iniziale del processo metamorfico corrispondente a bassi valori di temperatura e pressione (anchimetamorfismo).

1.3.3 - ASSETTO GIACIMENTOLOGICO

Il giacimento marmifero del bacino estrattivo di Monte Pallerina presenta un'ampia varietà di marmi, alcuni esclusivi e caratteristici di questo di questa zona come il "calacatta Vagli".

La formazione marmifera è costituita dalle seguenti varietà (C.G.T, 2007):

Marmo Bianco Ordinario (or) - Marmi a grana fine o media-grossa, di colore bianco perlaceo fino a grigio chiaro, in genere piuttosto omogenei o variamente punteggiati da macchie grigie più o meno ampie e sfumate dovute a presenza di pirite microcristallina. Raramente si osservano irregolari trame di vene di colore grigio chiaro o scuro.

Marmo Venato (ve) - Marmi a grana media, di colore dal bianco al bianco perlaceo, fino a grigio chiaro, con venature più scure da molto regolari ad anastomizzate e spesse in media dal mm al cm. Non sono rare le macchie grigie di forma irregolare talvolta caratterizzate da una certa isorientazione.

Grigio (gr) - Marmi a grana fine o media, di colore da grigio chiaro a grigio scuro attraversati da vene grigie più scure o più chiare fino a biancastre. L'ornamentazione risulta estremamente variabile pur rimanendo all'interno di un tipo generale: si può infatti passare da litotipi con aspetto molto eterogeneo e variegato, dato da alternanze più o meno irregolari di livelli grigi e biancastri, a materiali molto omogenei, con colori che vanno dal grigio-bluastro al grigio scuro con sottili venature più scure. Il colore scuro più o meno uniforme dell'insieme è dato da pirite microcristallina e/o pigmento carbonioso.

Marmi brecciati - In questo gruppo ricadono gran parte delle metabrecce di composizione prevalentemente carbonatica presenti a differenti altezze nella successione litostratigrafia delle Alpi Apuane. In genere sono rappresentate da metabrecce clasto-sostenute ad elementi di marmo e matrice variamente colorata dal grigio al verde, dal rosso al viola. A causa della deformazione subita, i clasti di queste metabrecce hanno assunto una forma fortemente appiattita e allungata sulla

foliazione metamorfica principale, determinando la possibilità da parte di questi materiali di assumere aspetti completamente differenti su tagli di cava diversamente orientati.

Arabescato (ar) - Metabrecce a clasti eterometrici di marmo immersi in una matrice, di composizione prevalentemente calcarea, di colore dal grigio più o meno scuro al verde scuro. La matrice è in genere nettamente subordinata alla frazione clastica ed è caratterizzata da locali arricchimenti in pirite microcristallina, fillosilicati, dolomite, quarzo, etc., sempre in quantità accessorie rispetto alla calcite. I clasti sono tipicamente grigio chiari-bianchi e in funzione della loro taglia, colore, disposizione relativa e rapporto con la matrice circostante determinano per questa varietà un'ampia gamma di aspetti e ornamentazioni di solito ben esposti nei diversi tagli di cava.

Calacatta (ca) - Metabrecce a clasti marmorei bianco-giallastri molto chiari, talora con deboli colorazioni verdechiaro, in matrice calcareo-fillosilicatica di colore generalmente giallo-ocra e meno frequentemente verde. Dal punto di vista commerciale variazioni di colore nella matrice calcareo – fillosilicatica determinano denominazioni diverse quali: Calacatta oro; Calacatta delicato, Calacatta Vagli rosato

Breccia rossa (br) - Metabrecce poligeniche a prevalenti elementi marmorei e subordinate selci, in matrice a dominante composizione fillosilicatica di colore variabile dal verde scuro al rosso scuro, dal rosso violaceo al viola scuro. I clasti di marmo sono di vario tipo, da bianchi a grigio-chiari, da nocciola a rosati, spesso ricchi in frammenti e articoli di crinoidi e frammenti di belemniti.

2 - INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GIACIMENTOLOGICO DEL BACINO ESTRATTIVO DI PALLERINA

Il bacino estrattivo del M. Pallerina si estende sul versante orografico destro della valle di Arnetola. Da Sud verso Nord esso comprende le aree estrattive di Borella, Col di Beteto, Fossa dei Tomei –Bancaio, Cava Pallerina, cava Piastra Bagnata, Cava Lame Fredde.

L'elemento strutturale più importante è l'anticlinale del M. Pallerina a nucleo di marmo che, all'ingresso della valle di Arnetola, si immerge a "tête plongeante" verso NNE sotto le formazioni sovrastanti. In questa zona il marmo raggiunge il suo massimo spessore, probabilmente anche per sovrapposizioni successive, mentre verso Sud progressivamente si riduce fino a scomparire sotto le formazioni sovrastanti immediatamente a Sud di Borella.

Il fianco diritto dell'anticlinale è laminato e il marmo viene a diretto contatto con gli scisti sericitici, lenti di Diaspri sono via via presenti lungo il contatto (es. lo sperone roccioso della Penna Rossa immediatamente sovrastante la cava Piastra Bagnata).

In questa struttura sono localizzate le cave di: Borella, Col di Beteto, Cava Pallerina, cava Piastra Bagnata, Cava Lame Fredde.

L'affioramento marmifero presente nella Fossa del Tomei – Bancaio è invece formato da una sovrapposizione di pieghe minori di prima fase riferibili all'anticlinale di San Viviano, alla sinclinale di Arnetola e alla parte terminale dell'anticlinale del M. Pallerina.

La forma chiusa di questi affioramenti marmiferi corrisponde a culminazioni di anticlinali di sheath folds e l'interferenza di queste pieghe che la deformazione tardiva produce strutture di difficile interpretazione rappresentazione.

La scistosità di prima fase immerge verso NE in tutti gli affioramenti marmiferi del bacino con valori variabili da 30° a 60°. Lineazioni d'estensione e gli assi delle pieghe, in accordo con lo stile delle pieghe, sono paralleli e immergono anch'essi verso NE.

2.1 - INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO

2.1.1 – INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO GENERALE

Le formazioni litologiche che formano le Unità tettoniche presenti nell'area (Unità Metamorfica Apuana - Autoctono; Unità di Massa; Falda Toscana; Unità Liguri) sono raggruppabili in complessi idrogeologici caratterizzati da un diverso grado di permeabilità dovuto alle caratteristiche litologiche e strutturali di ogni formazione.

Nella figura 4 le formazioni litologiche delle tre Unità tettoniche più interessanti dal punto di vista idrogeologico, sono riunite in due gruppi

1. Rocce a litologia non carbonatica: caratterizzate da permeabilità per fatturazione da bassa a medio – bassa;
2. Rocce a litologia carbonatica: caratterizzate da permeabilità per fatturazione e carsismo da media a alta.

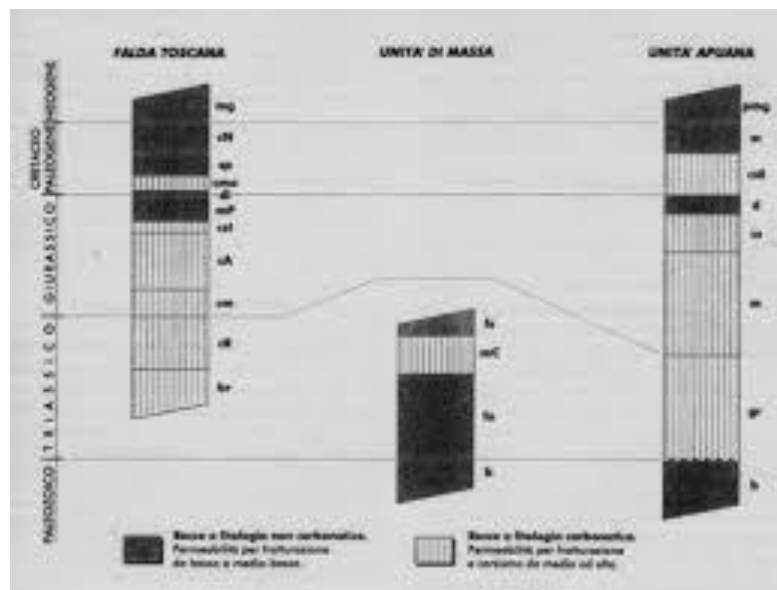


Fig. 3: Colonne idro-stratigrafiche delle unità tettoniche delle Alpi Apuane: (Piccini et al. 1999).

Falda Toscana: mg) Macigno; cN) Calcari a Nummuliti; sp) Scisti policromi; cma) Maiolica; di) Diaspri; mP) Marne a Posidonia; cst) Calcare selcifero Val di Lima; cA) Calcare Angulati; cm) calcare Massiccio; cR) Calcare a Rhaetavícula; br) brecce tettoniche (calcare cavernoso).

Unità di Massa: fs) Filladi superiori; mC) Marmi a Crinoidi e brecce marmoree; fa) Filladi e metaarenarie;

b) basamento paleozoico;

Unità Apuana: pmg) Pseudomacigno; sc) Scisti Sericitici e Cipollini; csE) Calc. Selciferi Entrochi; d) Diaspri; cs) Calcari selciferi; m) Marmi s.l. e Marmi dolomitici; gr) Grezzoni; b) basamento paleozoico

Baldacci et al. (1993) suddividono le formazioni del primo gruppo in: a) Copertura impermeabile, b) Substrato impermeabile. Le formazioni del secondo gruppo sono anch'esse divise in due sottosistemi: a) sottosistema superiore (indicato con: sS1); b) sottosistema inferiore (indicato con: sS2).

Rocce a litologia non carbonatica Copertura impermeabile

Comprende le formazioni riferibili alle Unità Liguri, alla parte sommitale della Falda Toscana non metamorfica e ai depositi fluvio – lacustri postorogenici. Gli orizzonti acquiferi sono rappresentati da formazioni a permeabilità secondaria decrescente quali torbiditi arenacee e calcareo marnose, ofioliti e brecce ofiolitiche; formazioni a permeabilità secondaria quali argilliti siltose e calcareniti.

Queste formazioni, siano esse semipermeabili o impermeabili svolgono nell'insieme una funzione di copertura per le sottostanti "rocce a litologia carbonatica".

Nelle formazioni arenacee e calcareo marnose sono presenti locali acquiferi, poco profondi, che danno origine a emergenze diffuse. Il maggior numero di sorgenti è presente nella formazione arenacea del Macigno; le portate sono generalmente di pochi l/sec. Localmente questi acquiferi possono essere in collegamento idraulico con le sottostanti "rocce a litologia carbonatica" per discontinuità o assottigliamenti delle formazioni impermeabili.

Substrato impermeabile

Corrisponde al basamento dell'Unità Metamorfica delle Alpi Apuane e dell'Unità di Massa; è costituito prevalentemente da filladi paleozoiche compatte del corrugamento ercinico e può essere considerato praticamente impermeabile.

Rocce a litologia carbonatica

Nelle "rocce a litologia carbonatica" possono essere individuati i seguenti complessi idrogeologici:

Unità Metamorfica delle Alpi Apuane

Il principale complesso idrogeologico è costituito dalla successione Grezzoni, Marmi Dolomitici, Marmi, Calcari Selciferi. Questa successione rappresenta il principale acquifero delle Alpi Apuane. È delimitato in basso dal basamento costituito prevalentemente dalle filladi paleozoiche e in alto da rocce a permeabilità medio bassa quali i diaspri.

Compreso tra i diaspri al letto e gli scisti sericitici e cipollini al tetto, è presente un complesso a media permeabilità rappresentato dalla formazione del Calcare selcifero a Entrochi.

Unità di Massa

Nell'Unità di Massa l'unico complesso idrogeologico è rappresentato dalla formazione dei Marmi a Crinoidi compreso al letto e al tetto da formazioni filladiche impermeabili.

Falda Toscana

La successione Calcare Cavernoso, Calcare a Rhaetavicula, Calcare Massiccio, Calcare ad Angulati, Calcare Rosso Ammonitico, Calcare Selcifero rappresenta, per importanza, il secondo complesso idrogeologico delle Alpi Apuane. Questo complesso è caratterizzato da una permeabilità medio alta per fratturazione e carsismo, ma con forme carsiche ipogee meno sviluppate rispetto a quelle presenti nelle rocce carbonatiche dell'Unità Metamorfica delle Alpi Apuane. Esso è delimitato al tetto dalla formazione delle Marne a Posidonia. La base è rappresentata dalle brecce tettoniche e poligeniche del Calcare Cavernoso. Quando queste brecce sono a diretto contatto con il complesso

carbonatico dell'Unità Metamorfica Apuana sono possibili importanti scambi idrici tra i due complessi.

Un secondo complesso idrogeologico è rappresentato dalla formazione della Maiolica compresa tra i Diaspri e/o le Marne a Posidonia al letto e gli Scisti Policromi (Scaglia Toscana) al tetto.

Nei complessi carbonatici la circolazione idrica avviene essenzialmente lungo le fratture allargate dalle acque meteoriche per dissoluzione del calcare e quindi attraverso i condotti carsici che si formano. La venuta a giorno delle acque nei punti topograficamente più depressi rappresenta il livello di base carsico dell'idrostruttura compresa nel complesso carbonatico.

Nel complesso carbonatico metamorfico il livello di base carsico varia tra il versante occidentale e quello orientale delle Alpi Apuane. Verso la valle del Fiume Serchio il livello di base carsico è sempre sopra i 500 m s.l.m., mentre nel versante occidentale è compreso tra 200 – 300 m s.l.m. Questa differenza causa il deflusso sotterraneo delle acque da NE verso SW e quindi il drenaggio verso i bacini della Versilia delle acque del versante della Garfagnana. L'esempio è il bacino della sorgente del Frigido che si estende oltre lo spartiacque superficiale nel bacino del Fiume Serchio (Piccini & Pranzini, 1989; Piccini et al. 1999).

Il deflusso sotterraneo nel complesso carbonatico metamorfico non è controllato dal basamento cristallino impermeabile delle filladi paleozoiche (se non in area molto ristrette), ma dalle strutture a pieghe coricate con asse molto inclinato che interessano le formazioni metamorfiche. Il basamento cristallino svolge invece una funzione di soglia per molte sorgenti del versante occidentale.

2.1.2 – PERMEABILITÀ DELLE FORMAZIONI IDROGEOLOGICHE

La permeabilità di una roccia può essere definita come la proprietà di lasciarsi attraversare dall'acqua sotto un determinato gradiente idraulico.

La permeabilità può essere “primaria” quando è legata alla storia di formazione diagenetica della roccia (presenza di vuoti tra granulo e granulo); “secondaria” quando è legata alla fatturazione della roccia per cause successive alla sua formazione (cause prevalentemente tettoniche).

Nel definire la permeabilità delle formazioni litologiche si può fare riferimento alla permeabilità relativa espressa in modo qualitativo (permeabilità alta, media, bassa, impermeabile) confrontando il comportamento di un litotipo rispetto ad altri inseriti nello stesso contesto, oppure alla permeabilità assoluta che è una proprietà quantizzabile con prove di laboratorio ed è espressa da un coefficiente di permeabilità.

In letteratura sono comunemente riportate quattro classi di permeabilità relativa. L'attribuzione di una formazione litologica ad una classe è fatta in base a criteri qualitativi, non privi quindi di una certa soggettività che porta a valutazioni talvolta leggermente divergenti come risulta dalla tabella n.

1

Bibliografia/ Complessi idrogeologici	Nardi et al., 1987 (4 gradi)	Piccini-Pranzini, 1989 (4 gradi)	Baldacci et al., 1993 (4 gradi)	Baldacci et al., 1994 (Monti Pisani-4 gradi)	Piccini et al., 1999 (4 gradi)	Doveri, 2004 (4 gradi)
MAC	medio-bassa	bassa	-	da mediocre a bassa	da medio bassa a bassa	bassa
STO	medio-bassa	impermeabile	-	impermeabile	impermeabile	bassa
MAI	elevata	-	medio alta	da elevata a molto elevata	alta	-
DSD	medio-bassa	bassa	bassa	da mediocre a bassa	da medio bassa a bassa	bassa
SVL	elevata	-	medio alta	da elevata a mediocre	media	-
POD	medio-bassa	-	nulla	impermeabile	impermeabile	bassa
LIM	elevata	-	media	da elevata a mediocre	media	-
RSA	elevata	bassa	media	da elevata a mediocre	media	-
ANL	elevata	media	media	-	media	media
MAS	elevata	alta	alta	da elevata a molto elevata	alta	alta
RET	elevata	media	media	da elevata a mediocre	media	media
CCA	elevata	alta	alta	da elevata a molto elevata	alta	alta
PSM	medio-bassa	bassa	-	da mediocre a bassa	da medio bassa a bassa	-
CNU	-	bassa	-	-	-	-
MCP	-	bassa	-	-	-	-
SSR	medio-bassa	impermeabile	-	impermeabile	impermeabile	bassa
ENT	elevata	media	medio alta	da elevata a mediocre	media	-
DSDa	-	bassa	bassa	-	da medio bassa a bassa	-
CCI	-	media	media	-	media	-
CLF	elevata	media	medio alta	da elevata a mediocre	media	media
FAN	-	-	-	-	-	-
MAA	elevata	alta	alta	da elevata a molto elevata	alta	alta
MDD	elevata	alta	medio alta	-	da medio bassa a bassa	-
BSE	-	bassa	-	-	da medio bassa a bassa	-
MMG	elevata	alta	medio alta	-	da medio bassa a bassa	-
GRE	elevata	alta	alta	da elevata a mediocre	alta	alta
VIN	-	bassa	-	-	da medio bassa a bassa	-
SRT	bassa e media	-	-	-	da medio bassa a bassa	bassa
MNI	-	media	-	-	media	-
MNIa	-	bassa	-	-	media	-
FNE	-	impermeabile	-	-	impermeabile	-
PRS	-	impermeabile	-	-	impermeabile	bassa
FAF	-	impermeabile	-	-	impermeabile	bassa

Tab. 1: Classificazione dei complessi idrogeologici per grado di permeabilità come riportato in letteratura

[Macigno (MAC); Scaglia Toscana (STO); Maiolica (MAI); Diaspri (DSD); C. Selcifero Val di Lima (SVL); Marne a Posidonia (POD); C. Selcifero di Limano (LIM); Rosso Ammonitico RSA); C. Angulati (ANL); C. Massiccio (MAS); C. Rhaetavica (RET); C. Cavernoso (CCA); Pseudomacigno (PSM); C. Nummulitico (CNU); Cipollini (MCP); Scisti sericitici (SSR); C. Selc. Entrochi (ENT); Diaspri (DSDa); Calcescisti (CCI); C. Selciferi (CLF); Formazione di Arnetola (FAN); Marmi (MAA); Marmi Dolomitici (MDD); Brecce di Seravezza (BSE); Marmo a Megalodonti (MMG); Grezzoni (GRE); Formazione di Vinca (VIN); Filladi quarzitiche (SRT); Marmi a Crinoidi (MNI); Metabrecce a elementi marmorei (MNIa); Filladi muscovitiche (FNE); Porfiroidi e Scisti Porfirici (PRS); Filladi Inferiori (FAF).] (Da C.G.T. 2007).

Nel lavoro del C.G.T. (2007) è affrontato il problema della identificazione e classificazione dei complessi idrogeologici per tipo e grado di permeabilità relativa attribuendo alle formazioni geologiche carbonatiche la permeabilità per fatturazione o per fratturazione e carsismo in base ad una

serie di valutazioni incentrate principalmente sul grado di carsificazione di ciascuna formazione. Per i dettagli sulle procedure seguite si rimanda al lavoro specifico.

Sono distinte cinque gradi di permeabilità:

I Permeabilità da bassa a molto bassa;

II Permeabilità medio bassa

III Permeabilità media

IV Permeabilità medio alta

V Permeabilità alta

La classificazione completa della permeabilità relativa per i complessi idrogeologici carbonatici è riportata nella Tab. 2. I criteri di valutazione adottati la rendono valida per l'area delle Alpi Apuane dove sono disponibili abbondanti informazioni sul grado di carsificazione; per le formazioni della Falda Toscana, essendo i dati più lacunosi, rimangono alcune incertezze. Il criterio può comunque essere esteso ad altre aree con acquiferi carbonatici.

Grado di permeabilità relativa	Complessi idrogeologici carbonatici permeabili per fatturazione e carsismo	Complessi idrogeologici carbonatici permeabili per fatturazione
V	MAA	–
IV	MAI, MAS, CCA, ENT, CLF, MDD, GRE, MNI	–
III	STO3, RET, MCP	SVL, LIM, RSA, ANL
II	–	CGV

Tab. 2. Attribuzione del grado di permeabilità relativa ai complessi idrogeologici carbonatici. (da C.G.T. 2007)

[Legenda: Scaglia Toscana Calcareni di Montegrossi (STO3); Maiolica (MAI); Calcari Selciferi Val di Lima (SVL); Calcare Selcifero di Limano (LIM); Rosso Ammonitico (RSA); Calcari ad Angulati (ANL); Calcare Massiccio (MAS); Calcare Rhaetavícula (RET); Calcare Cavernoso (CCA); Cipollini (MCP); Calcari Selciferi Entrochi (ENT); Calcari selciferi (CLF); Marmi (MAA); Marmi Dolomitici MDD); Grezzoni (GRE); Marmi a Crinoidi (MNI); Calcari di Groppo del Vescovo (CGV)].

Per i complessi idrogeologici non carbonatici è stata elaborata la classificazione indicata nella Tab. 3.

Complessi idrogeologici non carbonatici permeabili per fratturazione	
Grado di permeabilità relativa	
I	II
FNE, SSR, SRT, VINa, STO, PRS, FAF, POD	CCVc, OTO, ACCa, ARB, GOT, DSDa, DSD, MAC, PSM

Tab. 3: Attribuzione del grado di permeabilità relativa ai complessi idrogeologici non carbonatici. (Da: C.G.T. 2007).

[Legenda: Macigno (MAC); Scaglia Toscana argilliti (STO); Diaspri (DSD); Marne a Posidonia (POD); Pseudomacigno (PSM); Scisti Sericitici (SSR); Diaspri (DSDa), Filladi quarzitiche (SRT); Filladi muscovitiche (FNE); Filladi inferiori (FAF); Porfiroidi e scisti porfirici (PRS); Filladi della Formazione di Vinca (VINa); Breccie ad elementi ofiolitici (CCVa)); Flysch di Ottone (OTO); Argille e calcari di Canetolo (ACCa); Arenarie di Ponte Pratica (ARB); Arenarie del M. Gottero (GOT)].

2.1.3 - IDROGRAFIA E IDROGEOLOGIA DEL BACINO ESTRATTIVO DI PALLERINA

Gli estesi affioramenti di rocce carbonatiche non hanno consentito lo sviluppo di una rete idrica superficiale di una certa consistenza, fatta eccezione per la parte Sud della valle dove la presenza di rocce più impermeabili (cipollini e scisti sericitici) hanno permesso lo sviluppo di una rete di fossi che scendono dalle pendici del M. Fiocca e del Passo di Sella, con portate molto variabili nell'arco dell'anno, considerata la limitata estensione dei loro bacini di alimentazione. Tutti gli impluvi e i fossi che scendono dai versanti convergono a formare il Fosso Tambura che scorre nel fondovalle di Arnetola. Pur essendo la valle di Arnetola caratterizzata da una elevata piovosità - L. Piccini et al. (1999) stimano le precipitazioni in 3200 mm/anno – tuttavia il fosso è spesso asciutto o con portate molto ridotte.

Nella parte sud gli estesi affioramenti di rocce impermeabili presenti lungo le pendici del M. Fiocca e del M. Croce, la ridotta estensione degli affioramenti di rocce carbonatiche, una morfologia del versante meno acclive rispetto alla parte Nord hanno consentito lo sviluppo di un reticolo superficiale di fossi, alcuni anche molto incisi. Il reticolo idrico presente in questa parte del bacino estrattivo presenta un andamento tortuoso nonostante le ridotte portate e la limitata estensione; probabilmente la geometria del reticolo idrico è stata fortemente condizionata dalla complessa tettonica polifasata che ha interessato la zona del Bancaio Alto e della Fossa dei Tomei.

I due ultimi studi in ordine di tempo (L. Piccini et al., 1999; CGT, 2007) sulle strutture idrogeologiche apuane pongono il bacino estrattivo di Colubraia all'estremità Est del sistema idrogeologico della Sorgente del Frigido. Il confine di questa idrostruttura è infatti in corrispondenza

dello spartiacque M. Pallerina – M. Croce – M. Fiocca, mentre a Nord del M. Pallerina esso coincide con la variazione di permeabilità data dal passaggio dal marmo alle formazioni sovrastanti dei Diaspri, Cipollini e Scisti sericitici.

I limiti di questa idrostruttura sono individuati in modo abbastanza preciso grazie agli studi sull'assetto geostrutturale eseguiti nell'area apuana alla fine del secolo scorso e all'esplorazione speleologica delle numerose cavità carsiche presenti nella zona che, anche con l'impiego di traccianti, ha fornito importanti informazioni sul complesso assetto idrogeologico degli acquiferi carbonatici apuani.

Le formazioni presenti nel bacino estrattivo appartengono tutte all'Unità Metamorfica della Alpi Apuane e la totalità della superficie del bacino è rappresentata da Marmi s.l. considerati litotipi a "permeabilità alta" per fratturazione e carsismo (C.G.T. 2007). In questo caso la permeabilità che si considera è la permeabilità relativa che fornisce solo una valutazione qualitativa confrontando il comportamento di un litotipo rispetto ad altri inseriti nello stesso contesto.

A livello dell'affioramento roccioso la permeabilità di una roccia è però influenzata da vari fattori tra cui: lo stato di fratturazione, l'assetto strutturale, la pendenza del versante, la presenza di suolo e/o di vegetazione, la presenza di forme carsiche. In questo caso la permeabilità è in genere espressa come dal coefficiente d'infiltrazione efficace (Cie) che è dato dal rapporto tra l'acqua che effettivamente infiltra nel terreno e le precipitazioni efficaci date da: precipitazioni – evapotraspirazione.

I Cie dei sistemi idrogeologici dove sono presenti Marmi e Grezzoni, sulla base delle portate delle sorgenti di cui era nota l'area di alimentazione, sono stati calcolati da L. Piccini et al. (1999) e variano tra 0,75 e 0,55. Per il sistema idrogeologico del Fiume Frigido il Cie è 0,60 con valori di precipitazioni medie annue di 2886 mm, valore corretto tenendo conto del fattore topografico. Per il bacino di Colubraia le precipitazioni medie annue corrette per il fattore topografico risultano di 3.200 mm.

A fronte di questi elevati valori di precipitazioni, il ruscellamento superficiale all'interno del bacino estrattivo è praticamente assente se non in occasione di intense precipitazioni. Il reticolo idrografico è limitato ad alcuni modesti impluvi che confluiscono nel Fosso Tambura che scorre sul fondovalle della valle di Arnetola, anch'esso con portate fortemente condizionate dall'andamento delle precipitazioni.

Gli estesi affioramenti di rocce carbonatiche presenti nel bacino estrattivo sono interessati da importanti fenomeni carsici di tipo ipogeo. All'interno del perimetro del bacino si contano infatti 7

cavit  carsiche, nonostante la sua limitata estensione, censite nel catasto grotte della Regione Toscana elencate nella Tab. 4.

N.	Denominazione	Quota m. slm	Dislivello m		Sviluppo m			Note
			-	+	Spaziale	Planimetrico	Estensione	
317	Buca della Pompa	900	410	0	1000	300	-	
440	Pozzo della Borella	1.135	60	0	100	30	22	
644	Abisso della cava terza	1.025	490	0	900	320	160	In cava, non pi� accessibile
756	Abisso Eunice	1.130	650	12	2.300	950	370	Collegato con: N. 862, 1077, 1916, 1917
862	Ingresso nuovo Eunice	1.125	645	17	2.300	950	370	Collegato con: N. 756
863	Buca della Lavandaia	1.030	290	0	580	300	100	
1006	Buca dei Reggiani	1.225	100	0	-	-	-	
1046	Abisso dei Tarzanelli	1.040	540	110	2.050	1.115	360	Collegata con: N. 1007
1079	Buca Moia	1.100	100	0	-	-	-	
1120	Buca delle Zanzare	1.185	22	0	83	76	35	
1140	Abisso Alice	1.100	454	0	1.105	550	-	
1269	Buca di Mamma Ghira	1.070	580	110	4.900	-	-	Collegata con: N. 548, 643, 859, 860
1299	Buca del Bancaio	1.020	180	0	-	-	-	Ingresso in cava non accessibile
1841	Buca delle Ossa di Arnetola	1.090	555	0	1.210	600	220	Oppure: Abisso Ober
1916	Ingresso quarto di Eunice	1.142	662	0	2.300	950	370	Collegato con: n. 756
1917	Ingresso quinto di Eunice	1.135	655	7	2.300	950	370	Collegato con: N. 756

Tab. 4: Cavit  carsiche censite nel bacino estrattivo di Pallerina e loro caratteristiche. (Da Catasto Grotte della Regione Toscana)

Nel periodo tra il 1970 e il 1990 nella valle di Arnetola l'esplorazione di numerose cavit  carsiche ha consentito di rilevare il livello di base carsico intorno a 500 m s.l.m. mentre nel versante occidentale delle Alpi Apuane esso scende a 200 – 300 m di quota. Questa differenza di quota   dovuta all'evoluzione morfo-tettonica recente delle Alpi Apuane ed   alla base del deflusso da NE verso SW delle acque sotterranee come   stato confermato anche dall'impiego di traccianti.

Una delle cavit  utilizzate per l'immissione di traccianti   la n. 317 "Buca della Pompa", posta all'ingresso della valle di Arnetola. La prova   stata eseguita nel novembre 1983 utilizzando fluoresceina che   stata rilevata a distanza di 22 giorni alla sorgente del Fiume Frigido. Nello stesso periodo altre prove con traccianti sono state eseguite in altre due cavit  poste pi  a Sud nella valle di Arnetola e fuori dal bacino estrattivo: l'Abisso Simi e l'Abisso dello Gnomo. Anche queste prove hanno avuto esito positivo alla sorgente del F. Frigido dopo 22 e 55 giorni dall'immissione del tracciante.

Le acque della sorgente del Frigido hanno un valore medio di conducibilità elettrica di circa 180 $\mu\text{S}/\text{cm}$ alla temperatura media di 10,2°C (Piccini L, Pranzini G – 1989). Il basso valore di salinità nonostante la circolazione in rocce carbonatiche solubili è indice di un percorso veloce nei condotti sotterranei, come risulta anche dalle prove con traccianti.

L'utilizzo di traccianti ha quindi permesso di definire, con una certa attendibilità, il sistema idrogeologico del F. Frigido anche rispetto al confinante sistema idrogeologico della sorgente dell'Aiarone che si estende immediatamente a oriente ma con limiti incerti, salvo quelli con il sistema della sorgente del Frigido.

È comunque da tenere presente che per alcuni sistemi idrogeologici sussistono dubbi sulla reale posizione degli spartiacque sotterranei; sono infatti possibili scambi idrici tra sistemi confinanti attraverso vie di flusso secondarie soprattutto in condizioni ipercritiche di alimentazione come può avvenire in concomitanza di forti precipitazioni. Pertanto, i sistemi idrogeologici non sono da considerare sistemi chiusi ma sistemi che in condizioni normali di alimentazione hanno scambi idrici sotterranei trascurabili con i sistemi confinanti (L. Piccini et al. 1999)

Date le caratteristiche geostrutturali e idrogeologiche del bacino estrattivo di Pallerina non sono presenti sorgenti al suo interno e nella zona circostante. Le sorgenti più vicine sono la sorgente dell'Aiarone e la sorgente di Pruni. La prima è posta poco a Sud di Vagli di Sotto sul lato destro del lago; è sommersa dalle acque del lago ed emerge solo quando le acque si abbassano. La seconda si trova sul lato sinistro alla confluenza dei due rami del lago. I bacini di alimentazione di queste sorgenti non hanno però nessun rapporto con la valle di Arnetola e con i bacini marmiferi in essa presenti.

Il citato studio prototipale del CGT, come sopra riferito, indica che le acque di infiltrazione della zona di Fossa dei Tomei vanno a confluire verso le sorgenti del Frigido, secondo lo schema riportato di seguito, estratto dall'Allegato 9a del suddetto studio.

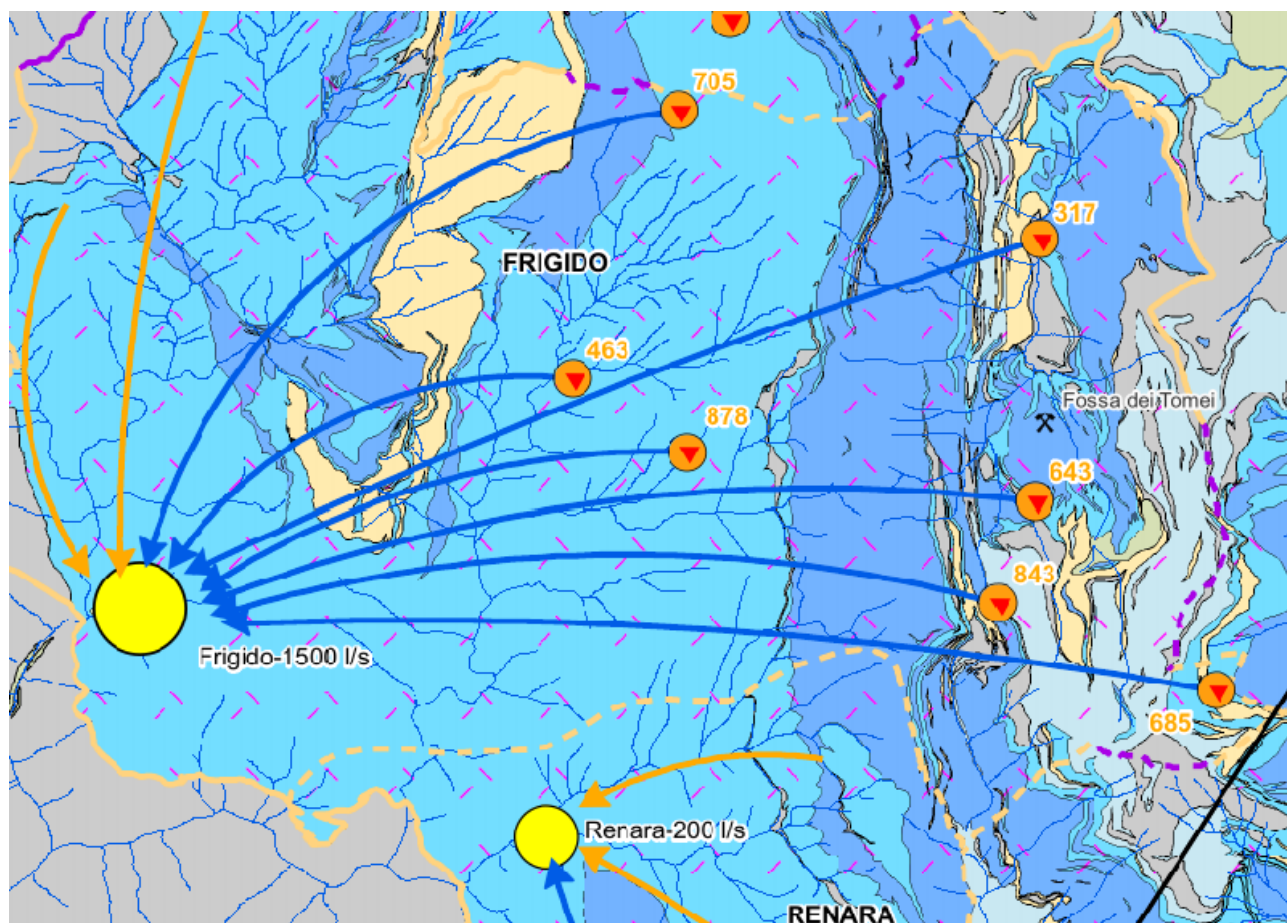


Fig. 4: andamento delle linee di flusso idrico sotterraneo tratta dalla "Carta delle Aree di alimentazione dei sistemi idrogeologici - Corpo Idrico Sotterraneo Significativo delle Alpi Apuane"

Nell'ambito dello stesso studio (vedi Allegato 9c) è riportata anche la ricostruzione dei bacini idrogeologici, come nello stralcio riportato di seguito.

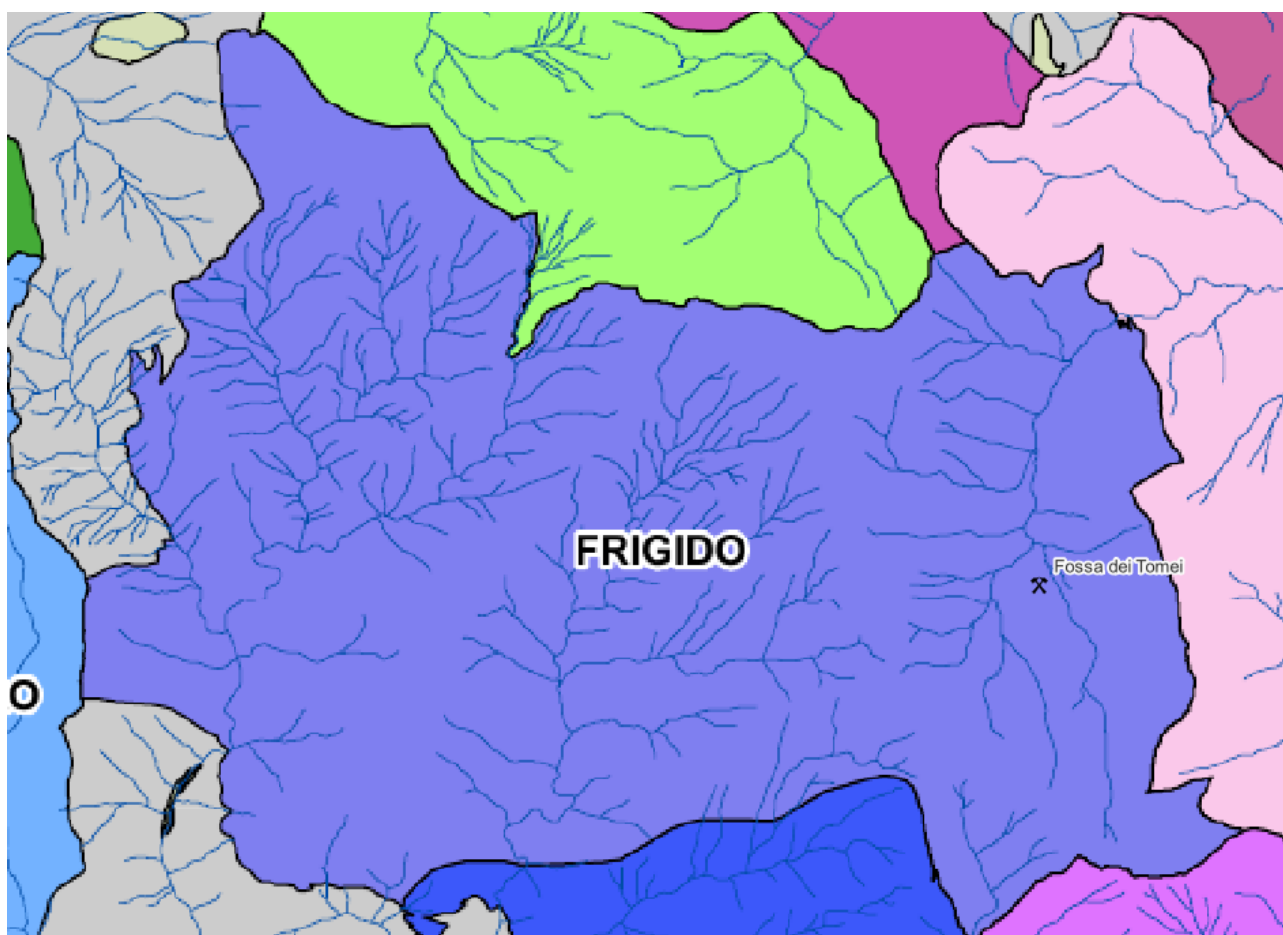


Fig. 5: ricostruzione bacini idrogeologici dalla "Carta delle Aree di alimentazione dei sistemi idrogeologici - Corpo Idrico Sottterraneo Significativo delle Alpi Apuane"

2.1.4 - VULNERABILITÀ DEGLI ACQUIFERI

Il problema della vulnerabilità degli acquiferi sulle Apuane è piuttosto rilevante, in quanto le estese aree carbonatiche, per la quasi totale mancanza di un suolo e le caratteristiche di elevata permeabilità, possono rappresentare delle aree di facile infiltrazione per inquinanti di varia natura. Infatti, le fratture, associate al carsismo, sono mezzi di potenziale e diretta infiltrazione di inquinanti all'interno degli ammassi rocciosi. In particolare, il problema è sentito nelle aree a vocazione estrattiva, dove l'attività svolta, se non organizzata e correttamente condotta, può essere una fonte di inquinamento a causa della dispersione dei lubrificanti o di altri potenziali inquinanti sul terreno. L'area in esame è classificata ad alta vulnerabilità (50-70 valori sintacs) per gli acquiferi (Civita et al, 1991).

Al fine di contenere al minimo il rischio di inquinamento dell'acquifero sopra definito, nell'area di cava deve essere attivato un rigido protocollo che disciplini la gestione dei rifiuti e delle acque, siano esse di prima pioggia che di lavorazione, in modo da evitare qualsiasi possibile contaminazione

Data la natura carsica ampiamente descritta sopra, sono stati previsti una serie di accorgimenti e di modalità operative finalizzate a eliminare ogni possibile interazione negativa tra l'acquifero e le attività di coltivazione.

In prima battuta, sulla base della georeferenziazione degli ingressi e dell'andamento delle cavità carsiche presenti nella zona (vedi Tav. 8), è stata prevista una fascia di assoluto rispetto relativa all'ingresso delle cavità note come Abisso Tarzanelli/BucaSottostrada, Buca del Bancaio e Buca di Mamma Ghira. Tale fascia di rispetto è rappresentata da un cerchio, centrato sull'ingresso della cavità carsica, con raggio di estensione pari a 15 m; all'interno dell'area di rispetto è impedita qualsiasi attività, non solo quella estrattiva in senso stretto, ma anche la realizzazione di viabilità o di qualsiasi altro tipo di lavorazione.

Tale accorgimento riprende quello già attivato in seguito agli esiti del procedimento che ha portato al rilascio dell'autorizzazione oggi vigente; inoltre, risulta che la stessa misura di protezione sia stata adottata e approvata dagli enti competenti in altri contesti con criticità ben più rilevanti (si veda PAUR n°3/2026, prescrizione n°2).

Oltre alla ricostruzione planimetrica della posizione degli ingressi e dell'andamento delle cavità carsiche presenti, è stato ricostruito anche l'andamento con la profondità, riportato nelle sezioni di progetto (vedi Tav. 8). Dall'esame di tali elaborati risulta come lo sviluppo delle cavità carsiche presenti nell'area d'interesse sia prevalentemente verticale, mostrando un rapido approfondimento.

Si precisa che il posizionamento degli ingressi delle cavità carsiche sopra indicate è stato derivato dagli elaborati grafici del progetto di coltivazione approvato e oggi in corso di validità, ottenuti tramite rilievi topografici diretti.

Dalla ricostruzione bidimensionale sopra descritta, si può osservare come tra le aree interessate dal progetto di escavazione e le cavità carsiche vi sia un franco sempre molto elevato, superiore ai 100 metri, salvo in due casi, in cui le gallerie di progetto poste in corrispondenza del limite Nord dell'area estrattiva, si troveranno a una distanza minima di 68 metri dall'Abisso Tarzanelli – Buca Sottostrada. Il franco di sicurezza tra le aree di coltivazione e le cavità carsiche appare del tutto rassicurante.

Di seguito si riportano le schede delle cavità sopra indicate, così come disponibili sul "Catasto delle Grotte" a cura della Federazione Speleologica Toscana.



FEDERAZIONE SPELEOLOGICA TOSCANA - CATASTO GROTTES 1046 T/LU - ABISSO DEI TARZANELLI

Comune: **VAGLI SOTTO** Località: **Valle d'Arnetola** Area carsica: **ALPI APUANE**

Coordinate ingresso UTM WGS84 Fuso 32 (EPSG:32632): **EST 600076 NORD 4883185** CTR: **249120**

Quota Cartografica: **1035 m**

Attendibilità posizione: **1-3 metri** Fonte posizionamento: **Ortofoto Regione Toscana risoluzione 20cm - 2021**

Dislivello positivo: **110 m** Dislivello negativo: **540 m** Dislivello totale: **650 m**

Sviluppo spaziale: **2050 m** Sviluppo planimetrico: **1150 m** Estensione: **360 m**

Caratteristiche ingresso: **Geologia: Marmi** **Morfologia: pozzo** **Idrologia: cavità assorbente** **Meteo:**

Gruppo Catastatore: **Federazione Speleologica Toscana - Commissione Catasto** Anno: **1991**

Ultimo aggiornamento scheda: **03-10-2024**

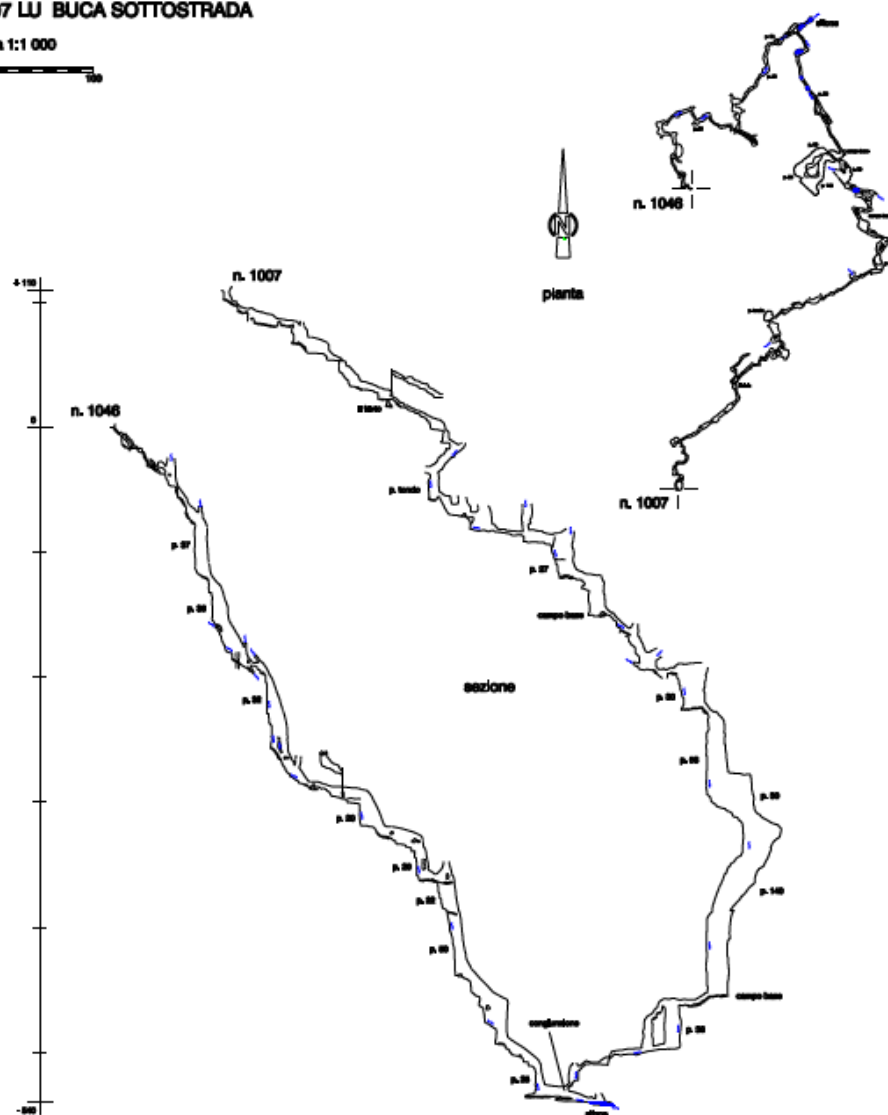
Note: **Ingresso in area di cava, parzialmente ostruito.**

Altri ingressi: **1007 BUCIA SOTTOSTRADA**

1046 LU ABISSO DEI TARZANELLI

1007 LU BUCIA SOTTOSTRADA

scala 1:1 000





FEDERAZIONE SPELEOLOGICA TOSCANA - CATASTO GROTTES 1299 T/LU - BUCA DEL BANCAIO

Comune: **VAGLI SOTTO** Località: **Valle d'Arnetola** Area carsica: **ALPI APUANE**
Coordinate ingresso UTM WGS84 Fuso 32 (EPSG:32632): **EST 600076 NORD 4883223** CTR: **249120**
Quota Cartografica: **1020 m**
Attendibilità posizione: **20-30 metri** Fonte posizionamento: **Carta Tecnica Regionale 1:5000**
Dislivello positivo: **0 m** Dislivello negativo: **180 m** Dislivello totale: **180 m**
Sviluppo spaziale: **m** Sviluppo planimetrico: **m** Estensione: **m**
Caratteristiche ingresso: Geologia: Morfologia: Idrologia: Meteo:
Gruppo Catastatore: **Federazione Speleologica Toscana - Commissione Catasto** Anno: **1996**
Ultimo aggiornamento scheda: **18-03-2021**
Note: **Posizione da verificare. Ingresso in zona di cava, ostruito e non piu' accessibile.**



FEDERAZIONE SPELEOLOGICA TOSCANA - CATASTO GROTTES 1269 T/LU - BUCA DI MAMMA GHIRA Complesso di Arnetola

Comune: **VAGLI SOTTO** Località: **Valle d'Arnetola** Area carsica: **ALPI APUANE**
Coordinate ingresso UTM WGS84 Fuso 32 (EPSG:32632): **EST 600102 NORD 4883078** CTR: **249120**
Quota Cartografica: **1101 m**
Attendibilità posizione: **3-10 metri** Fonte posizionamento: **GPS non Differenziale**
Dislivello positivo: **94 m** Dislivello negativo: **596 m** Dislivello totale: **690 m**
Sviluppo spaziale: **4900 m** Sviluppo planimetrico: **m** Estensione: **m**
Caratteristiche ingresso: Geologia: Morfologia: **pozzo** Idrologia: **cavità assorbente** Meteo: **CU +**
Gruppo Catastatore: **Federazione Speleologica Toscana - Commissione Catasto** Anno: **1995**
Gruppo Revisore: **Gruppo Speleologico Pisano**
Ultimo aggiornamento scheda: **20-01-2026**
Note: **Revisione posizione M. Innocenzi, giugno 2021**
Altri ingressi: **548 ABISSO DELL'ALTO DI SELLA, 643 ABISSO FRANCESCO SIMI, 859 INGRESSO SECONDO DEL SIMI, 860 INGRESSO TERZO DEL SIMI**

In ogni caso sono stati previsti una serie di accorgimenti e di modalità operative finalizzate a eliminare ogni possibile interazione negativa tra l'acquifero e le attività di coltivazione.

Con l'avanzare della coltivazione, i casi che si possono verificare sono essenzialmente di due tipi: intercettazione di grosse cavità carsiche, ad oggi del tutto sconosciute anche agli esperti della FST, con caratteristiche tali da poter essere accatastate secondo le indicazioni di cui al documento "CONDIZIONI PER L'INSERIMENTO DI NUOVE CAVITÀ NEL CATASTO" emesso dalla Società Speleologica Italiana, oppure intercettazione di piccole cavità prive di circolazione d'aria e con modeste profondità.

Nel primo caso saranno adottate le seguenti misure:

- interruzione immediata della coltivazione nella zona dove è stata rinvenuta la cavità;
- realizzazione di barriera protettiva con materiale a bassa permeabilità atta ad impedire il confluire delle acque verso la cavità;
- inibizione dell'accesso a persone e mezzi mediante apposizione di barriere fisiche;
- segnalazione del rinvenimento della cavità agli enti di controllo (Comune, Parco delle Apuane, Arpat);
- affidamento incarico ad esperto geologo e biologo/naturalista per la valutazione delle caratteristiche effettive, sia sotto il profilo dell'eventuale interesse speleologico della cavità, che di quello idrogeologico;
- definizione sulla base degli esiti dello studio di cui al punto sopra delle misure di salvaguardia della cavità e attuazione delle stesse;
- eventuale modifica e adeguamento del piano di coltivazione.

Nel secondo caso (cavità palesemente priva di interesse speleologico e idrogeologico), saranno adottate le seguenti procedure: realizzazione di una barriera perimetrale in materiale a bassa permeabilità che impedisca il recapito all'interno della cavità, anche accidentale, delle acque utilizzate per i tagli al monte, in associazione, si può operare una sigillatura della cavità con idonei materiali (per es. cementazione con materiali elastici o con tendenza ad espandersi).

Si tiene a precisare che gli interventi sopra indicati sono conformi alle “indicazioni gestionali/misure di mitigazione” riportate negli INDIRIZZI E MISURE DI MITIGAZIONE PER LE CRITICITÀ AMBIENTALI del Piano Regionale Cave.

L'attivazione delle sopra indicate procedure è nelle responsabilità del “Direttore dei lavori di coltivazione e di risistemazione”, nominato ai sensi della L.R. 35/15.

Le misure sopra descritte, oltre ad essere del tutto in linea, come già specificato, con le indicazioni del Piano Regionale Cave, rispondono perfettamente anche alle indicazioni di cui al PIT per le invarianti strutturali relativamente ai sistemi morfogenetici (Dorsale Carbonatica – DOC), che indicano come azione principale quella di prevenire l'interferenza tra le attività estrattive e i sistemi carsici ipogei. Infatti, l'immediata sigillatura di ogni frattura che mostri evidenti segni di circolazione idrica rappresenta l'unica azione di prevenzione possibile per evitare la possibile interferenza. La sigillatura, infatti, è un'operazione che si può eseguire in tempi molto rapidi, con l'utilizzo di materiale di basso costo, facilmente reperibile sul mercato e che sarà sempre disponibile in cava e può essere operata direttamente dal personale della cava stessa, senza difficoltà operative. Si ritiene, pertanto, che la tempestività, praticità e velocità di esecuzione delle operazioni di sigillatura incarnino meglio

di ogni altro, con l'ovvia esclusione della cosiddetta "opzione zero", il concetto di "prevenzione" espresso dal PIT. In ogni caso, si deve far presente che l'invariante strutturale del PIT relativa ai sistemi morfogenetici – Dorsale Carbonatica DOC – riguarda gran parte delle Alpi Apuane e moltissime aree con destinazione estrattiva.

Si ritiene, in ogni caso, opportuno che, con cadenza quadrimestrale, sia effettuata apposita verifica, da parte di professionista qualificato, sulla presenza di eventuali fratture e/o cavità con evidenti segni di circolazione idrica eventualmente intercettate con la coltivazione e sulle attività di protezione eventualmente svolte.

Infine si ritiene opportuno che a) in corrispondenza dei luoghi di lavorazione in cui si utilizzi acqua, debba essere realizzato un idoneo sistema di raccolta e convogliamento della medesima tramite canalette e tubazioni in materiale idoneo a prevenire infiltrazioni di marmettola nelle fratture presenti; dovrà in ogni caso essere evitata la dispersione del materiale fine derivante dalla coltivazione; b) debbano, comunque, essere effettuate analisi chimiche semestrali delle acque che scorrono all'esterno della zona di imbocco e dei piazzali di lavoro, come previsto dal documento PR12 allegato al PRC; c) siano caratterizzate due volte l'anno le AMD successive alle AMPP in uscita dall'impianto e i sedimenti presenti nel punto di uscita delle stesse AMD secondo i parametri proposti nel PMA, a cui si rimanda.

3 - PERICOLOSITÀ E FATTIBILITÀ GEOLOGICA CON RIFERIMENTO AL PABE PALLERINA, AL PAI DISSESTI, PGRA E PGA

Come ampiamente riferito sopra, il piano di coltivazione che la presente relazione illustra ed accompagna è stato redatto tenendo conto anche di quanto previsto dal PABE del Bacino Pallerina.

Tra i vari elaborati che compongono il suddetto PABE vi sono anche gli studi e le indagini geologico-tecniche ai sensi del Regolamento 53/R, corredati di carte di pericolosità geologica, geomorfologica, idraulica e sismica (cfr. Tav. 2.2).

Dall'esame delle normative vigenti in tema di assetto geologico-geotecnico, idrogeologico e idraulico si può rilevare come l'area in esame risulti classificata come di seguito per quanto riguarda il P.A.B.E. Di Pallerina:

Carta della pericolosità geologica e idraulica:

Classe G3a e G3b - pericolosità geologica elevata;

Classe I1 – pericolosità idraulica bassa

Carta della pericolosità sismica: Classe S3a e S3b - pericolosità sismica elevata;

Carta del reticolo idraulico (L.R. 79/2012 e Del C.R. 1357/2017); l'area di intervento è posta ad una distanza superiore ai 10 m rispetto ai corsi d'acqua.

Dalle cartografie a disposizione del P.A.B.E. non sono presenti in un intorno significativo dell'area in esame e comunque non interferenti con il progetto, altri vincoli e limitazioni, tipo sorgenti e creste di valore paesaggistico.

Per la definizione della fattibilità dell'intervento si fa riferimento alle N.T.G. e relativi abachi di correlazione pericolosità-fattibilità:

Una volta che sono state definite le pericolosità geologiche s.l. è possibile, attraverso l'apposita scheda di fattibilità, andare ad individuare, a seconda delle tipologie di intervento, le relative fattibilità.

PERICOLOSITA'		Pericolosità geologica			Pericolosità idraulica (trasparentesi le pericolosità del Distretto Appennino Settentrionale)				Pericolosità sismica (desunta da Carta degli elementi geologici con rilevanza sismica)			
Tipologia interventi		G2	G3	G4	I1	I2 (I1) Tr >500	I3 (I2) Tr 200	I4 (I3) Tr 30	S1	S2	S3	S4
FATTIBILITA'	1) piazzali di cava	FG3	FG3	FG4	FI1	FI1	FI2	FI2	FS1	FS1	FS1	FS1
	2) nuovi fronti di coltivazione a cielo aperto e scarpate naturali connesse	FG3	FG3	FG4	FI1	FI1	FI2	FI2	FS1	FS1	FS3	FS3
	3) nuovi ingressi in galleria	FG3	FG3	FG4	FI1	FI1	FI2	FI2	FS1	FS2	FS3	FS3
	4) escavazione in sotterraneo	FG3	FG3	FG4	FI1	FI1	FI2	FI2	FS1	FS1	FS3	FS3
	5) area di stoccaggio temporaneo di materiali da taglio per uso ornamentale ¹ , come definiti dall'art. 2, comma 1, lett. c, punto 2.1 della LR 35/2015)	FG2	FG3	FG4	FI1	FI1	FI3	FI4	FS1	FS1	FS1	FS1
	6) area di stoccaggio temporaneo di derivati del materiale da taglio per uso ornamentale ² , come definiti all'art.2, comma 1, lett. c, punto 2.2 della LR 35/2015.	FG2	FG3	FG4	FI1	FI1	FI3	FI4	FS1	FS1	FS1	FS1
	7) area di stoccaggio temporaneo di materiale secondario di lavorazione utilizzabili in altri cicli produttivi, ovvero "sottoprodotti" ³ da destinare al mercato, dichiarati tali nelle autorizzazioni rilasciate ai sensi della L. 78/08	FG2	FG3	FG4	FI1	FI1	FI3	FI4	FS1	FS1	FS1	FS1
	8) area di stoccaggio temporaneo di scarti/rifiuti (?) di lavorazione di cave per uso ornamentale utilizzati temporaneamente in cava ⁴ (D.lgs 117/2008)	FG2	FG3	FG4	FI1	FI1	FI3	FI4	FS1	FS1	FS1	FS1
	9) area di stoccaggio temporaneo di rifiuti di lavorazione di cave per uso ornamentale da inviare ad impianti di recupero o a smaltimento ⁵ (D.Lgs.152/2006)	FG2	FG3	FG4	FI1	FI1	FI3	FI4	FS1	FS1	FS1	FS1
	10) aree per installazione impianti e/o fabbricati di servizio	FG2	FG3	FG4	FI1	FI1	FI3	FI4	FS1	FS2	FS3	FS3
	11) aree per installazione strutture mobili di servizio all'attività estrattiva	FG2	FG2	FG4	FI1	FI1	FI3	FI4	FS1	FS1	FS1	FS2
	12) aree da destinarsi a bacini raccolta acque	FG2	FG3	FG4	FI1	FI1			FS1	FS1	FS1	FS2

PAI Dissesti

Con riferimento al PAI Dissesti, risulta che tutte le previsioni progettuali ricadono, come indicato nell'apposita tavola grafica (vedi Tav.2.3), parzialmente all'interno delle aree individuate a pericolosità geomorfologica P3a - elevata

Si attesta, inoltre, che non sono previsti interventi edilizi e/o modifiche alle opere edilizie esistenti soggette a parere della Autorità di bacino, che non sono previsti interventi di bonifica e di sistemazione dei movimenti franosi in aree a pericolosità da frana elevata P3 e/o molto elevata P4.

Si attesta, fatte salve le modifiche originate dall'attività di escavazione prevista nel presente progetto, che non sono previste modifiche significative al sistema di regimazione delle acque né significative variazioni morfologiche, ricadenti nella cartografia di PAI in aree a pericolosità da frana elevata P3 e/o molto elevata P4.

Piano di Gestione del rischio di Alluvioni 2021 – 2027 - PGRA

All'interno della Tav. 2.3, quadro D, è riportata la sovrapposizione tra le previsioni progettuali e le aree a pericolosità idraulica come definite dal PGRA, da cui risulta che non ci sarà alcuna interferenza con le aree a pericolosità da alluvione.

Piano di Gestione delle Acque 2021 – 2027 - PGA

Per quanto riguarda il PGA 2021-2027, si rimanda alla Tav. 2.3, quadri B e C, dove è riportata la sovrapposizione tra le previsioni progettuali e le perimetrazioni del PGA. In particolare, all'interno del quadro C è riportato il riferimento ai corpi idrici superficiali e nel quadro B, quello ai corpi idrici sotterranei.

Per quanto riguarda i corpi idrici sotterranei, l'area di cava Colubraia ricade nel CORPO IDRICO CARBONATICO METAMORFICO DELLE ALPI APUANE, nel "*Fissured aquifers including karst - highly productive*", stato quantitativo "*buono*", stato chimico "*buono*".

Relativamente ai Corpi Idrici Superficiali, l'area di cava non è interessata da alcun corpo idrico superficiale; a valle dell'area di cava si trova il Fosso Tambura, che è classificato con stato ecologico "*buono*" e stato chimico "*buono*", stato di naturalità "*natural*", con assenza di connessione a corpi idrici sotterranei e al di fuori delle condizioni di criticità ai sensi della D.G.R. Toscana num. 894 del 2016-09-13, come risulta dalla scheda di seguito riportata, estratta dal PGA.

Dati generali

Codice:	IT09R019SE332FI
Nome:	FOSSO TAMBURA
Regione:	Toscana
Ambito territoriale:	Serchio
Codice locale:	IT09R019SE332fi
Type code:	10IN7N
Categoria:	RW
Transfrontaliero:	No
Serbatoio:	None
Intercalibration type:	RW-R-M5 - Mediterranean, small, Mediterranean temporary
Descrizione:	None
Disponibilità del bilancio idrico:	None
Note al bilancio idrico:	None

Naturalità:	Natural	
Stato ecologico:	2 Buono	(Si veda il tab 'Stati di qualità ed obiettivi' per maggiori dettagli)
Stato chimico:	2 Buono	(Si veda il tab 'Stati di qualità ed obiettivi' per maggiori dettagli)
Intrusione salina:	None	
Connessione a corpi idrici sotterranei:	No	(Si veda il tab 'GWB' per maggiori dettagli)
Corpo idrico in condizione di criticità ai sensi della D.G.R. Toscana num. 894 del 2016-09-13:	No	

4 –CARATTERIZZAZIONE GEOSTRUTTURALE

In relazione alle condizioni di accessibilità dei fronti di coltivazione residui e degli attuali cantieri di coltivazione (cantiere inferiore di quota ca 990 m slm – cantiere intermedio di quota ca 1038 m slm – cantiere superiore con quote comprese tra 1048-1058 m slm) è stato condotto un aggiornamento dei dati geostrutturali relativi allo stato di fratturazione dell'ammasso roccioso oggetto di coltivazione.

I dati pregressi disponibili ricavati dalla TAV.9 – CARTA DELLA FRATTURAZIONE e dalla RELAZIONE GEOMECCANICA (anno 2021) a firma del GEOL. Z. GIACOMELLI e del GEOL. B. FORFORI sono stati quindi integrati con dati raccolti nell'ambito di nuove attività di rilevamento geostutturale e geomeccanico condotte tra la fine del 2025 e inizio del 2026.

Al fine di caratterizzare l'ammasso roccioso sotto il profilo geomeccanico, per ciascuna discontinuità individuata, oltre la giacitura (annotazione dip/dip-direction), sono stati rilevati una serie di parametri strutturali in accordo con le norme ISRM-78 (con alcune modifiche):

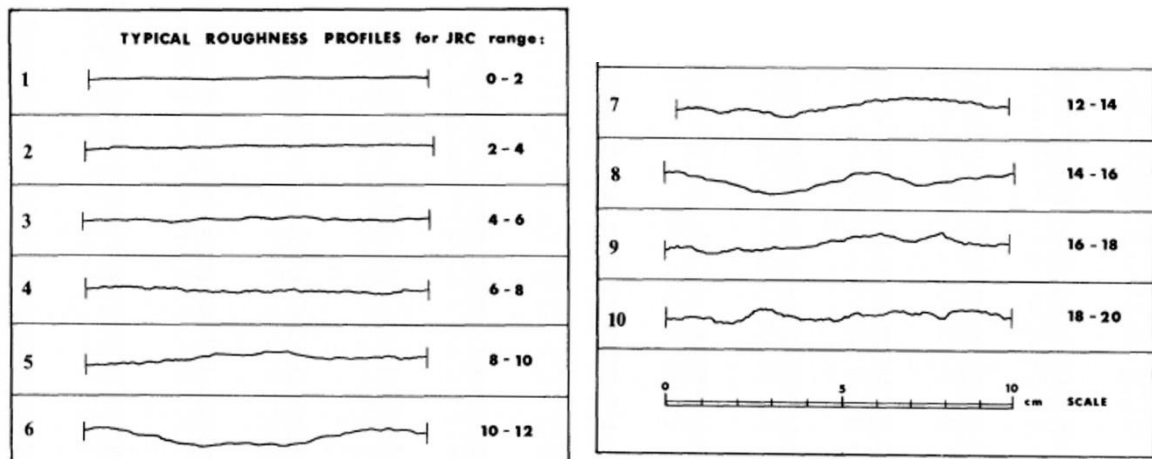
Spaziatura: distanza tra due discontinuità appartenenti allo stesso set misurata lungo la direzione di analisi.

Persistenza: distanza (lunghezza) di una discontinuità misurata tra i due estremi della traccia della frattura.

CLASSE	SPAZIATURA (m)	CLASSE	PERSISTENZA (m)
<i>Estremamente stretta</i>	<i><0.02</i>	<i>Molto bassa</i>	<i><1</i>
<i>Molto stretta</i>	<i>0.02-0.06</i>	<i>Bassa</i>	<i>1-3</i>
<i>Stretta</i>	<i>0.06-0.2</i>	<i>Media</i>	<i>3-10</i>
<i>Moderata</i>	<i>0.2-0.6</i>	<i>Alta</i>	<i>10-20</i>
<i>Larga</i>	<i>0.6-2</i>	<i>Molto alta</i>	<i>>20</i>
<i>Molto larga</i>	<i>2-6</i>		
<i>Estremamente larga</i>	<i>>6</i>		

TERMINOLOGIA CLASSI DI SPAZIATURA E PERSISTENZA

Scabrezza (o rugosità): asperità a scala millimetrica/centimetrica delle superfici di discontinuità misurata mediante l'utilizzo del "pettine di Barton". Espressa mediante il parametro JRC il quale consente, attraverso criteri empirici, di ricavare la resistenza al taglio delle discontinuità.



PROFILI DI RUGOSITÀ E VALORI PARAMETRO JRC

Resistenza: resistenza a compressione uniassiale delle pareti del giunto (JCS) (o valutazione speditiva della resistenza a compressione uniassiale della roccia) ottenuta mediante l'utilizzo di uno sclerometro per roccia (Martello di Schmidt). Seguendo le indicazioni dell'ISRM, sulle superfici di frattura esposte sono effettuate una serie di 10 misure. Successivamente sono selezionate le cinque

misure aventi valore più alto e quindi calcolata la media aritmetica. Ciascuna misura fornisce l'indice di rimbalzo della molla R, direttamente leggibile su una scala aritmetica posta sullo strumento. Il valore ottenuto è normalizzato tenendo conto dell'angolo formato dall'inclinazione dello strumento e l'orizzontale. Il parametro JCS consente, attraverso criteri empirici, di ricavare la resistenza al taglio delle discontinuità.

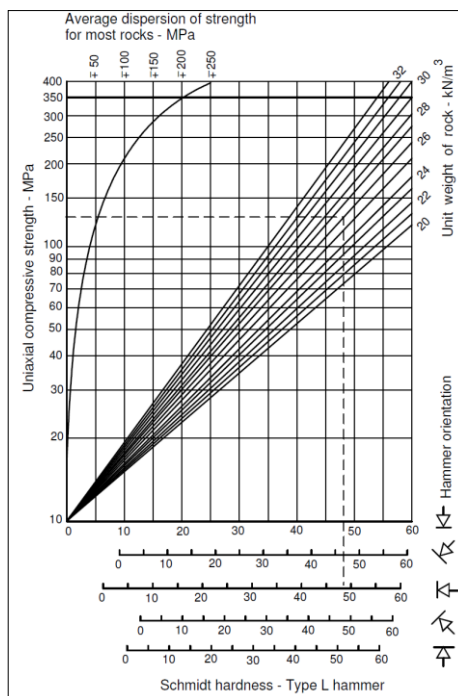


DIAGRAMMA DI CORRELAZIONE R'-JCS

Apertura: distanza ortogonale tra le pareti della discontinuità.

CLASSE	APERTURA (mm)
Very closed (Serrata)	<0.1
Closed (Chiusa)	0.1-0.25
Partly Closed (parzialmente Chiusa)	0.25-0.50
Open (Aperta)	0.50-2.50
Moderately wide (Moderatamente larga)	2.50-10.0
Wide (Larga)	>10.0

TERMINOLOGIA CLASSI DI APERTURA

Riempimento: natura di eventuale materiale di riempimento presente lungo una superficie di discontinuità aperta (Hard infilling vs Soft infilling).

Condizioni idrauliche: valutazione della presenza di circolazione idrica lungo le discontinuità (Dry – Damp – Wet – Dripping – Flowing).

Classificazione ammasso roccioso

Al fine di classificare dal punto di vista geomeccanico l'ammasso roccioso affiorante in corrispondenza delle stazioni di misura effettuate i dati geostrutturali e geomeccanici raccolti sono stati elaborati attraverso l'applicazione del sistema di classificazione Rock Mass Rating (RMR) system (Bieniawski, 1973).

Questo metodo di classificazione conosciuto come Rock Mass Rating (RMR) system fu introdotto per la prima volta da Bieniawski nel 1973 e fu successivamente modificato dallo stesso autore nel 1974 (RMRbasic), 1975, 1976, e nel 1989 (RMR89).

In questo metodo vengono utilizzati i seguenti 6 parametri principali:

1. Resistenza a compressione uniassiale della roccia intatta;
2. Rock Quality Designation (RQD);
3. Spaziatura dei set di discontinuità;
4. Condizioni fisico-meccaniche delle discontinuità;
5. Condizioni idrauliche delle discontinuità;
6. Relazione tra orientazione dei set di discontinuità e fronti di scavo.

A questi parametri viene assegnato un determinato punteggio (vedi TABELLA) e dalla somma dei punteggi (A1, A2, A3, A4, A5, B) ottenuti per ogni parametro viene calcolato il valore dell'indice RMR89:

$$RMR_{89} = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + B = RMR_{basic} + B$$

Dove:

A1 = punteggio relativo alla resistenza a compressione uniassiale della roccia intatta;

A2 = punteggio relativo al valore dell'indice RQD;

A3 = punteggio relativo alla spaziatura media dei set di discontinuità;

A4 = punteggio relativo alle condizioni fisico-meccaniche delle discontinuità;

A5 = punteggio relativo alle condizioni idrauliche delle discontinuità;

B = punteggio relativo all'orientazione delle discontinuità rispetto ai fronti di scavo.

In base al valore dell'indice RMR₈₉ ottenuto l'ammasso viene classificato in una delle 5 classi previste (vedi TABELLA), inoltre per ogni classe individuata è riportata una valutazione della qualità e della stabilità dell'ammasso.

INPUT PARAMETERS TO RMR₁₉₈₉
(from Bieniawski, 1989)

PARAMETER			Range of values // RATINGS				
1	Strength of intact rock material	Point-load strength index	> 10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	For this low range uniaxial compr. strength is preferred
		Uniaxial compressive strength	> 250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa 1 - 5 MPa < 1 MPa
	RATING		15	12	7	4	2 1 0
2	Drill core quality RQD		90 - 100%	75 - 90%	50 - 75%	25 - 50%	< 25%
	RATING		20	17	13	8	5
3	Spacing of discontinuities		> 2 m	0.6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm
	RATING		20	15	10	8	5
4	Condition of discontinuities	Length, persistence	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m
		RATING	6	4	2	1	0
		Separation	none	< 0.1 mm	0.1 - 1 mm	1 - 5 mm	> 5 mm
		RATING	6	5	4	1	0
		Roughness	very rough	rough	slightly rough	smooth	slickensided
		RATING	6	5	3	1	0
		Infilling (gouge)	none	Hard filling		Soft filling	
			-	< 5 mm	> 5 mm	< 5 mm	> 5 mm
		RATING	6	4	2	2	0
		Weathering	unweathered	slightly w.	moderately w.	highly w.	decomposed
		RATING	6	5	3	1	0
5	Ground water	Inflow per 10 m tunnel length	none	< 10 litres/min	10 - 25 litres/min	25 - 125 litres/min	> 125 litres /min
		p_w / σ_1	0	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5
		General conditions	completely dry	damp	wet	dripping	flowing
		RATING	15	10	7	4	0

p_w = joint water pressure; σ_1 = major principal stress

RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATIONS

		Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very unfavourable
RATINGS	Tunnels	0	-2	-5	-10	-12
	Foundations	0	-2	-7	-15	-25
	Slopes	0	-5	-25	-50	-60

ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RATINGS

Rating	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20
Class No.	I	II	III	IV	V
Description	VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR

MEANING OF ROCK MASS CLASSES

Class No.	I	II	III	IV	V
Average stand-up time	10 years for 15 m span	6 months for 8 m span	1 week for 5 m span	10 hours for 2.5 m span	30 minutes for 1 m span
Cohesion of the rock mass	> 400 kPa	300 - 400 kPa	200 - 300 kPa	100 - 200 kPa	< 100 kPa
Friction angle of the rock mass	< 45°	35 - 45°	25 - 35°	15 - 25°	< 15°

Criterio di rottura (resistenza) ammassi rocciosi

I principali parametri di resistenza dell'ammasso roccioso sono stati definiti mediante l'applicazione del criterio di rottura di Hoek & Brown, introdotto per la prima volta nel 1980 e successivamente più volte modificato (1988, 1991, 1992).

Il criterio di rottura di Hoek & Brown si basa sul valore dell'indice GSI Geological Strength Index (GSI; Hoek, 1994; Hoek, Kaiser and Bawden, 1995) che combinato con le proprietà della roccia intatta (i.e. valore di resistenza a compressione uniassiale σ_c e valore del parametro m_i) permette di stimare la riduzione della resistenza dell'ammasso roccioso in relazione alle differenti condizioni geologico-strutturali.

Tale determinazione si ottiene per mezzo della relazione seguente:

$$\sigma_{cm} = (0.0034 \text{ mi } 0.8) \sigma_c [1.029 + 0.025 \text{ e } (-0.1 \text{ mi})] \text{ GSI}$$

L'involuppo di rottura è espresso dalla seguente equazione:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + (m \sigma_c \sigma_3 + s \sigma_c^2)^a$$

dove: σ_c = resistenza a compressione uniassiale della roccia intatta (MPa); m = parametro sperimentale che definisce l'incremento di resistenza della roccia all'aumentare della tensione di confinamento. Si indica con m_i nel caso in cui il criterio di rottura faccia riferimento alla roccia intatta, con m se questo si riferisce all'ammasso roccioso. In questo secondo caso il coefficiente può assumere valori di picco m_p e residui m_r ; s = parametro sperimentale che definisce la posizione dell'involuppo di Hoek - Brown. Il suo valore è unitario nel caso in cui il criterio faccia riferimento alla roccia intatta. Se il criterio si riferisce all'ammasso roccioso, si assumono valori di picco s_p e residui s_r ; a = esponente dell'involuppo di rottura, pari a 0.5 per la roccia intatta.

Le formule che legano i parametri di Hoek-Brown per la roccia intatta a quelli relativi all'ammasso roccioso sono le seguenti:

$$m_p = m_i \cdot \exp((\text{GSI}-100)/(28-14D))$$

$$m_r = 0.7m_p$$

$$s_p = \exp((\text{GSI}-100)/(9-3D))$$

$$s_r = 0.04s_p$$

$$a = 0.5 + 1/6 \cdot (\exp(-\text{GSI}/15) - \exp(-20/3))$$

in cui:

$$\text{GSI} = \text{RMR}_{89} - 5$$

$$D = \text{parametro di danneggiamento dell'ammasso roccioso}$$

Partendo dal valore numerico ricavato dalla classificazione di Bieniawski (RMR - 1989), si può quindi ottenere il parametro denominato GSI (Geological Strength Index), introdotto da Hoek (1994). Il procedimento per arrivare a calcolare l'indice GSI consiste nell'attribuire al parametro R5 di Bieniawski il valore di 15 (ovvero condizioni asciutte) e nell'azzerare il valore del parametro R6 d'orientazione delle discontinuità. In questo modo è possibile ottenere il parametro BMR89 da cui si ricava il valore di GSI attraverso la seguente formula:

$$\text{GSI} = \text{BMR}_{89} - 5 \quad (\text{valida per } \text{GSI} > 25 \text{ e } \text{BMR}_{89} > 30)$$

Anche il modulo elastico dell'ammasso roccioso è stato valutato a partire dall'indice GSI, adottando le seguenti formulazioni empiriche:

$$E = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} \cdot 10^{(GSI-10)/40} \text{ [GPa]} \quad \text{nel caso in cui la resistenza } \sigma_c < 100 \text{ MPa}$$

$$E = \left(1 - \frac{D}{2}\right) 10^{(GSI-10)/40} \text{ [GPa]} \quad \text{nel caso in cui la resistenza } \sigma_c > 100 \text{ MPa}$$

I parametri di resistenza dell'ammasso roccioso previsti dal criterio di Hoek & Brown (2002) sono stati quindi calcolati attraverso l'utilizzo del software RocLab version 1.031 (www.rocscience.com).

Criterio di rottura (resistenza) discontinuità

L'involuppo della resistenza di picco lungo una discontinuità naturale può essere descritto mediante il criterio di Barton (1973). Tale criterio è stato proposto per descrivere la resistenza al taglio disponibile lungo una singola superficie di discontinuità scabra in materiale roccioso duro e fragile (Barton, 1973; 1976; Barton & Bandis, 1990; Barton e Choubey, 1977) ed è espresso dalla seguente equazione valida alla scala del laboratorio:

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan \left(\phi_b + JRC_0 \cdot \log \left(\frac{JCS_0}{\sigma_n} \right) \right)$$

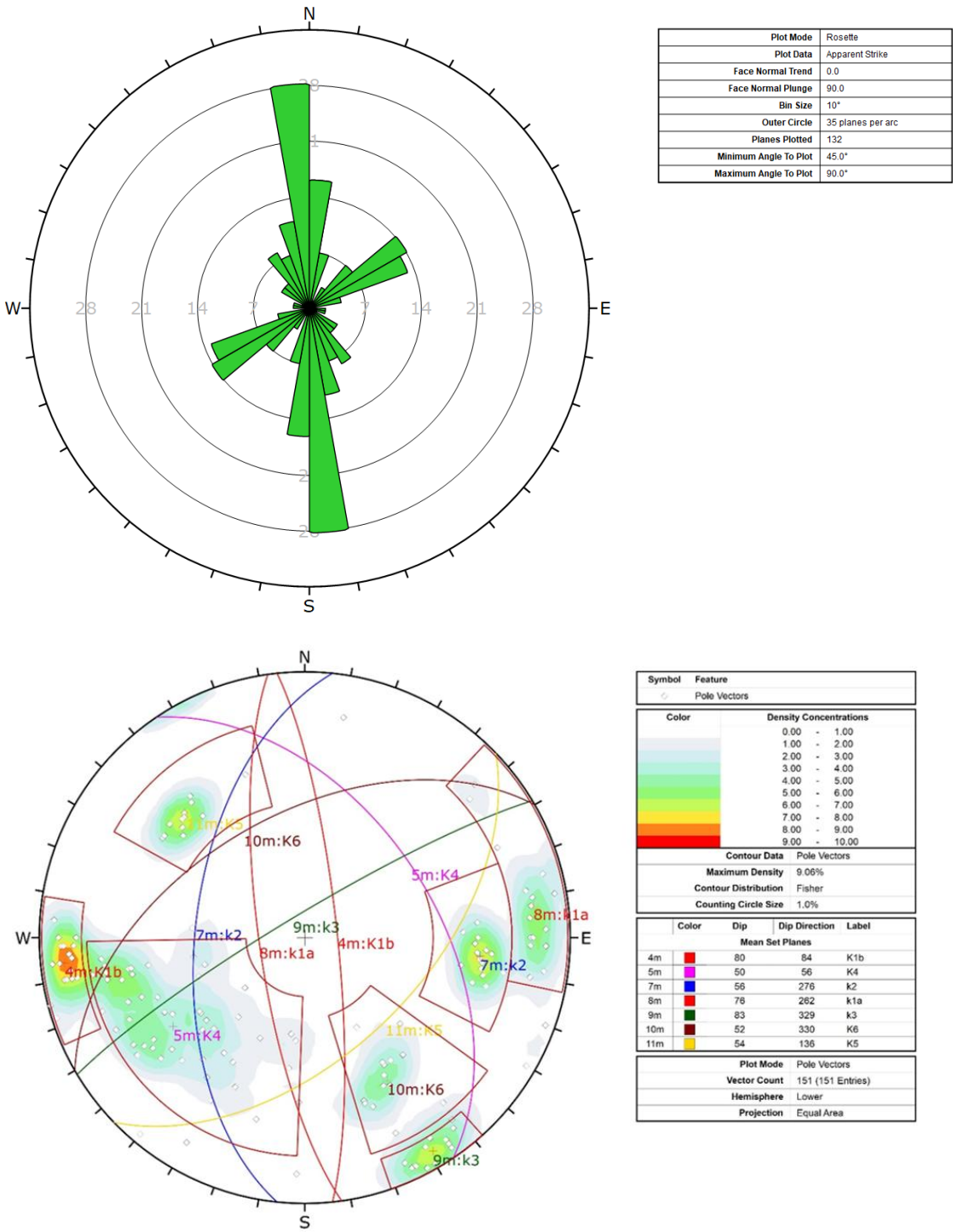
dove: JRC_0 = (Joint Roughness Coefficient) scabrezza della superficie di discontinuità, valutata in laboratorio confrontando il profilo di scabrezza, rilevato nella direzione dello spostamento, con i profili standard (Barton, 1973), JCS_0 = (Joint Compression Strength) resistenza a compressione della superficie di discontinuità; per superfici integre $JCS_0 = \sigma_c$ (resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta); (ϕ_b) = angolo di resistenza al taglio di base da determinarsi mediante prove su superfici piane e lisce.

La formula sopra riportata esprime il legame $\tau - \sigma$ attraverso la tangente dell'angolo di resistenza al taglio (angolo di attrito di picco ϕ_p) a sua volta funzione (vedi espressione in parentesi) della somma di due contributi: l'angolo di attrito di base (ϕ_b) e la scabrezza JRC_0 . Elevati valori della tensione normale efficace (σ'_n) inibiscono il termine relativo alla scabrezza. In teoria, quando $\sigma'_n = JCS_0$, ovvero quando lo sforzo normale efficace eguaglia o supera la resistenza a compressione monoassiale, il contributo dovuto alla scabrezza risulta nullo e l'equazione in esame si riduce alla seguente espressione (Barton, 1976):

$$\tau = \sigma_n \cdot \tan(\phi_b)$$

Principali set di discontinuità e loro caratteristiche

L'elaborazione statistica dei dati complessivi disponibili (tot. n.151 misure) ha permesso di individuare 6 principali set di discontinuità corrispondenti a 7 principali raggruppamenti (clusters) dei poli dei piani di frattura, denominati, rispettivamente: K1a/K1b, K2, K3, K4, K5 e K6.



**DIAGRAMMA A ROSA, STEREONET DEI POLI DELLE FRATTURE, ISODENSE E TRACCE
CICLOGRAFICHE DEI PRINCIPALI SET INDIVIDUATI**

PRINCIPALI SET DI FRATTURE – FOSSA DEI TOMEI					
	SET Sub-SET	dip/dip- direction	n.Fratture	n.Fratture tot.	Frequenza %
K1	K1.a	76/262	18	36	24
	K1.b	80/084	18		
K2	-	56/277	15	15	10
K3	-	83/329	14	14	9
K4	-	50/056	50	50	34
K5	-	54/136	13	13	8
K6	-	52/330	15	15	10
Altre fratture				8	5

TABELLA DI SINTESI ANALISI STATISTICA

Le discontinuità del set K1 (K1a e K1b) sono rappresentate da fratture da aperte a moderatamente larghe, persistenti (10-20 m) e con spaziatura variabile, rientrante in generale nelle classi 0.6-2 m, 2-6 m e >6 m, e JCR rientrante nella tipologia delle classi 2-4 e 4-6 e l'apertura .

Il set K2 è rappresentato da fratture aperte, da persistenti (10-20 m) a molto persistenti (> 20 m) con spaziatura rientrante nelle classi 0.6-2 m e 2-6 m e JCR prevalente della classe 4-6.

Il set K3 è rappresentato da fratture parzialmente aperte o aperte, con persistenza da media (3-10 m) ad alta (10-20 m), spaziatura moderata o larga (classi 0.6-2 m e 2-6 m) e JCR rientrante nella tipologia delle classi 2-4 e 4-6.

Il set K4 è rappresentato da fratture parzialmente aperte o aperte, persistenti (10-20 m), con spaziatura prevalentemente larga (classe 2-6 m) e JCR ascrivibile alla classe 6-8. Il set K4 risulta subparallelo alla foliazione metamorfica principale Sp.

Il set K5 è rappresentato da fratture chiuse, da mediamente persistenti (3-10 m) a persistenti (10-20 m), con spaziatura variabile, rientrante in generale nelle classi 0.6-2 m, 2-6 m e >6 m e JCR ascrivibile alle classi 4-6 e 2-4.

Infine il set K6, caratterizzato da orientazione simile a K3 (immergente verso Nord Ovest) ma inclinazione media minore (ca 50°), è rappresentato da fratture aperte, da mediamente persistenti (3-10 m) a persistenti (10-20 m), con spaziatura prevalentemente larga (classe 2-6 m) e JCR ascrivibile alle classi 4-6 e 2-4.

Di seguito sono riportate alcune osservazioni relative all'assetto strutturale delle aree e fronti residui interessati dalle coltivazioni a cielo aperto ed in sotterraneo previste dal piano (cantiere inferiore localizzato nella porzione nord-occidentale dell'area in disponibilità e cantiere superiore localizzato nella porzione meridionale).

Cantiere Inferiore

L'area si caratterizza per la presenza di una zona di tecchia che si sviluppa in direzione ca N-S per un dislivello complessivo di ca 50-60 m.

La tecchia mostra alcuni tratti aggettanti determinati da fratture esposte e molto persistenti (> 20 m) appartenenti al set K2 (discontinuità sub-verticali immergenti verso NW)

In particolare è possibile individuare n. 4 principali discontinuità del K2 tra di loro sub-parallele (si veda TAV. 7 - CARTA DELLE FRATTURE) .

Così come riportato nella documentazione tecnica presentata a supporto del piano vigente, a seguito di specifico rilievo in parete sono state verificate le discontinuità che con immersione a NE tagliavano le strutture principali sopra descritte. Tali discontinuità presentano immersione in direzione NE, risultando scrivibili al sistema K4, definendo comunque volumetrie "incastrate" all'interno dell'ammasso in direzione NW e continue in direzione N-S. Le strutture maggiori sono state oggetto di verifica visiva e non hanno evidenziato segni di movimento. Volumi isolati definiti dai sistemi K2 (si veda fratture A-B-C e similari nella seguente immagine) e K4, in parte isolate da vecchi tagli di coltivazione sono state oggetto di disaggio meccanico (martinetto e cuscini idraulici) nell'ottobre 2018.

Si evidenzia che la zona di tecchia, a seguito dell'approvazione della precedente variante a volume zero, nel periodo luglio-agosto 2019, è stato interessato da un intervento di pulizia e disaggio a cui sono seguiti interventi di consolidamento e messa in sicurezza da parte della ditta Vertical Services.



PANORAMICA DELLA TECCHIA CHE DELIMITA VERSO EST IL CANTIERE INFERIORE
DISCONTINUITA' PRINCIPALI SET K2 (linee celeste) E DEL SET K4 (linee marroni)

Cantiere Superiore

Gli elementi strutturali di rilievo in quest'area sono ben visibili lungo l'intero sviluppo della tecchia orientata ca E-W e avente un'altezza variabile tra 30 e 50 m e sono rappresentati da una serie di fratture ad elevata persistenza (>20m) che immergono sia verso E-NE con inclinazione da media (ca 50- 60°) ad alta (ca 80°) ed appartenenti ai set K1b e K4, sia verso NW con inclinazione da media (ca 50- 60°) ad alta (ca 80°) ed appartenenti ai set K3 e K6.



PANORAMICA DELLA TECCHIA CHE DELIMITA VERSO SUD IL CANTIERE SUPERIORE
EVIDENZIATE ALCUNE DELLE DISCONTINUITA' APPARTENENTI AI SET K1b e/o K4 (linee
arancioni) e K3 e/o K6 (linee verdi) E DEL SET

Classificazione e parametrizzazione geomeccanica dell'ammasso

Dall'analisi complessiva delle caratteristiche geometriche e meccaniche delle fratture rilevate nell'ambito dell'approfondimento di studi svolto a supporto del nuovo piano di coltivazione si osserva una sostanziale corrispondenza con i risultati ottenuti relativamente alla caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso roccioso e alla parametrizzazione dei set di fratturazione presenti riportata nella RELAZIONE GEOMECCANICA (anno 2021) a firma del GEOL. Z. GIACOMELLI e del GEOL. B.FORFORI.

Si riportano quindi, per l'ammasso roccioso in esame, i punteggi dei 6 parametri previsti dal metodo RMR89 assegnati nel precedente studio citato ed aggiornati in base ai dati integrativi raccolti:

INPUT PARAMETERS TO RMR₁₉₈₉
(from Bieniawski, 1989)

PARAMETER			Range of values // RATINGS						
1	Strength of intact rock material	Point-load strength index	> 10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	For this low range uniaxial compr. strength is preferred		
		Uniaxial compressive strength	> 250 MPa	100 - 250 MPa	50 - 100 MPa	25 - 50 MPa	5 - 25 MPa	1 - 5 MPa	< 1 MPa
	RATING		15	12	7	4	2	1	0
2	Drill core quality RQD		90 - 100%	75 - 90%	50 - 75%	25 - 50%	< 25%		
	RATING		20	17	13	8	5		
3	Spacing of discontinuities		> 2 m	0.6 - 2 m	200 - 600 mm	60 - 200 mm	< 60 mm		
	RATING		20	15	10	8	5		
4	Condition of discontinuities	Length, persistence	< 1 m	1 - 3 m	3 - 10 m	10 - 20 m	> 20 m		
		Rating	6	4	2	1	0		
		Separation	none	< 0.1 mm	0.1 - 1 mm	1 - 5 mm	> 5 mm		
		Rating	6	5	4	1	0		
		Roughness	very rough	rough	slightly rough	smooth	slickensided		
		Rating	6	5	3	1	0		
		Infilling (gouge)	none	Hard filling		Soft filling			
			-	< 5 mm	> 5 mm	< 5 mm	> 5 mm		
5	Ground water	Inflow per 10 m tunnel length	none	< 10 litres/min	10 - 25 litres/min	25 - 125 litres/min	> 125 litres /min		
		p_w / σ_1	0	0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
		General conditions	completely dry	damp	wet	dripping	flowing		
RATING		15	10	7	4	0			

p_w = joint water pressure; σ_1 = major principal stress

RATING ADJUSTMENT FOR DISCONTINUITY ORIENTATIONS

		Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very unfavourable
RATINGS	Tunnels	0	-2	-5	-10	-12
	Foundations	0	-2	-7	-15	-25
	Slopes	0	-5	-25	-50	-60

$$\text{RMR} = (7+20+15+1+1+4+4+4+4) - 15 = 45$$

INDICE RMRAMMASSO ROCCIOSO

In base al valore calcolato dell'indice RMR l'ammasso roccioso analizzato ricade nella CLASSE III - DISCRETO (FAIR).

Con riferimento al metodo di classificazione in oggetto sono indicati i valori di resistenza indicati nella seguente tabella.

ROCK MASS CLASSES DETERMINED FROM TOTAL RATINGS

Rating	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	< 20
Class No.	I	II	III	IV	V
Description	VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR

MEANING OF ROCK MASS CLASSES

Class No.	I	II	III	IV	V
Average stand-up time	10 years for 15 m span	6 months for 8 m span	1 week for 5 m span	10 hours for 2.5 m span	30 minutes for 1 m span
Cohesion of the rock mass	> 400 kPa	300 - 400 kPa	200 - 300 kPa	100 - 200 kPa	< 100 kPa
Friction angle of the rock mass	< 45°	35 - 45°	25 - 35°	15 - 25°	< 15°

Partendo dal valore numerico ricavato dalla classificazione di Bieniawski (RMR - 1989) è calcolato per ciascun ammasso roccioso analizzato l'indice GSI (Geological Strength Index) necessario per l'applicazione del criterio di rottura di Hoek-Brown.

Il procedimento per arrivare a stabilire il valore dell'indice GSI a partire dall'indice RMR89 consiste nell'attribuire al parametro R5 di Bieniawski, il valore di 15 (condizioni asciutte) e nell'azzerare il valore del parametro B, ottenendo in questo modo il l'indice BMR89 da cui si ricava il valore di GSI relativo all'ammasso roccioso tramite la seguente formula:

$$\text{GSI} = \text{BMR89} - 5 \quad \text{Valida per } \text{GSI} > 25 \text{ e } \text{BMR89} > 30$$

$$\text{BMR89} = (7+20+15+1+1+4+4+4+15) - 0 = 71$$

$$\text{GSI} = \text{BMR89} - 5 = 66$$

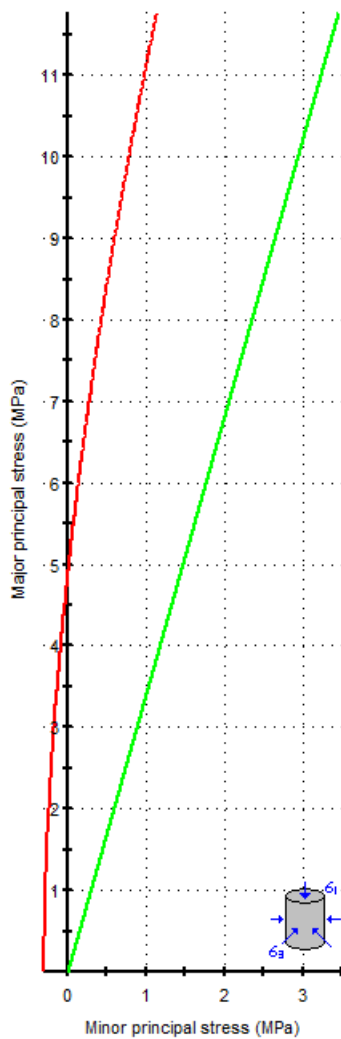
in considerazione del valore stimato attraverso l'utilizzo di tabelle comparative di vari autori e del valore ricavato dal BMR si ritiene che sia utilizzabile un valore cautelativo di GSI=60.

Questo corrisponde ad un ammasso con struttura "fratturata- a blocchi" e con condizioni delle discontinuità "discrete".

I parametri di resistenza dell'ammasso roccioso studiato previsti dal criterio di Hoek & Brown (2002) sono stati quindi calcolati attraverso l'utilizzo del software RocLab version 1.031 (www.rocscience.com). Ai fini del calcolo, il valore della costante mi è stato posto pari a 8 in base a prove effettuate sui marmi da Franklin & Hoek, mentre i valori di σ_{ci} ed E_i (Modulo di deformazione roccia intatta) sono stati assunti rispettivamente pari a 90 MPa (da misure sclerometriche) e 75000 MPa da bibliografia.

Di seguito si riportano quindi in sintesi i parametri di resistenza ottenuti per l'ammasso roccioso intercettato lungo i due sotterranei esistenti oggetto di analisi (vd. Figura seguente).

Analysis of Rock Strength using RocLab



Hoek-Brown Classification

intact uniaxial comp. strength (σ_{ci}) = 90 MPa
 GSI = 60 m_i = 8 Disturbance factor (D) = 0.7
 intact modulus (E_i) = 75000 MPa

Hoek-Brown Criterion

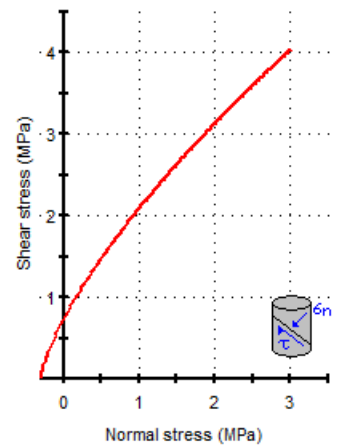
m_b = 0.9 s = 0.003 a = 0.5

Mohr-Coulomb Fit

cohesion = 0.9 MPa friction angle = 48.3 deg

Rock Mass Parameters

tensile strength = -0.3 MPa
 uniaxial compressive strength = 4.9 MPa
 global strength = 11.7 MPa
 deformation modulus = 15051.1 MPa



	MOHR-COULOMB	HOEK-BROWN
Angolo di attrito ϕ (°)	48.30	-
Coesione c (MPa)	0.9	-
m_b		0.9
s		0.003
a		0.5
PARAMETRI DI RESISTENZA		
Resistenza a trazione (MPa)	-0.3	
Resistenza a compressione (MPa)	4.9	
Modulo di deformazione (MPa)	15 051.1	
Resistenza Globale (MPa)	11.7	

Parametrizzazione geomeccanica discontinuità

Al fine di definire i parametri di resistenza che caratterizzano i set di discontinuità individuati si è fatto riferimento a valori dell'angolo di attrito di base (dato ricavato da letteratura e da tilt tests effettuati da vari autori) compresi tra $30^\circ < \phi_b < 32^\circ$. Il JRC è stato stimato in base ai profili di rugosità rilevati su superfici di frattura rappresentativi dei vari set individuati così come il JCS è stato ottenuto dai rilievi sclerometrici.

In sintesi, nella seguente tabella sono riportati i valori cautelativi (valori rappresentativi dei dati minimi e medi raccolti) adottati per la parametrizzazione geomeccanica dei set di discontinuità rilevati in sito.

SET	JRC_{min/max}	JCS_{min/max} (MPa)
K1a	2/6	45/50
K1b	2/12	45/50
K2	2/10	45/50
K3	2/6	45/50
K4	2/8	45/50
K5	2/6	45/50
K6	2/10	45/50

RANGE DEI VALORI DI JRC E JCS PER I SET DI DISCONTINUITÀ INDIVIDUATI

I valori di angolo di attrito di picco (ϕ_p) e coesione di picco (c_p) che caratterizzano le fratture appartenenti ad ogni singolo set di discontinuità sono stati calcolati utilizzando il foglio di calcolo elettronico (Software freeware–www.geologi.it), che opera mediante il criterio di Barton–Choubey, (vd Tabella seguente).

SISTEM A	JRC min - ma x	JCS (MPa) min - ma x	φ_b min - ma x	φ P			C_P kPa		$\varphi_{K,P}$	$C_{K,P}$ kPa
				<i>Hm</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>min</i>	<i>max</i>	<i>Caratt</i> .	<i>Caratt</i> .
K1a	2-6	40-50	30-32	6	36.2	51.1	0.3	1.5	36.2	0.3
				20	35.2	48.0	0.9	4.3	35.2	0.9
K1b	2- 12	40-50	30-32	6	36.8	69.4	0.1	15.1	36.8	0.1
				20	35.8	65.7	0.4	20.2	35.8	0.4
K2	2- 10	40-50	30-32	6	34.9	56.9	1.2	17.4	34.9	1.2
				20	33.9	51.8	3.8	42.7	33.9	3.8
K3	2-6	40-50	30-32	6	35.7	49.5	0.5	2.5	35.7	0.5
				20	34.6	46.4	1.6	7.4	34.6	1.6
K4	2-8	40-50	30-32	6	34.9	52.4	1.1	9.7	34.9	1.1
				20	33.9	48.1	3.7	26.4	33.9	3.7
K5	2-6	40-50	30-32	6	34.9	47.1	1.2	5.8	34.9	1.2
				20	33.8	44.0	4.0	17.1	33.8	4.0
K6	2- 10	40-50	30-32	6	34.6	55.6	1.6	21.8	34.6	1.6
				20	33.6	50.5	5.2	54.3	33.6	5.2

Partendo dalle tabelle sopra riportate relative ai vari set di frattura ed ai differenti stati tensionali si è ricostruita la seguente tabella dei valori di progetto da utilizzare per le verifiche di stabilità dell'ammasso applicando i coefficienti riduttivi previsti dalle NTC-18 (vedi tabella seguente).

SISTEMA	STATO TENSIONALE	$\phi_{K,P}$	ϕ'_d	$c_{k,P}$ kPa	c'_d kPa
K1a	6m	36.2	30,3	0,3	0,24
	20m	35.2	29,4	0,9	0,72
K1b	6m	36.8	30,9	0,1	0,08
	20m	35.8	30,0	0,4	0,32
K2	6m	34.9	29,2	1,2	0,96
	20m	33.9	28,3	3,8	3,04
K3	6m	35.7	29,9	0,5	0,40
	20m	34.6	28,9	1,6	1,28
K4	6m	34.9	29,2	1,1	0,88
	20m	33.9	28,3	3,7	2,96
K5	6m	34.9	29,2	1,2	0,96
	20m	33.8	28,2	4,0	3,20
K6	6m	34.6	28,9	1,6	1.28
	20m	33.6	28,0	5.2	4.2

Nel caso di condizioni residue si è ipotizzato nullo il valore della coesione mentre il valore dell'angolo di attrito $\phi_{K,r} = 32^\circ$ è stato ridotto applicando il coefficiente YM2 (1.25) al valore della tangente; il valore di progetto da usare nelle valutazioni in condizioni residue sarà pari a 28.