

COMUNE DI CARRARA

Società CAVE DI SPONDA S.r.l.



Piano di coltivazione della cava n. 64 “La Madonna”

Studio idrogeologico finalizzato alla valutazione della connessione
idraulica tra l'attività estrattiva nell'area di progetto e le sorgenti
“Pizzutello” e “Gorgoglio”

Relazione Tecnica

il Geologo

INDICE

1) INTRODUZIONE	pag. 3
2) STUDIO IDROGEOLOGICO	pag. 4

1) INTRODUZIONE

Per incarico della Società CAVE DI SPONDA S.r.l. è stata redatta la presente Relazione Tecnica finalizzata alla valutazione dell'interferenza tra le sorgenti per uso idropotabile "Pizzutello" e "Gorgoglio" e l'attività estrattiva interessata dalle soluzioni progettuali illustrate nella Relazione Tecnica di progetto e negli elaborati grafici ad essa allegati ed ai quali si rimanda per tutto quanto citato e non dettagliatamente illustrato nella presente trattazione.

In linea generale, la cava n. 64 "La Madonna" è caratterizzata da un cantiere a cielo aperto e da cantiere in galleria entrambi interessati anche dall'attività estrattiva di progetto.

In particolare, è oggetto del presente studio idrogeologico:

- l'individuazione del livello della falda acquifera che alimenta le sorgenti "Pizzutello" e "Gorgoglio"
- il confronto geometrico tra il livello della falda e le caratteristiche morfologiche attuali e di progetto dei cantieri a cielo aperto ed in galleria del complesso estrattivo n. 64 "La Madonna"
- le direttrici di infiltrazione idrica nell'ammasso roccioso dei due cantieri sopra citati in situazione morfologica attuale e di progetto
- la valutazione della connessione idraulica tra l'attività estrattiva attuale e di progetto nei cantieri a cielo aperto ed in galleria con particolare riferimento al materiale di sfrido (detto in gergo "*marmettola*") prodotto nelle operazioni di taglio e perforazione

In allegato alla presente Relazione Tecnica sono presenti i seguenti elaborati grafici:

- Tav. SI1 – Carta idrogeologica dell'area di attuale lavorazione con ubicazione delle sorgenti "Pizzutello" e "Gorgoglio", in scala 1:1000
- Tav. SI2 – Planimetria illustrativa delle sorgenti "Pizzutello" e "Gorgoglio" e le caratteristiche morfologiche della cava "La Madonna" in situazione di progetto, in scala 1:1000
- Tav. SI3 – Sezioni, in scala 1:2000.

Le sezioni idrogeologiche di Tav. SI3, che interessano sia il cantiere a cielo aperto che quello in galleria, sono state tracciate sulla congiungente l'area di attuale escavazione e di progetto con la sorgente Pizzutello (sezioni P1, P2, P3, P4 e P5).

Le altre sezioni di Tav. SI3 sono state tracciate (Tavv. SI1 e SI2):

- lungo le direzioni di possibile infiltrazione idrica nell'ammasso roccioso a cielo aperto (sezione D1) ed in galleria (sezione D2) e nelle quali sono riportate le discontinuità lungo le quali è possibile l'infiltrazione idrica nell'ammasso roccioso
- lungo la congiungente i due sondaggi S1 e S2 (sezione S).

2) **STUDIO IDROGEOLOGICO**

Il presente studio idrogeologico è basato sull'analisi della specifica trattazione dei seguenti argomenti:

- () caratteristiche geomorfologiche, geologiche ed idrogeologiche dell'area di escavazione attuale e di progetto e di un suo intorno significativo, illustrate nella “*RELAZIONE GEOLOGICA–GEOMORFOLOGICA–IDROGEOLOGICA CON ANALISI DI FATTIBILITÀ GEOLOGICA–IDRAULICA–SISMICA A SUPPORTO DEL PROGETTO DI COLTIVAZIONE CAVA N.64 – LA MADONNA*” e negli elaborati grafici ad essa allegati, a firma del DOTT. GEOLOGO MAURIZIO PROFETI; essa sarà citata, nel prosieguo della trattazione come *RELAZIONE GEOLOGICA*
- () caratteristiche di fratturazione dell'ammasso marmoreo nell'area di escavazione attuale e di progetto e di un suo intorno significativo, illustrate nella Relazione Tecnica “*Rilevamento strutturale dei fronti di escavazione e classificazione dell'ammasso roccioso nell'area di progetto ed in suo intorno significativo*” e negli elaborati grafici ad essa allegati, a firma dello scrivente, citata nel prosieguo della trattazione come *RELAZIONE GEOMECCANICA*.

La presente indagine è finalizzata a valutare se la marmettola prodotta nell'area di escavazione attuale e di progetto della cava “La Madonna” possa interessare le linee di alimentazione delle sorgenti “Pizzutello” e “Gorgoglio” determinando incrementi di torbidità nelle acque sorgive superiori al limite di legge.

2.1) **INDAGINI GEOGNOSTICHE ESEGUITE: SONDAGGI**

Al fine di individuare il livello della falda acquifera che alimenta le sorgenti per uso idropotabile “Pizzutello” e “Gorgoglio” all'interno della cava “La Madonna” sono stati realizzati n. 2 sondaggi a distruzione di nucleo (S1 e S2) alle estremità nord orientale e sud occidentale del complesso estrattivo (foto nn. 1 e 2) con rivestimento di ogni foro di sondaggio per poter eseguire misure con sonda piezometrica.

A seguito di incarico affidato dalla Società CAVE DI SPONDA S.r.l., i sondaggi S1 e S2 sono stati realizzati dalla Ditta *RAGIONIERI LORIANO di Ragionieri Alessandro – Trivellazione Pozzi*, con sede in Via Francesca n. 2646 a Larciano (PT), in data 24/06/25 e 25/06/25 (S1) e 30/06/25 e 01/07/25 (S2); la loro ubicazione è riportata nelle Tavv. SI1 e SI2.

Come specificato nella relazione esplicativa della Ditta *RAGIONIERI LORIANO* riportata in allegato, i sondaggi hanno raggiunto la profondità rispettivamente di 63 m e 55 m permettendo l'individuazione del livello della falda acquifera; durante la loro esecuzione è stata individuata la falda acquifera alla quota di 45.4 m dal boccapozzo di S1 e di 49.4 m dal boccapozzo di S2:



Foto n. 1 : ubicazione sondaggio S1



Foto n. 2 : ubicazione sondaggio S2

2.2) UBICAZIONE SORGENTI PIZZUTELLO E GORGOGLIO

Le sorgenti “Pizzutello” e “Gorgoglio” si trovano a Nord del centro abitato di Torano, frazione del Comune di Carrara, alla base del versante nord occidentale del crinale, in sponda sinistra del Fosso di Curtana, ad una quota rispettivamente di 164.3 m s.m. e 170.0 m s.m.

Esse costituiscono i principali recapiti del sotto-sistema idrogeologico Gorgoglio-Pizzutello.

La loro ubicazione è riportata nelle planimetrie di Tavv. SI1 e SI2 e nelle sezioni idrogeologiche di Tav. SI3.

2.2.1) Sorgente Pizzutello

Così come descritta nell'allegato III – DESCRIZIONE DELLE SORGENTI dello *STUDIO IDROGEOLOGICO – Territorio Comunale – CARRARA – AVENZA* redatto nel Giugno 1967, per incarico di A.C.S.P.M., da UNIGEO, la sorgente Pizzutello (n. 27) è “*emergente da detriti sovrastanti i marmi in galleria.*”; essa ha una portata media (Q_{media}) di 30 l/sec.

La distanza minima con l'area di escavazione attuale e di progetto nei due cantieri è riportata nella tabella che segue:

Tab. 1

Situazione morfologica	Sorgente	Cantiere cava 64	Distanza minima orizzontale * (m)	Distanza minima reale * (m)
attuale	Pizzutello	cielo aperto	504	506
		galleria	488	490
	Gorgoglio	cielo aperto	611	612
		galleria	591	593
progetto	Pizzutello	cielo aperto	437	439
		galleria	375	378
	Gorgoglio	cielo aperto	521	524
		galleria	515	517

* approssimato all'unità

2.2.2) Sorgente Gorgoglio

Così come descritta nell'allegato III – DESCRIZIONE DELLE SORGENTI dello *STUDIO IDROGEOLOGICO – Territorio Comunale – CARRARA – AVENZA* redatto nel Giugno 1967, per incarico di A.C.S.P.M., da UNIGEO, la sorgente Gorgoglio (n. 26) è “*emergente dal bardiglio.*”; la sua portata media Q_{media} è pari 40 l/sec;

La distanza minima con l'area di escavazione attuale e di progetto nei due cantieri è riportata in tabella 1.

2.3) CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE DELL'AREA ESAMINATA E DI UN SUO INTORNO SIGNIFICATIVO

2.3.1) CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE GENERALI

La carta idrogeologica di Tav. SI1 e le sezioni idrogeologiche di Tav. SI3 evidenziano i complessi idrogeologici che caratterizzano l'area esaminata; dal punto di vista della permeabilità, i litotipi che affiorano nell'area esaminata possono essere così suddivisi:

COMPLESSI IDROGEOLOGICI A PERMEABILITA' PRIMARIA

Rocce permeabili per porosità

COMPLESSI IDROGEOLOGICI A PERMEABILITA' SECONDARIA

Rocce permeabili per fessurazione e carsismo

come definite nella carta idrogeologica di figura 1, tratta dall'Allegato 7a *CARTA IDROGEOLOGICA – C.I.S.S. delle ALPI APUANE* dello *Studio idrogeologico prototipale del corpo idrico significativo dell'acquifero carbonatico delle Alpi Apuane, Monti d'Oltre Serchio e S. Maria del Giudice* (Università degli Studi di Siena – Centro di Geotecnologie, 2007, edito dalla Regione Toscana)

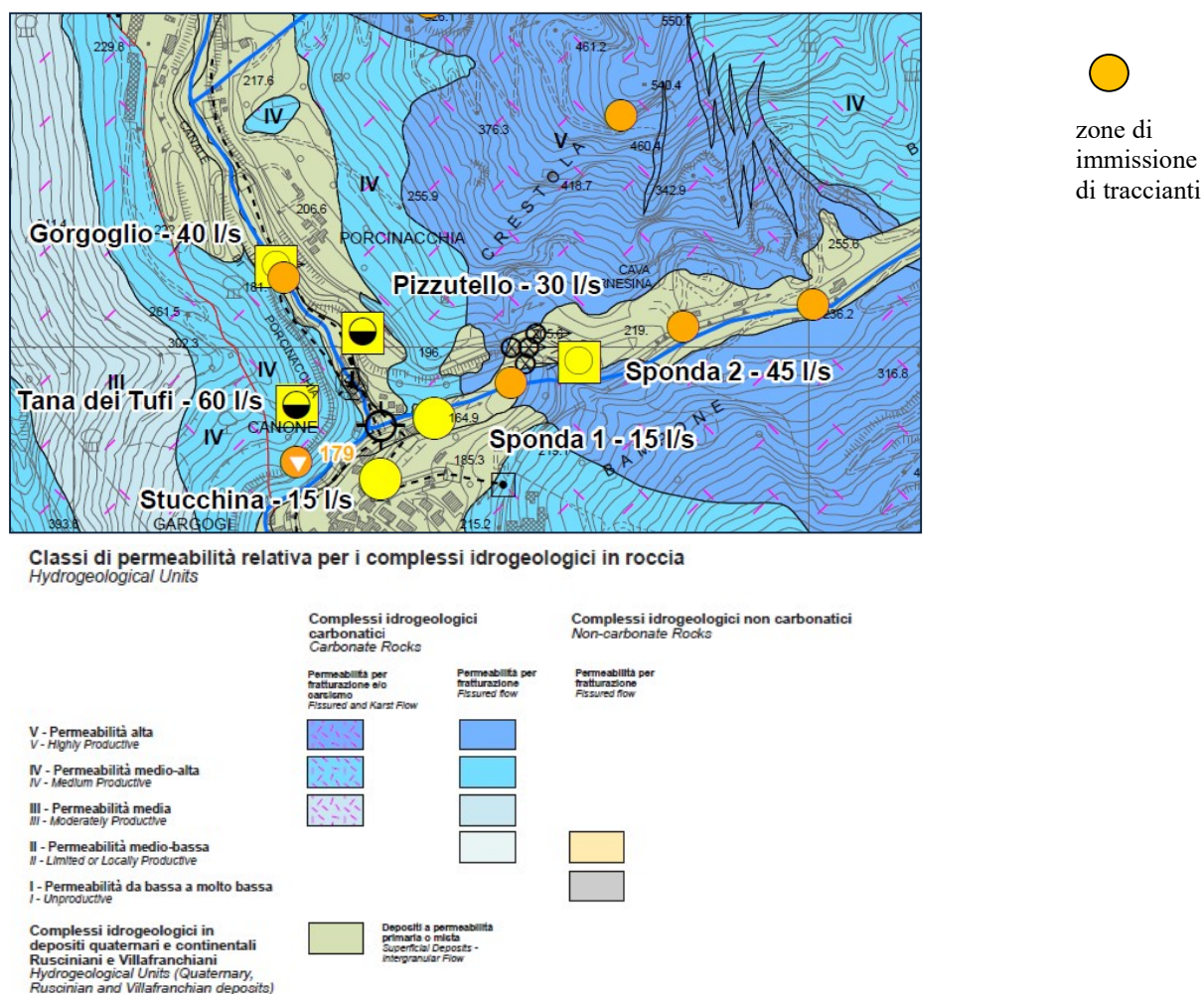


Figura 1 : stralcio della *CARTA IDROGEOLOGICA – C.I.S.S. delle ALPI APUANE* (Allegato 7a), con relativa legenda, tratta dallo *Studio idrogeologico prototipale del corpo idrico significativo dell'acquifero carbonatico delle Alpi Apuane, Monti d'Oltre Serchio e S. Maria del Giudice* (Università degli Studi di Siena – Centro di Geotecnologie, 2007, edito dalla Regione Toscana)

Tra i complessi idrogeologici a permeabilità primaria elevata si configurano:

- i ravaneti (rv)
- i depositi alluvionali attuali (at)
- l'accumulo detritico (dt) presente a Sud del complesso estrattivo, alla base dell'affioramento dei Grezzoni che caratterizza la cava l'impianto per la lavorazione di inerti ad Est dell'abitato di Torano

mentre il grado di cementazione dei depositi quaternari terrazzati (at) ne diminuisce il grado di permeabilità e li rende mediamente permeabili.

Ai complessi idrogeologici a permeabilità secondaria appartengono le rocce litoidi costituite dalla formazione dei Calcari Selciferi (cs), dei Marmi (m), dei Grezzoni (Gr) che caratterizzano l'area di progetto, unitamente ai Calcari e marne a Rhaetavicula contorta (cRc) ed al Calcare cavernoso (Cv) affioranti ad Est dell'area di progetto s.s.

Le caratteristiche litologiche e di fratturazione dei Marmi li rendono molto permeabili per fessurazione e carsismo (classe V), mentre per quanto riguarda i Calcari Selciferi, i Grezzoni ed i Calcari e marne a Rhaetavicula contorta la permeabilità media del litotipo tende a diminuire e pertanto essi sono posti in classe IV (permeabilità medio-alta per fessurazione e carsismo); infine, la permeabilità tende ulteriormente a diminuire nel Calcare cavernoso che appartiene alla classe III (permeabilità media per fessurazione e carsismo).

Le rocce carbonatiche che costituiscono il bacino marmifero apuano, al quale appartiene l'area esaminata, costituiscono un acquifero avente come limite meridionale una soglia di permeabilità costituita dalle filladi paleozoiche dell'Unità di Massa, caratterizzate da bassa permeabilità e lungo la quale si hanno le principali sorgenti che permettono di suddividere il sistema idrogeologico apuano in sotto-sistemi: le sorgenti Pizzutello e Gorgoglio definiscono l'omonimo sotto-sistema idrogeologico.

Infatti, come riportato al paragrafo 3.2), il complesso metamorfico delle Alpi Apuane è stato interessato dalle fasi deformative D1 (di tipo compressivo) e D2 (di tipo distensivo) che hanno generato strutture a pieghe isoclinali B1 e B2; il piegamento della struttura influenza anche la giacitura delle filladi le quali possono raggiungere quote prossime alla superficie morfologica ed affiorare localmente generando sorgenti di contatto.

Quanto sopra è evidenziato nella sezione idrogeologica di figura 2, tratta dalla sezione A – A' illustrata nell'Allegato 9b SEZIONI IDROGEOLOGICHE - *C.I.S.S. delle ALPI APUANE* dello *Studio idrogeologico prototipale del corpo idrico significativo dell'acquifero carbonatico delle Alpi Apuane, Monti d'Oltre Serchio e S. Maria del Giudice* (Università degli Studi di Siena – Centro di Geotecnologie, 2007, edito dalla Regione Toscana)

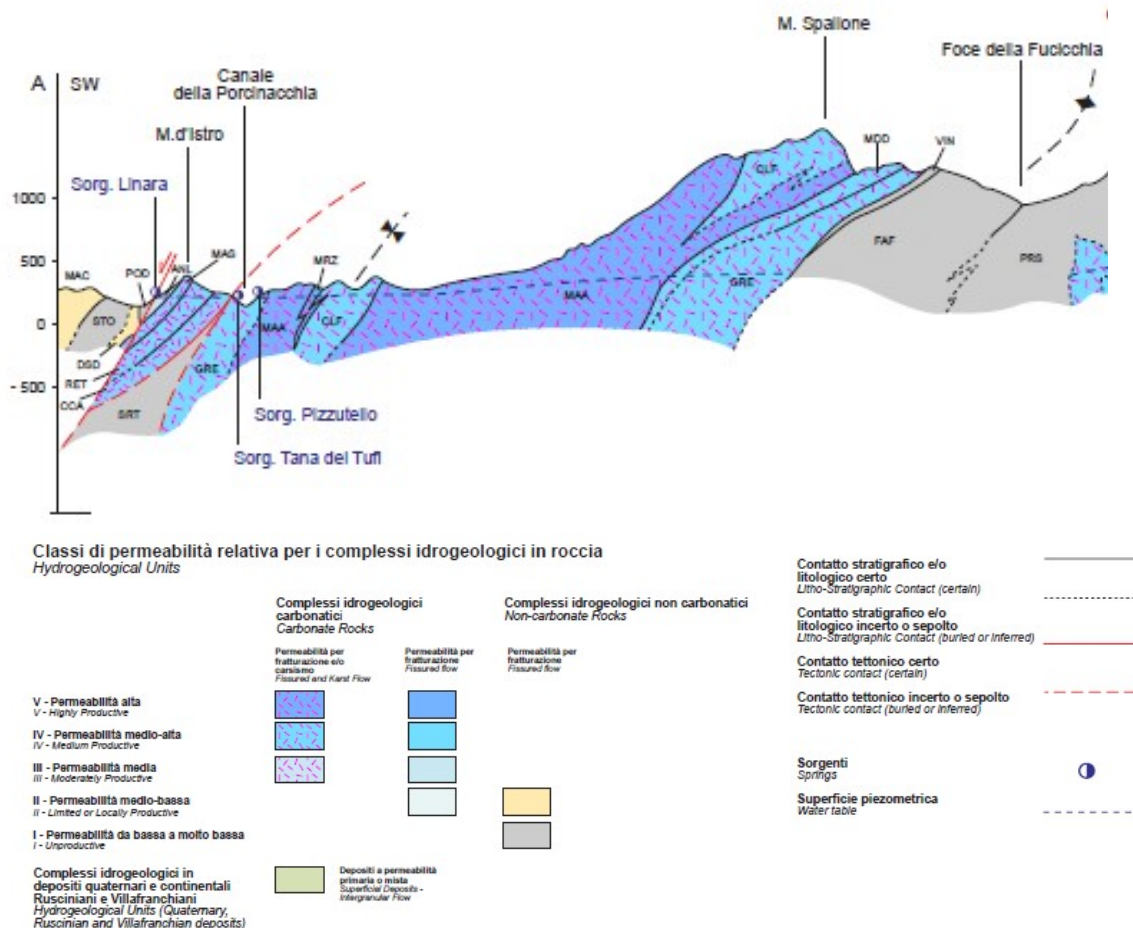


Figura 2 : stralcio della sezione A – A' riportata nelle SEZIONI IDROGEOLOGICHE – C.I.S.S. delle ALPI APUANE (Allegato 9b) con relativa legenda, tratta dallo Studio idrogeologico prototipale del corpo idrico significativo dell'acquifero carbonatico delle Alpi Apuane, Monti d'Oltre Serchio e S. Maria del Giudice (Università degli Studi di Siena – Centro di Geotecnologie, 2007, edito dalla Regione Toscana)

Secondo molti Autori (tra gli altri Raggi, 1990; Pranzini, 1991; CNR – Istituto di Geoscienze e Georisorse di Pisa, 2000 – 2002; Doveri, 2005) le acque penetrano in profondità attraverso le discontinuità delle rocce carbonatiche fino a raggiungere la zona di saturazione e vengono a giorno nelle sorgenti seguendo una fascia caratterizzata da elevato carsismo; in particolare, si ritiene che le principali zone di ricarica della falda di base siano situate a circa 900-1200 m (CNR – Istituto di Geoscienze e Georisorse di Pisa, 2000 – 2002) mentre Doveri (2005) afferma che la fascia carsica è compresa tra le quote delle sorgenti e le isoipse 450-500 m s.l.m.

Infine, relativamente al sottosistema “Gorgoglio – Pizzutello” a seguito di prove con traccianti (Baldi, 2004 e Doveri, 2005) si ipotizza la presenza di zone di trasferimento verso il sistema alluvionale che caratterizza il fondovalle.

Nella sezione idrogeologica di figura 2 è riportato l'andamento della superficie piezometrica nel sottosistema idrogeologico Pizzutello – Gorgoglio, riportata anche, relativamente all'area esaminata, nelle sezioni idrogeologiche di tav. SI3

La figura 3, tratta dall'allegato 9a *CARTA DELLE AREE DI ALIMENTAZIONE DEI SISTEMI IDROGEOLOGICI* dello *SEZIONI IDROGEOLOGICHE - C.I.S.S. delle ALPI APUANE* dello *Studio idrogeologico prototipale del corpo idrico significativo dell'acquifero carbonatico delle Alpi Apuane, Monti d'Oltre Serchio e S. Maria del Giudice* (Università degli Studi di Siena – Centro di Geotecnologie, 2007, edito dalla Regione Toscana) mostra che il complesso estrattivo “La Madonna” (la cui ubicazione è riportata nello stesso elaborato) è inserito nell'area di alimentazione del sub-sistema idrogeologico “Gorgoglio - Pizzutello”.

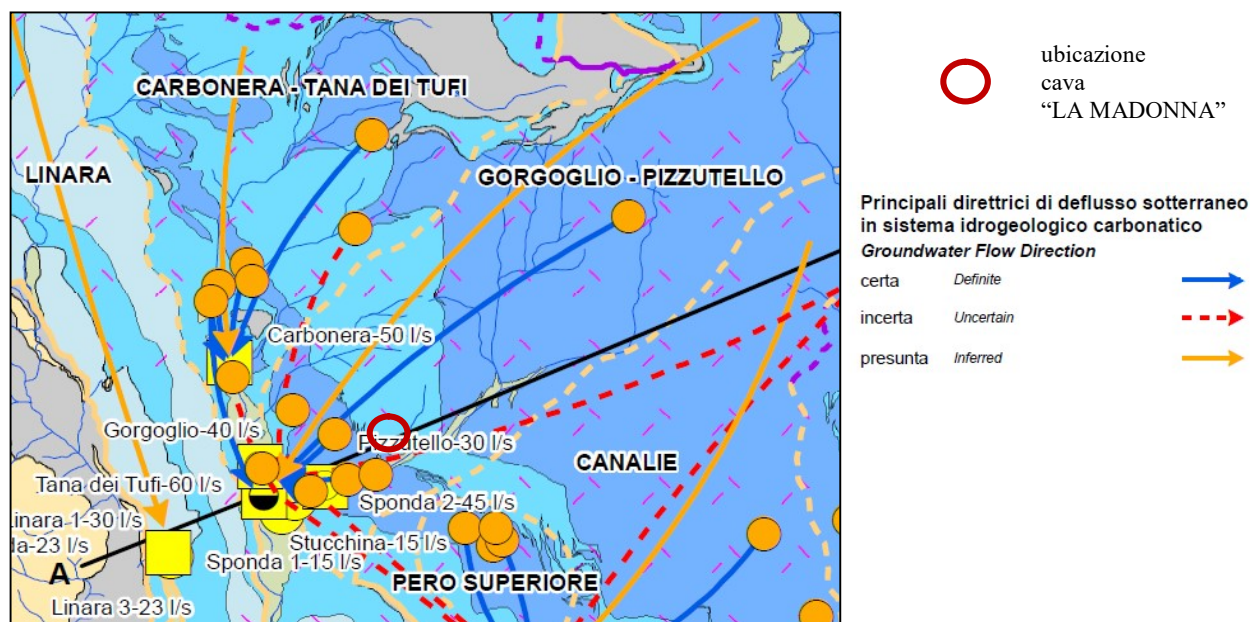


Figura 3 : Stralcio della Carta delle aree di alimentazione dei Sistemi Idrogeologici – Corpo Idrico Sotterraneo Significativo delle Alpi Apuane. Allegato 9a, tav. A dello *Studio idrogeologico prototipale del corpo idrico significativo dell'acquifero carbonatico delle Alpi Apuane, Monti d'Oltre Serchio e S. Maria del Giudice* (Università degli Studi di Siena – Centro di Geotecnologie, 2007, edito dalla Regione Toscana)

Nel corso della campagna di indagini con uso di traccianti svolte tra il 2000 ed il 2002 il CNR - Istituto di Geoscienze e Georisorse di Pisa ha rilevato una connessione idraulica tra il Fosso di Curtana e le sorgenti Pizzutello e Carbonera (a monte della sorgente Gorgoglio, in sinistra orografica del Fosso di Curtana) e tra il Fosso di Torano e le due sorgenti; risulta pertanto dimostrato che anche le acque dei due corsi d'acqua alimentano le sorgenti Pizzutello e Gorgoglio.

Per quanto sopra esposto, si può affermare che l'alimentazione idrica delle sorgenti Gorgoglio e Pizzutello presenti due diverse tipologie che si possono così definire:

- alimentazione idrica geo-strutturale; le acque di infiltrazione nell'ammasso roccioso all'interno del sub-sistema idrogeologico “Gorgoglio – Pizzutello” e vanno ad alimentare le due sorgenti; tale tipo di alimentazione può essere:
 - a1) diretta; le acque scorrono all'interno dell'ammasso roccioso carbonatico lungo discontinuità molto persistenti ed aperte, la cui giacitura collega direttamente il luogo di immissione con le sorgenti

a2) profonda; le acque di infiltrazione penetrano in profondità attraverso le discontinuità delle rocce carbonatiche fino a raggiungere la zona di saturazione e vengono a giorno nelle due sorgenti seguendo una fascia caratterizzata da elevato carsismo

- alimentazione idrica alluvionale; le acque del Fosso di Curtana e del Fosso di Torano alimentano le sorgenti “Pizzutello” e “Gorgoglio” in quanto la quota del talweg dei corsi d’acqua unitamente alla litologia ed all’elevata fratturazione che caratterizzano le aree spondali in sinistra del Fosso di Curtana ed in destra del Fosso di Torano permettono l’afflusso idrico verso le due sorgenti, alimentato dalla falda di subalveo presente all’interno dei depositi alluvionali attuali e/o terrazzati che caratterizzano l’alveo dei due corsi d’acqua.

La fig. 3 mostra anche che le 2 sorgenti sono alimentate secondo due differenti direttrici “certe”; in particolare:

- la direttrice di alimentazione della sorgente Pizzutello proviene da NE ed il bacino di alimentazione comprende l’area a SE della dorsale M. Pesaro - M. Uccelliera che separa il bacino marmifero di Torano da quello di Pescina – Boccanaglia
- la direttrice della sorgente Gorgoglio proviene da NNW e il bacino di alimentazione comprende l’area a NW del crinale sopra citato.

Se a quanto sopra esposto si aggiunge il fatto che la sorgente “Gorgoglio” è situata ad una quota (170 m s.m.) superiore rispetto alla sorgente “Pizzutello” (164.3 m s.m.) appartenendo allo stesso bacino di alimentazione, può risultare anomalo il fatto che la prima abbia una portata (40 l/sec) superiore a quella della seconda “Pizzutello” (30 l/sec).

A mio parere, mentre è possibile che l’area esaminata sia situata all’interno del bacino di alimentazione della sorgente “Pizzutello”, a mio parere, essa è esterna a quello della sorgente “Gorgoglio”.

2.3.2) CARATTERISTICHE IDROGEOLOGICHE DELL’AREA ESAMINATA

Nell’area esaminata, compresa tra la cava “La Madonna” e le sorgenti “Pizzutello” e “Gorgoglio” affiorano i Marmi ed i Grezzoni mentre i corsi d’acqua, Fosso di Curtana e Fosso di Torano, scorrono all’interno dei propri depositi alluvionali attuali (al) e pleistocenici (at).

Come riportato al paragrafo 2.2.1), i litotipi non litoidi variano da molto permeabili per porosità (ravaneti e depositi alluvionali attuali) a mediamente permeabili per porosità (depositi alluvionali terrazzati quaternari), mentre le formazioni rocciose hanno una permeabilità per fessurazione e carsismo variabile da molto alta (Marmi) e fino a medio-alta (Grezzoni e Calcari selciferi).

2.3.2.1) Direttrici di infiltrazione idrica nell’ammasso roccioso della cava “La Madonna”

Per la determinazione delle direttrici di scorrimento idrico sotterraneo è stato utilizzato il rilevamento strutturale dell’ammasso roccioso illustrato nella *RELAZIONE GEOMECCANICA* e negli elaborati ad essa allegati.

Nelle tabelle di stendimento allegate alla *RELAZIONE GEOMECCANICA* sono individuate le discontinuità più persistenti, appartenenti ai “peli del verso” (sistema K1) caratterizzate dalla presenza di livelli fillosilicatici, pressoché impermeabili, di spessore variabile; tali livelli a comportamento coesivo, costituiscono superfici di estrema debolezza strutturale e di infiltrazione idrica.

I sistemi di discontinuità che caratterizzano l'ammasso roccioso rilevato possono essere suddivisi in 8 famiglie a loro volta suddivise, per un totale di 12 sistemi di giunti, la cui giacitura media, numero di giunti di appartenenza e stendimenti di rilevazione sono riportati in tabella 2 per quanto riguarda il complesso estrattivo nella sua totalità e nelle tabelle 3 e 4 riferite rispettivamente al cantiere a cielo aperto ed in sotterraneo, tratte dalla *RELAZIONE GEOMECCANICA*.

Tab. 2

Tabella riassuntiva fronti cava n. 64 "La Madonna"								
n° totale giunti	366	Lungh. totale stendimenti (m) 616.0						
Sistemi di discontinuità	imm	incl	%	apertura	JRC	frequenza	n° giunti	Stendimenti
				(mm)		(1/cm)		
Sistema K1	218	53	54.6	8.5	8.1	0.003247	200	tutti, esclusi St.25, StAr1, StAr2, StAr3
Sistema K2	311	80	10.4	1.4	7.6	0.000617	38	St10, St11, St12, St13, St14, St15, St16, St17, St18, StAr2, St.Ar3
Sistema K3(a)	32	46	6.6	0.5	5.5	0.000390	24	St1, St4, St5, St7, St8, St10, St11, St16, St18
Sistema K3(b)	74	38	0.8	1.0	5.0	0.000049	3	St9
Sistema K4(a)	184	77	7.4	2.0	7.1	0.000438	27	St3, St9, St14, St16, St19, StAr1, StAr2, StAr3
Sistema K4(b)	37	82	2.5	0.7	7.9	0.000146	9	St15, St19
Sistema K4(c)	16	84	2.5	0.7	6.1	0.000146	9	St9, St14
Sistema K5(a)	228	13	5.2	0.2	7.1	0.000308	19	St15, St18, StAr1, StAr2, StAr3
Sistema K5(b)	30	10	3.0	0.3	7.4	0.000179	11	St15
Sistema K6	114	46	4.37	1.1	6.6	0.000260	16	St3, St7, St12, St14, St15, St18, StAr1, StAr3
Sistema K7	320	28	0.82	0.4	8.3	0.000049	3	St20, St27
Sistema K8	112	77	1.91	0.5	9.6	0.000114	7	St20, St27

Tab. 3

Tabella riassuntiva fronti a cielo aperto cava n. 64 "La Madonna"								
n° totale giunti	306	Lungh. totale stendimenti (m)		506.2				
Sistemi di discontinuità								
	imm	incl	%	apertura (mm)	JRC	frequenza (1/cm)	n° giunti	Stendimenti
Sistema K1	220	52	55.6	9.3	8.1	0.003358	170	tutti (da St.1 a St.19)
Sistema K2	310	80	11.8	1.4	7.6	0.000711	36	St10, St11, St12, St13, St14, St15, St16, St17, St18, StAr2, St.Ar3
Sistema K3(a)	38	48	6.5	0.9	8.0	0.000395	20	St1, St4, St5, St7, St8, St10, St11, St16, St18
Sistema K3(b)	74	38	1.0	1.0	5.0	0.000059	3	St9
Sistema K4(a)	202	78	5.2	2.9	6.8	0.000316	16	St3, St9, St14, St16, St19, StAr1, StAr2, StAr3
Sistema K4(b)	37	82	2.9	0.7	7.9	0.000178	9	St15, St19
Sistema K4(c)	10	72	2.3	0.9	5.6	0.000138	7	St9, St14
Sistema K5(a)	230	13	5.9	0.3	7.1	0.000356	18	St15, St18, StAr1, StAr2, StAr3
Sistema K5(b)	30	10	3.6	0.3	7.4	0.000217	11	St15
Sistema K6	114	46	5.23	1.1	6.6	0.000316	16	St3, St7, St12, St14, St15, St18, StAr1, StAr3

Tab. 4

Tabella riassuntiva fronti in galleria cava n. 64 "La Madonna"								
n° totale giunti	60	Lungh. totale stendimenti (m)				109.8		
Sistemi di discontinuità								
	imm	incl	%	apertura (mm)	JRC	frequenza (1/cm)	n° giunti	Stendimenti
Sistema K1	207	57	50.0	3.6	7.7	0.002732	30	St20, St21, St22, St23, St24, St26, St27
Sistema K2	334	89	3.3	0.1	7.0	0.000182	2	St21, St27
Sistema K3(a)	29	60	6.7	1.8	9.5	0.000364	4	St20, St27
Sistema K4(a)	158	76	18.3	0.7	7.7	0.001002	11	St20, St23, St25, St26, St27
Sistema K4(c)	38	87	3.3	0.1	8.0	0.000182	2	St26, St27
Sistema K5(a)	207	10	1.7	0.1	7.0	0.000091	1	St27
Sistema K7	320	28	5.00	0.4	8	0.000273	3	St20, St27
Sistema K8	112	77	11.67	0.5	9.6	0.000638	7	St20, St27

2.3.2.1) La permeabilità dell'ammasso roccioso esaminato

Analizzando le caratteristiche di fratturazione dell'ammasso roccioso esaminato è stato possibile determinare il valore del modulo di permeabilità medio dell'ammasso roccioso (conducibilità idraulica) e la sua distribuzione spaziale all'interno dello stesso.

Applicando la formula adottata e sperimentata da LOUIS (1974), SNOW (1968) e KIRALY (1969 a, 1969 b) :

$$K_m = \Sigma K_i = \Sigma (d_i^3 \times f_i \times g) / 12\nu \quad (1)$$

dove:

d_i : apertura media della famiglia i-esima (determinata mediante il rilevamento strutturale di dettaglio)

f_i : frequenza media della famiglia i-esima; $f = 1/S$, dove S è la spaziatatura (determinata mediante il rilevamento strutturale di dettaglio)

g : accelerazione di gravità

ν : viscosità cinematica dell'acqua alla temperatura di 20°C

si determina prima il valore del modulo di permeabilità media K_m di ogni singolo sistema di discontinuità e successivamente quello dell'ammasso roccioso rilevato, illustrati nella tabella 5

relativamente all'intero complesso estrattivo, nella tabella 6 per il cantiere a cielo aperto e nella tabella 7 relativamente al cantiere in galleria:

Tab. 5: complesso estrattivo

Famiglia di discontinuità	Sistema di discontinuità	Conducibilità idraulica K_m (mm/sec)
K1	K1	1.52×10^2
K2	K2	0.12
K3	K3(a)	4.04×10^{-3}
	K3(b)	3.80×10^{-3}
K4	K4(a)	0.27
	K4(b)	4.10×10^{-3}
	K4(c)	0.04
K5	K5(a)	3.60×10^{-4}
	K5(b)	2.52×10^{-4}
K6	K6	0.28
K7	K7	2.40×10^{-3}
K8	K8	0.01
ammasso roccioso		152.89

Tab. 6: cantiere a cielo aperto

Famiglia di discontinuità	Sistema di discontinuità	Conducibilità idraulica K_m (mm/sec)
K1	K1	2.10×10^2
K2	K2	0.16
K3	K3(a)	0.02
	K3(b)	4.60×10^{-3}
K4	K4(a)	0.59
	K4(b)	4.90×10^{-3}
	K4(c)	0.08
K5	K5(a)	4.58×10^{-4}
	K5(b)	3.07×10^{-4}
K6	K6	0.34
ammasso roccioso		211.56

Tab. 7: cantiere in sotterraneo

Famiglia di discontinuità	Sistema di discontinuità	Conducibilità idraulica K_m (mm/sec)
K1	K1	9.80
K2	K2	1.40×10^{-5}
K3	K3(a)	0.15
K4	K4(a)	0.03
	K4(c)	1.40×10^{-5}
K5	K5(a)	7.02×10^{-6}
K7	K7	0.01
K8	K8	0.01
ammasso roccioso		10.00

da quanto sopra esposto si evince come la permeabilità dell'ammasso roccioso che costituisce il cantiere a cielo aperto risulta molto alta mentre il cantiere in galleria è caratterizzato da una minore conducibilità che rimane comunque alta; la permeabilità nel cantiere a cielo aperto condiziona quella di tutto l'ammasso roccioso esaminato che risulta di grado molto elevato.

Occorre però fare un'opportuna considerazione: i sistemi di frattura e le loro caratteristiche sono stati rilevati durante le misurazioni eseguite sui fronti di escavazione.

Sui gradoni e nei piazzali l'attività estrattiva produce un residuo solido a granulometria fine e molto fine ("marmettola") il quale viene compattato dal continuo passaggio dei mezzi meccanici; a ciò si aggiunge la chiusura delle fratture esistenti con malte cementizie progressivamente intercettate rendendo impermeabile l'ammasso roccioso.

Pertanto il valore della conducibilità idraulica andrà riferito nella sua totalità solo per le bancate in lavorazione mentre i piazzali ed i gradoni risultano pressoché impermeabili.

Per quanto riguarda la definizione dei sistemi di discontinuità e la loro disposizione all'interno dell'ammasso roccioso rilevato, si fa riferimento alla *RELAZIONE GEOMECCANICA* sintetizzata nelle tabelle 2, 3 e 4.

2.3.2.2) Determinazione delle linee di flusso idrico sotterraneo

Ad ognuno dei valori di K_m determinati per ogni famiglia di discontinuità è stata assegnata la direzione di massima pendenza del piano medio che la definisce.

Determinando le proiezioni di tutti i vettori permeabilità così individuati lungo tutte le possibili direzioni nello spazio si è ottenuta la corrispondenza tra i valori di permeabilità media e le posizioni nello spazio.

La distribuzione della permeabilità nella cava "la Madonna" ed in un suo intorno significativo rivela quanto segue:

- nel cantiere a cielo aperto la direttrice di infiltrazione idrica è costituita dalla retta di massima pendenza del piano di immersione N219 ed inclinazione di 50° e che i massimi valori di permeabilità (99%) sono situati lungo le rette di massima pendenza dei piani medi dei sistemi appartenenti al sistema di fratturazione K1, il più frequente, persistente e caratterizzato da una superiore apertura media rispetto alle altre famiglie di giunti oltre che, in misura quasi trascurabile, ai sistemi K4(a) e K5(a) ad immersione SSW e WSW
- nel cantiere in galleria: la direttrice di infiltrazione idrica è costituita dalla retta di massima pendenza del piano di immersione N207 ed inclinazione di 57° e che i massimi valori di permeabilità (99%) sono situati lungo le rette di massima pendenza dei piani medi dei sistemi appartenenti al sistema di fratturazione K1, il più frequente, persistente e caratterizzato da una superiore apertura media rispetto alle altre famiglie di giunti oltre che, in misura quasi trascurabile, al sistema K5(a) ad immersione SSW.

2.3.2.3) Studio idrogeologico della cava “La Madonna” mediante monitoraggio delle sorgenti Carbonera, Pizzutello, Tana dei Tufi e Pero Superiore attraverso l'immissione di spore di Lycopodium Clavatum L.

In data 16 Giugno 2009 è stata eseguita, da parte del Dott. Agronomo Alberto Dazzi e del Dott. Geologo Chiara Taponecco su incarico della Società CAVE DI SPONDA, una prova di iniezione di 1000 g di spore di *Lycopodium clavatum* all'interno di due discontinuità (500 g di spore di colore verde in una discontinuità e 500 g di spore di colore rosso nell'altra) presenti nella parte centrale della cava; l'immissione delle spore è iniziata alle ore 10,00.

I campionamenti alle sorgenti e le successive analisi hanno messo in evidenza la presenza, nella sola sorgente “Pizzutello” di n. 3 spore verdi nel campione delle ore 9:30 del 17/06/09, di n. 1 spora verde nel campione delle ore 9:30 del 25/06/09 e di n. 1 spora verde nel campione delle ore 9:30 del 29/06/09.

Come riportato, in sede di analisi dei risultati e conclusioni, nella Relazione di Monitoraggio a data 18/09/2009, a commento dei risultati, *“le prove di monitoraggio siano state realizzate in condizioni peggiorative, in quanto le spore sono state immesse direttamente in una frattura aperta e con buon drenaggio delle acque.*

Tali condizioni non rispecchiano la reale situazione nei cantieri di lavoro della cava “La Madonna”, in quanto nelle aree in cui avvengono i tagli delle bancate le eventuali fratture aperte o beanti rinvenute, vengono tempestivamente sigillate impedendo il passaggio delle acque di taglio nel sottosuolo.

Inoltre, nei pressi dei macchinari in fase di taglio vengono sistemate delle opportune arginature e tubazioni al fine di evitare la dispersione delle acque lungo i piazzali di cava e di procedere al loro recupero attraverso l'impianto di depurazione e riciclo delle acque.”.

Ed inoltre che *“il numero di spore rilevato nella sorgente Pizzutello è relativamente basso, evidenziando una connessione idraulica poco significativa e di scarso potenziale inquinante per le sorgenti monitorate”.*

2.3.2.4) La circolazione idrica delle acque provenienti dall'area di escavazione attuale e di progetto della cava “La Madonna”

Prove di permeabilità in pozzetto di prova a fondo impermeabile e pareti costituite dallo stesso materiale non compattato, eseguite nel complesso estrattivo, hanno permesso di accertare che tale materiale ha un coefficiente di permeabilità medio K variabile tra 10^{-5} e 10^{-6} cm/sec e che, con la sua compattazione in situ, esso possa raggiungere un valore prossimo ai 10^{-7} cm/sec; la marmettola risulta pertanto impermeabile ed in grado di impedire infiltrazioni idriche nell'ammasso roccioso che costituisce i piazzali in lavorazione.

È necessario comunque chiarire che:

- la macchina tagliatrice a catena opera nella cava “La Madonna” senza l’utilizzo di acqua (“a secco”)
- le operazioni di taglio con macchinari che utilizzano acqua (tagliatrice a filo diamantato) avvengono in aree appositamente attrezzate e cementate e che sono ripulite a fine giornata lavorativa ed in caso di previsioni meteo avverse
- scopo delle modalità di gestione delle acque reflue di lavorazione è quello di isolare e tenere completamente separate le acque reflue di lavorazione (ARL) dalle altre acque circolanti nel complesso estrattivo (AMD) e, in tal modo, evitare il loro mescolamento; le ARL seguono pertanto un loro iter operativo ed un differente ciclo di gestione rispetto alle AMD risultandone separate durante l’attività lavorativa.

Per una più dettagliata descrizione del ciclo di gestione delle acque si rimanda alla specifica Relazione facente parte degli elaborati progettuali.

È comunque scopo della presente trattazione valutare se, in aggiunta anche a quanto visualizzato nelle sezioni di Tav. SI3, in scala 1:2000, nell’area di attuale escavazione le acque utilizzate nella sezionatura e perforazione dell’ammasso roccioso (tagli al monte con macchina a filo diamantato e “mine” realizzate con macchina oleodinamica perforante ed uso di acqua per il raffreddamento dell’utensile), possono infiltrarsi sia lungo le discontinuità con maggiore apertura e prive di materiale di riempimento che nelle aree ad elevata densità di fratturazione (“finimenti”) tratte dall’Allegato A e dalla Carta della fratturazione di Tav. 1 nella *RELAZIONE GEOMECCANICA*; esse sono riportate nella tabella che segue e nelle sezioni idrogeologiche D1 e D2 di Tav. SI3:

Tab. 8: cantiere a cielo aperto

Stendimento	Discontinuità *
15	1
	11
	19
	25
	41
	45
	66
	68
16	2
	7
17	1
	4
18	12
19	1
	6
	8
	9
	11
	13
	19

* alcune discontinuità, rilevate sui lati opposti del piazzale a cielo aperto, sono in continuità; comunque, per una migliore comprensione sono riferite allo stendimento nel quale sono state rilevate

Tab. 9: cantiere in galleria

Stendimento	Discontinuità *
21	1
	2
	3
	7
	10
22	1
	2
23	3
24	1
	3
25	1
26	5
	6
27	6

* alcune discontinuità, rilevate su fronti opposti della galleria, sono in continuità; comunque, per una migliore comprensione sono riferite allo stendimento nel quale sono state rilevate

Nelle sezioni idrogeologiche di Tav. SI3 è inoltre riportato il livello della superficie piezometrica rilevato durante l'esecuzione dei sondaggi S1 e S2, dalla loro analisi si evince che:

- la giacitura delle discontinuità analizzate è tale da escludere che esse possano intercettare le linee di alimentazione idrica geo-strutturale diretta delle sorgenti “Pizzutello” e “Gorgoglio”.
- come riportato al par. 2.1) durante l’esecuzione dei sondaggi è stato individuato il livello della falda acquifera alla quota 45.4 m dal boccapozzo di S1 e di 49.4 m dal boccapozzo di S2
- le sezioni di Tav. SI3 mostrano l’andamento della superficie piezometrica individuata dai sondaggi; essa, inclinata di 2.5° (4.4%), si trova:
 - ad una profondità minima di 32.7 m dallo “sbasso” a cielo aperto attuale (quota 212 m s.m.)
 - ad una profondità minima di 39.4 m dal piano di ingresso della galleria attuale (quota 221.55 m s.m.)
 - ad una profondità minima di 21.4 m dal piano basale a cielo aperto di progetto (quota 203 m s.m.)
 - ad una profondità minima di 23.5 m dal piano basale a cielo aperto attuale ricoperto di detrito (quota 202.5 m s.m.)
 - ad una profondità minima di 28.2 m dal piano basale della galleria di progetto (quota 209 m s.m.).

2.4) ANALISI DELLA CONNESSIONE TRA LE SORGENTI PIZZUTELLO E GORGOGLIO E LA MARMETTOLA PRODOTTA NELL’AREA IN CORSO DI LAVORAZIONE ED INTERESSATA DALLE SOLUZIONI PROGETTUALI DELLA CAVA “LA MADONNA” FINALIZZATA ALLA VERIFICA DELL’INTERFERENZA TRA LE ACQUE DI INFILTRAZIONE NELL’AREA DI ESCAVAZIONE ED IL BACINO DI ALIMENTAZIONE DELLE SORGENTI ESAMINATE

Il presente studio ha permesso di accertare quanto segue:

- a) il complesso estrattivo “La Madonna” è situato alla base del versante sud orientale del crinale disposto NNE – SSW del M. Pesaro.
- b) le sorgenti “Pizzutello” e “Gorgoglio” si trovano a Nord del centro abitato di Torano, frazione del Comune di Carrara, in sponda sinistra del Fosso di Curtana, ad una quota rispettivamente di 164.3 m s.m. e 170.0 m s.m.

La sorgente Pizzutello è “*emergente da detriti sovrastanti i marmi in galleria.*” (UNIGEO, 1967); essa ha una portata media (Q_{media}) di 30 l/sec.

La sorgente Gorgoglio è “*emergente dal bardiglio.*” (UNIGEO, 1967); la sua portata media Q_{media} è pari 40 l/sec.

c) come riportato al par. 2.1), al fine di individuare il livello della falda acquifera che alimenta le sorgenti per uso idropotabile “Pizzutello” e “Gorgoglio” all’interno della cava “La Madonna” la Ditta *RAGIONIERI LORIANO di Ragionieri Alessandro – Trivellazione Pozzi*, con sede in Via Francesca n. 2646 a Larciano (PT), su incarico della Società CAVE DI SPONDA, ha eseguito n. 2 sondaggi a distruzione di nucleo (S1 e S2) alle estremità nord orientale e sud occidentale del complesso estrattivo (foto nn. 1 e 2) con rivestimento di ogni foro di sondaggio per poter eseguire misure con sonda piezometrica. I sondaggi S1 e S2, realizzati nei giorni 24-25 giugno (S1) e 30 giugno – 1 luglio (S2) hanno raggiunto la profondità rispettivamente di 63 m e 55 m permettendo l’individuazione del livello della falda acquifera alla quota di 45.4 m dal boccapozzo di S1 e di 49.4 m dal boccapozzo di S2: il tutto meglio specificato nella relazione esplicativa della Ditta *RAGIONIERI LORIANO* riportata in allegato.

La loro ubicazione è riportata nelle Tavv. SI1 e SI2.

d) consultando l’ampia bibliografia idrogeologica disponibile è stato rilevato che l’alimentazione idrica delle sorgenti Gorgoglio e Pizzutello presenta due diverse tipologie che si possono così definire:

- alimentazione idrica geo-strutturale; le acque di infiltrazione nell’ammasso roccioso all’interno del sub-sistema idrogeologico “*Gorgoglio – Pizzutello*” e vanno ad alimentare le due sorgenti; tale tipo di alimentazione può essere:
 - a1) diretta; le acque scorrono all’interno dell’ammasso roccioso carbonatico lungo discontinuità molto persistenti ed aperte, la cui giacitura collega direttamente il luogo di immissione con le sorgenti
 - a2) profonda; le acque di infiltrazione penetrano in profondità attraverso le discontinuità delle rocce carbonatiche fino a raggiungere la zona di saturazione e vengono a giorno nelle due sorgenti seguendo una fascia caratterizzata da elevato carsismo
- alimentazione idrica alluvionale; le acque del Fosso di Curtana e del Fosso di Torano alimentano le sorgenti Pizzutello e Gorgoglio in quanto la quota del talweg dei corsi d’acqua unitamente alla litologia ed all’elevata fratturazione che caratterizzano le aree spondali in sinistra del Fosso di Curtana ed in destra del Fosso di Torano permettono l’afflusso idrico verso le due sorgenti, alimentato dalla falda di subalveo presente all’interno dei depositi alluvionali attuali e/o terrazzati che caratterizzano l’alveo dei due corsi d’acqua.

e) come riportato nella *RELAZIONE GEOMECCANICA*, il rilevamento geologico strutturale ha permesso di verificare che nell’ammasso roccioso esaminato sono presenti suddivisi in 8 famiglie a loro volta suddivise, per un totale di 12 sistemi di giunti, la cui giacitura media, numero di

giunti di appartenenza e stendimenti di rilevazione sono riportati in tabella 2 per quanto riguarda il complesso estrattivo nella sua totalità e nelle tabelle 3 e 4 riferite rispettivamente al cantiere a cielo aperto ed in galleria

- f) l'analisi dei dati strutturali ha accertato che la permeabilità dell'ammasso roccioso che costituisce il cantiere a cielo aperto risulta molto alta mentre il cantiere in galleria è caratterizzato da una minore conducibilità che rimane comunque alta (tabelle 5, 6 e 7).

È necessario ricordare quanto riportato al par. 2.3.2.1): sui gradoni e nei piazzali l'attività estrattiva produce un residuo solido a granulometria fine e molto fine ("marmettola") il quale viene compattato dal continuo passaggio dei mezzi meccanici; ciò, in aggiunta alla chiusura delle fratture beanti con malte cementizie rende impermeabile l'ammasso roccioso.

Pertanto il valore della conducibilità idraulica andrà riferito nella sua totalità solo per le bancate in lavorazione mentre i piazzali ed i gradoni risultano pressoché impermeabili. Prove di permeabilità in pozzetto di prova a fondo impermeabile e pareti costituite dallo stesso materiale non compattato, eseguite nel complesso estrattivo, hanno permesso di accertare che tale materiale ha un coefficiente di permeabilità medio K variabile tra 10^{-5} e 10^{-6} cm/sec e che, con la sua compattazione in situ, esso possa raggiungere un valore prossimo ai 10^{-7} cm/sec; la marmettola risulta pertanto impermeabile ed in grado di impedire infiltrazioni idriche nell'ammasso roccioso che costituisce i piazzali in lavorazione

- g) come riportato al par. 2.3.2.2) la distribuzione della permeabilità nella cava "la Madonna" ed in un suo intorno significativo rivela quanto segue:

- nel cantiere a cielo aperto la direttrice di infiltrazione idrica è costituita dalla retta di massima pendenza del piano di immersione N219 ed inclinazione di 50° e che i massimi valori di permeabilità (99%) sono situati lungo le rette di massima pendenza dei piani medi dei sistemi appartenenti al sistema di fratturazione K1, il più frequente, persistente e caratterizzato da una superiore apertura media rispetto alle altre famiglie di giunti oltre che, in misura quasi trascurabile, ai sistemi K4(a) e K5(a) ad immersione SSW e WSW
- nel cantiere in galleria: la direttrice di infiltrazione idrica è costituita dalla retta di massima pendenza del piano di immersione N207 ed inclinazione di 57° e che i massimi valori di permeabilità (99%) sono situati lungo le rette di massima pendenza dei piani medi dei sistemi appartenenti al sistema di fratturazione K1, il più frequente, persistente e caratterizzato da una superiore apertura media rispetto alle altre famiglie di giunti oltre che, in misura quasi trascurabile, al sistema K5(a) ad immersione SSW.

- h) le discontinuità presenti sui fronti in lavorazione interessate da una possibile infiltrazione idrica sono illustrate, relativamente al cantiere a cielo aperto ed in galleria, nelle tabelle 8 e 9.

Nelle sezioni idrogeologiche di Tav. SI3 è inoltre riportato il livello della superficie piezometrica rilevato durante l'esecuzione dei sondaggi S1 e S2; dalla loro analisi si evince che la giacitura delle discontinuità analizzate è tale da escludere che esse possano intercettare

le linee di alimentazione idrica geo-strutturale diretta delle sorgenti “Pizzutello” e “Gorgoglio”

- i) come riportato al par. 2.1), durante l’esecuzione dei sondaggi è stato individuato il livello della falda acquifera alla quota di 45.4 m dal boccapozzo di S1 e di 49.4 m dal boccapozzo di S2; la superficie piezometrica individuata dai sondaggi, inclinata di 1.7° (3.6%) si trova:
- ad una profondità minima di 32.7 m dallo “sbasso” a cielo aperto attuale (quota 212 m s.m.)
 - ad una profondità minima di 39.4 m dal piano di ingresso della galleria attuale (quota 221.55 m s.m.)
 - ad una profondità minima di 21.4 m dal piano basale a cielo aperto di progetto (quota 203 m s.m.)
 - ad una profondità minima di 23.5 m dal piano basale a cielo aperto attuale ricoperto di detrito (quota 202.5 m s.m.)
 - ad una profondità minima di 28.2 m dal piano basale della galleria di progetto (quota 209 m s.m.)
- l) le acque di scorrimento lungo le discontinuità illustrate nelle tabelle 8 e 9 possono, teoricamente, raggiungere la quota della superficie piezometrica ed entrare nel ciclo di alimentazione della sorgente “Pizzutello” (si esclude “Gorgoglio” per i motivi illustrati al par. 2.3.1) il quale, come riportato al paragrafo 2.3.1) e visualizzato in figura 3, è caratterizzato da zone di ricarica della falda di base che iniziano a circa 900-1200 m (CNR – Istituto di Geoscienze e Georisorse di Pisa, 2000 – 2002) e che quindi comprendono almeno tutto il bacino marmifero di Torano, a partire dalle pendici del M. Sagro.

2.5) ANALISI DELLA POSSIBILE O EVENTUALE CONNESSIONE TRA LA SORGENTE “PIZZUTELLO” E LE LAVORAZIONI NELLA CAVA “LA MADONNA” NELL’AREA DI ESCAVAZIONE ATTUALE E DI PROGETTO

Si premette che:

- in ottemperanza alle prescrizioni contenute nella vigente autorizzazione comunale all’escavazione ex L.R. n. 35/15 attualmente le operazioni di taglio in galleria avvengono senza l’utilizzo di acqua (“a secco”)
- le stesse prescrizioni sono osservate anche nelle operazioni di taglio a cielo aperto, le quali avvengono con l’utilizzo di 6 l/min di acqua al fine di raffreddare il filo diamantato ed impedire emissioni polverose dannose per la salute dei lavoratori; tale quantità di afflusso idrico non determina la genesi di materiale solido umido definito in gergo “marmettola”
- le soluzioni progettuali prevedono l’adozione delle stesse misure di tutela quali tagli a secco in galleria ed utilizzo di 6 l/min per i tagli a cielo aperto

- il monitoraggio in corso alla sorgente Pizzutello”, oggetto della relazione “*Report sull’andamento della torbidità nella sorgente Pizzutello di Carrara*” che ha per scopo il confronto tra l’analisi dei picchi di torbidità semestrale e le precipitazioni meteoriche, non ha registrato picchi di torbidità alla sorgente esaminata.

Anche con le premesse sopra riportate, è comunque scopo della presente trattazione la verifica se il materiale di sfrido prodotto nelle operazioni di taglio e perforazione (“*marmettola*”) nell’area di attuale escavazione ed in quella interessata dalle soluzioni progettuali oggetto di Piano di Coltivazione possa raggiungere le sorgenti “Pizzutello” e “Gorgoglio” contribuendo all’intorbidimento delle stesse.

La marmettola è prodotta dai seguenti macchinari (la macchina tagliatrice a catena opera a secco):

- ✓ macchina tagliatrice a filo diamantato, la quale produce un materiale di sfrido omogeneo, pulverulento, associabile granulometricamente ad un limo ($0.002 \text{ mm} < \Phi_{\text{grani}} < 0.06 \text{ mm}$);
- ✓ macchina perforante, la quale produce un materiale di sfrido eterogeneo compreso granulometricamente tra una sabbia grossolana ($\Phi_{\text{grani}} > 1.0 \text{ mm}$), con grani talvolta anche di diametro maggiore associabili a quelli di una ghiaia fine ($2.0 \text{ mm} < \Phi_{\text{grani}} < 10.0 \text{ mm}$).

Per quanto riguarda la marmettola prodotta dalla macchina tagliatrice a filo diamantato è necessario precisare che il filo diamantato seziona l’ammasso roccioso in bagno d’acqua agendo all’interno di perforazioni o di tagli precedentemente realizzati ed è sempre limitato, sul lato interno rispetto alla direzione di avanzamento, dal taglio già effettuato.

Le perforazioni, i tagli precedenti ed il taglio stesso costituiscono direttrici preferenziali di deflusso delle acque utilizzate per il raffreddamento dell’utensile ed inoltre il moto ellittico del filo stesso determina la quasi completa fuoriuscita delle acque stesse, favorita dalla ridotta granulometria dello sfrido.

La marmettola prodotta fuoriesce quasi completamente trasportata dalle acque di raffreddamento oppure, anche a causa dell’elevata evaporazione dovuta all’attrito tra utensile e roccia, rimane “*appiccicata*” alla superficie di taglio (è operazione di routine il lavaggio della bancata al termine del taglio stesso); il residuo si inserisce nelle scabrosità dei giunti sigillando le fratture presenti e, in tal modo, impedisce una significativa infiltrazione idrica significativa nell’ammasso roccioso.

In figura 4 si propone il diagramma di HJULSTROM (1939), nel quale è visualizzata la relazione tra le condizioni di erosione, trasporto o deposito dei materiali sottoposti a correnti e le loro caratteristiche granulometriche e che, a mio parere, può essere utilizzato per gli scopi della presente trattazione.

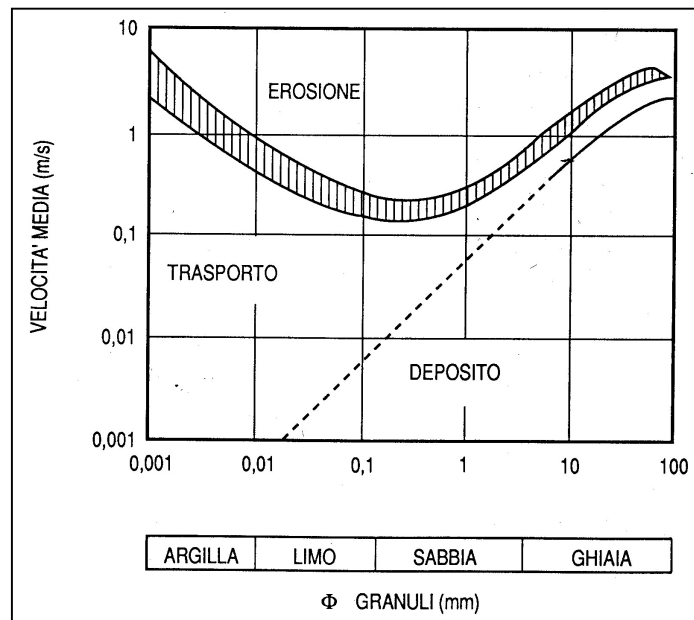


Fig. 4 – diagramma di HJULSTROM (1939)

Inserendo nel diagramma di HJULSTROM i valori, riportati nelle tabelle 6 e 7, della conducibilità idraulica K_m (dimensionalmente è una velocità) nei cantieri a cielo aperto ed in galleria dell'ammasso roccioso nell'area di attuale escavazione (pari rispettivamente a 211.56 mm/sec e 10.00 mm/sec) in funzione del diametro medio dei granuli della marmettola prodotta dalle macchine tagliatrici a filo diamantato e dalle macchine perforanti, sopra illustrati, si evince che essi sono nel campo interessato da *TRASPORTO* e quindi le discontinuità elencate in tabella 6 e 7 sono in grado di trasportare la marmettola proveniente dalle macchine tagliatrici a filo diamantato e, ad eccezione della frazione granulometrica superiore a circa 3 mm che ricade nel campo *DEPOSITO*, quasi tutta la marmettola prodotta dalla macchina perforante.

Come già affermato in precedenza, la marmettola prodotta dalle macchine tagliatrici a filo diamantato fuoriesce quasi completamente durante i tagli oppure rimane sulla superficie di sezionatura (è operazione di routine il lavaggio della bancata al termine del taglio stesso); il residuo si inserisce nelle scabrosità dei giunti sigillando le fratture presenti e, in tal modo, impedisce un'infiltrazione idrica significativa nell'ammasso roccioso; pertanto si ritiene che la marmettola prodotta dai tagli con macchina tagliatrice a filo diamantato non abbia la possibilità di infiltrarsi in maniera sensibile nell'ammasso roccioso e si esclude che essa possa raggiungere la superficie piezometrica; ciò è confermato da quanto riportato al par. 2.3.2.4):

- le operazioni di taglio con macchina tagliatrice a filo diamantato avvengono in aree appositamente attrezzate e cementate e che sono ripulite a fine giornata lavorativa ed in caso di previsioni meteo avverse
- scopo delle modalità di gestione delle acque reflue di lavorazione è quello di isolare e tenere completamente separate le acque reflue di lavorazione (ARL) dalle altre acque circolanti nel

complesso estrattivo (AMD) e, in tal modo, evitare il loro mescolamento; le ARL seguono pertanto un loro iter operativo ed un differente ciclo di gestione rispetto alle AMD risultandone separate durante l'attività lavorativa.

La problematica principale affrontata nel corso della presente trattazione consiste nella verifica circa la possibilità che la marmettola prodotta nella cava “La Madonna” possa raggiungere la sorgente “Pizzutello”.

A tal proposito si fa riferimento ai risultati del monitoraggio del Giugno 2009 illustrati al paragrafo 2.3.2.3) soprattutto per quanto riguarda il tempo intercorrente tra l'inizio della prova di immissione ed il primo rilevamento delle spore alla sorgente “Pizzutello”, detto *Tempo di corrvazione* T_c , riportati nella tabella 10 che segue:

Tab. 10 : monitoraggio (Giugno 2009)

Data e ora di immissione delle spore di <i>Lycopodium clavatum</i>	Data e ora di primo rilevamento immissione delle spore di <i>Lycopodium clavatum</i> nella sorgente Pizzutello	Tempo di corrvazione T_c
16/06/2009 ore 10,00	17/06/2009 ore 9,30	23 h e 30 min

Pertanto, l'acqua, e non la marmettola, che si infiltra all'interno delle discontinuità presenti nell'area di lavorazione attuale e di progetto della cava “La Madonna”, secondo il monitoraggio eseguito può impiegare, considerando la durata della fase di immissione, circa 22 h e 30 min (T_c) per raggiungere la sorgente “Pizzutello”.

Considerando:

- una distanza massima (d) tra l'area di coltivazione attuale e di progetto lungo la direzione di infiltrazione che, al momento del monitoraggio era di circa 110 m
- una velocità di flusso massima delle acque di infiltrazione, riscontrata all'epoca lungo le discontinuità del cantiere a cielo aperto (v_i) pari a 13.18 cm/sec

utilizzando la (2):

$$T_i = d / v_i \quad (2)$$

si determina che le acque di infiltrazione impiegavano circa 14 minuti (che costituiscono il tempo definito di *infiltrazione* T_i) per raggiungere la superficie piezometrica.

Si può quindi determinare, mediante la relazione (3) quanto avrebbero impiegato (T_p) le acque provenienti dalla cava “La Madonna” per infiltrazione nell'ammasso roccioso, a raggiungere la sorgente “Pizzutello” seguendo la superficie piezometrica:

$$T_p = T_c - T_i \quad (3)$$

sostituendo nella (2) è risultato un valore di T_p pari a 22 h e 16 minuti.

Considerando il percorso che le acque di infiltrazione dalla cava “la Madonna” dovevano compiere, all'epoca del monitoraggio, per raggiungere la sorgente “Pizzutello”, era pari a 520 m,

si può determinare, utilizzando la formula inversa della (2), la velocità di flusso (v_f) lungo la piezometrica stessa, risultata pari a 6.4×10^{-3} m/sec; tale valore è indicativo di un mezzo poroso caratterizzato da buona permeabilità.

Inserendo nel diagramma di HJULSTROM di figura 6 il valore di v_f in funzione della granulometria della marmettola prodotta dalle macchine tagliatrici a catena e delle macchine perforanti, si evidenzia che il sistema rientra nel campo di *DEPOSITO* e la corrente di flusso non è in grado di trasportare la marmettola alla sorgente la quale, invece, precipita verso la parte basale dell'acquifero; tale conclusione, basata su dati che riguardano la sorgente "Pizzutello", possono essere estese, anche per quanto riportato al par. 2.3.1) alla sorgente "Gorgoglio"

A conclusione del presente paragrafo, a quanto sopra esposto si può aggiungere che nei giorni di esecuzione dei sondaggi ed in quelli successivi non sono stati registrati picchi di torbidità alle sorgenti "Pizzutello" e "Gorgoglio"

2.6) CONCLUSIONI IN MERITO ALLA CONNESSIONE TRA LA SORGENTE "PIZZUTELLO" E LA MARMETTOLA PRODOTTA NELLA CAVA "LA MADONNA" NELL'AREA DI ESCAVAZIONE ATTUALE E DI PROGETTO

Per quanto esposto nel corso della presente trattazione si può affermare che:

- come visualizzato nella Carta idrogeologica di Tav. SI1 e nella planimetria di Tav. SI2 la giacitura delle discontinuità analizzate e la conseguente direttrice di infiltrazione idrica nel sottosuolo **escludono che esse possano intercettare le linee di alimentazione idrica geostutturale diretta delle sorgenti "Pizzutello" e "Gorgoglio"**
- una parte delle acque di infiltrazione provenienti dalle lavorazioni nell'area di escavazione attuale e di progetto della cava "La Madonna" possono teoricamente raggiungere la superficie piezometrica che caratterizza l'acquifero di alimentazione della sorgente "Pizzutello", caratterizzato da zone di ricarica della falda di base che iniziano a circa 900-1200 m (CNR – Istituto di Geoscienze e Georisorse di Pisa, 2000 – 2002) e che quindi comprendono almeno tutto il bacino marmifero di Torano, a partire dalle pendici del M. Sagro.

Poiché la marmettola può interessare le sorgenti solo se trasportata dalle linee di alimentazione idrica, **le verifiche eseguite nella presente trattazione hanno escluso l'esistenza di una connessione tra la sorgente "Pizzutello" (e, di conseguenza, della sorgente "Gorgoglio") con la marmettola prodotta nella cava n. 64 "La Madonna" in situazione attuale e durante le lavorazioni di progetto.**

Tali conclusioni sono avvalorate dal monitoraggio in corso nella sorgente "Pizzutello" il quale, anche durante e nei giorni seguenti la realizzazione dei sondaggi S1 e S2, i quali hanno interessato la falda idrica di alimentazione, non sono stati registrati picchi di torbidità alla sorgente monitorata.

Carrara, li 18/09/2025

il Geologo