

“TACCU SA PRUNA”

Impianto di accumulo idroelettrico mediante pompaggio
ad alta flessibilità

Comune di Esterzili (SU)

COMMITTENTE



COORDINAMENTO / MANDANTE



Progettisti: Ing. Luigi Lorenzo Papetti

PROGETTAZIONE GEOTECNICA /
MANDATARIA

GEODES



Progettista: Ing. Luisella Vai

Relazione geotecnica generale

REV.	DESCRIZIONE	DATA	REDATTO	VERIFICATO	APPROVATO
0	PRIMA EMISSIONE	Mag. 22	SP	LV	PAC
Codice commessa: 1351		Codifica documento: 1351-A-GD-R-03-0			

INDICE

1.	INTRODUZIONE	1
2.	INQUADRAMENTO GEOLOGICO	2
2.1	Caratteri generali	2
2.2	Stratigrafia dell'area di studio.....	3
2.2.1	Arenarie di San Vito (SVI).....	4
2.2.2	Metadoleriti (MD)	4
2.2.3	Formazione di Monte Santa Vittoria (MSV)	5
2.2.4	Filoni di porfidi granitici (FP)	5
2.2.5	Formazione di Genna Selole (GNS)	5
2.2.6	Formazione di Dorgali (DOR)	6
2.2.7	Depositi alluvionali (USS)	7
2.2.8	Travertini (F1).....	7
2.2.9	Depositi di versante (A)	7
2.3	Assetto strutturale dell'area di studio	8
2.4	Tettonica recente	9
2.5	Caratteristiche geomorfologiche dell'area di intervento	10
2.6	Caratteri idrogeologici.....	10
3.	CAMPAGNA DI INDAGINE 2021-2022.....	13
3.1	Sondaggi geognostici	13
3.2	Prove di laboratorio.....	14
3.3	Rilievi geomeccanici	15
3.4	Prove di permeabilità in foro	15
3.5	Indagini geofisiche	16
4.	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA	18
4.1	Individuazione delle unità geotecniche e caratterizzazione stratigrafica.....	18
4.2	Risultanze delle prove di laboratorio	21
4.2.1	Caratterizzazione delle dolomie - Unità D	21
4.2.1.1	Caratteristiche fisiche	21
4.2.1.2	Caratteristiche di resistenza e di deformabilità	23
4.2.2	Caratterizzazione delle siltiti - Unità S.....	25
4.2.2.1	Caratteristiche fisiche	26
4.2.2.2	Caratteristiche di resistenza e di deformabilità	26
4.2.3	Caratterizzazione dei metaconglomerati - Unità M.....	29
4.2.3.1	Caratteristiche fisiche	29
4.2.3.2	Caratteristiche di resistenza e di deformabilità	30
4.2.4	Caratterizzazione delle arenarie - Unità A.....	32

4.2.4.1	Caratteristiche fisiche	32
4.2.4.2	Caratteristiche di resistenza e di deformabilità.....	33
4.2.5	Caratterizzazione del Detrito Colluviale - Unità DC	36
4.3	Risultanze delle prove in sito	36
4.3.1	Prove Lugeon	36
4.3.2	Prove Down-Hole	37
4.4	Rilievi geomeccanici	40
4.5	Caratterizzazione della roccia intatta	44
4.6	Classificazione geomeccanica dell'ammasso roccioso	45
4.6.1	Indici di classificazione RMR e GSI	46
4.7	Caratterizzazione geotecnica dell'ammasso roccioso	49
4.7.1	Definizione dei parametri di resistenza	49
4.7.2	Definizione dei parametri di deformabilità	50
4.8	Parametri geotecnici caratteristici	50
4.8.1	Parametri geotecnici caratteristici per l'Unità D	50
4.8.2	Parametri geotecnici caratteristici per l'Unità S	51
4.8.3	Parametri geotecnici caratteristici per l'Unità M	51
4.8.4	Parametri geotecnici caratteristici per l'Unità A	51
5.	PROBLEMATICHE GEOTECNICHE ATTESE	53
5.1	Fenomeni deformativi a grande profondità.....	54
6.	BIBLIOGRAFIA.....	59

TABELLE

Tabella 3.1 – Prove Lugeon

Tabella 4.1 – Unità D: peso di volume determinato in laboratorio

Tabella 4.2 – Esiti delle prove Los Angeles e di resistenza al gelo-disgelo dell'unità D

Tabella 4.3 – Unità D: prova di compressione monoassiale

Tabella 4.4 – Unità D: prove di compressione triassiale

Tabella 4.5 – Unità S: peso di volume determinato in laboratorio

Tabella 4.6 – Unità S: prove di compressione monoassiale

Tabella 4.7 – Unità S: prove di compressione triassiale

Tabella 4.8 – Unità M: peso di volume determinato in laboratorio

Tabella 4.9 – Unità M: prove di compressione monoassiale

Tabella 4.10 – Unità M: prova di compressione triassiale

Tabella 4.11 – Valori di K da assumere in funzione di Is secondo Palmstrom

Tabella 4.12 – Unità A: resistenza a compressione da prove di Point Load effettuate su campioni prelevati dal sondaggio NA2

- Tabella 4.13 – Unità A: resistenza a compressione da prove di Point Load effettuate su campioni prelevati da affioramenti rocciosi
- Tabella 4.14 – Unità A: Resistenza a compressione da prove di Point Load Test per le due sotto unità
- Tabella 4.15 – Prove Lugeon: valori del coefficiente di permeabilità
- Tabella 4.16 - Down-Hole NA1: parametri elastici ricavati
- Tabella 4.17 – Stazione geo-strutturale GNA-01: sistemi di discontinuità rilevati
- Tabella 4.18 – Stazione geo-strutturale GNA-01: valore di JCS da misure sclerometriche
- Tabella 4.19 - Stazione geo-strutturale GNA-01: sistemi di discontinuità rilevati
- Tabella 4.20 - Stazione geo-strutturale GNA-02: valore di JCS da misure sclerometriche
- Tabella 4.21 - Parametri del criterio di Hoek-Brown per roccia intatta
- Tabella 4.22 - Valori dei coefficienti numerici che compongono l'indice RMR (Bieniawski, 1989)
- Tabella 4.23 - Unità A: indici di classificazione BRMR e GSI dell'ammasso roccioso
- Tabella 4.24 - Unità D, S ed M: indice di classificazione GSI dell'ammasso roccioso
- Tabella 4.25 - Unità D: parametri fisici, di resistenza e di deformabilità
- Tabella 4.26 - Unità S: parametri fisici, di resistenza e di deformabilità
- Tabella 4.27 - Unità M: parametri fisici, di resistenza e di deformabilità
- Tabella 4.28 - Unità A: parametri fisici, di resistenza e di deformabilità
- Tabella 5.1 - Classificazione preliminare dello stato di sollecitazione nell'intorno delle opere sotterranee
- Tabella 5.2 - Classificazione dello stato di sollecitazione massimo
- Tabella 5.3 - Unità A: parametri utilizzati nell'abaco GDE Multiple Graph (Russo et al, 2014)
- Tabella 5.4 - Unità A: valori di deformazione percentuale attesa alla massima copertura
- Tabella 5.5 - Unità A: stima del raggio plastico nell'intorno dello scavo

FIGURE

- Figura 2.1 - Schema strutturale dell'area di Sa Pruna (da Note illustrative F. Mandas, Progetto CARG). Il cerchio rosso indica l'area di studio.
- Figura 2.2 – Schema stratigrafico dell'area di Sa Pruna.
- Figura 2.3 – Carta geologica di progetto
- Figura 2.4 - Carta dei corpi di frana dell'area circostante quella in esame.
- Figura 2.5 - Distribuzione delle sorgenti nell'area di studio
- Figura 3.1 - Posizione dei sondaggi a carotaggio continuo eseguiti
- Figura 3.2 - Posizione dei profili delle indagini geofisiche
- Figura 4.1 – Unità D: parametri di resistenza e deformabilità ottenuti dalle prove di compressione monoassiale rapportati alla profondità di campionamento
- Figura 4.2 – Unità D: prove di compressione triassiale sul piano delle tensioni principali

- Figura 4.3 – Unità S: parametri di resistenza e deformabilità ottenuti dalla prova di compressione monoassiale rapportati alla profondità di campionamento
- Figura 4.4 – Unità S: prove di compressione triassiale sul piano delle tensioni principali
- Figura 4.5 – Unità M: parametri di resistenza e deformabilità ottenuti dalla prova di compressione monoassiale rapportati alla profondità di campionamento
- Figura 4.6 – Unità M: prove di compressione triassiale sul piano delle tensioni principali
- Figura 4.7 – Unità A: parametri di resistenza ottenuti dalla prova di Point Load effettuata su frammenti prelevati da affioramenti rocciosi
- Figura 4.8 – Down-Hole NA1: Dromocrone e calcolo della velocità di strato
- Figura 4.9 – Down-Hole NA1: diagramma delle velocità delle onde P e SH
- Figura 4.10 – Down-Hole NA1: andamento con la profondità del rapporto di Poisson
- Figura 4.11 – Localizzazione delle due stazioni di rilievo geomeccanico
- Figura 4.12 – Ripresa dell'affioramento roccioso dove è stata rilevata la stazione geo-strutturale GNA-01
- Figura 4.13 – Rappresentazione stereografica dei sistemi di discontinuità rilevati nella stazione geo-strutturale GNA-01
- Figura 4.14 - Ripresa dell'affioramento roccioso dove è stata rilevata la stazione geo-strutturale GNA-02
- Figura 4.15 - Rappresentazione stereografica dei sistemi di discontinuità rilevati nella stazione GNA-02
- Figura 4.16 - Abaco per la determinazione dell'indice GSI per ammassi rocciosi fratturati
- Figura 4.17 - Abaco per la determinazione dell'indice GSI per ammassi rocciosi fratturati. in blu i valori caratteristici delle Unità D ed S e in rosso i valori caratteristici dell'Unità M
- Figura 5.1 - Unità A: applicazione del GDE Multiple Graph
- Figura 5.2 - Unità A: deformazione percentuale attesa alla massima copertura

1. INTRODUZIONE

La presente relazione di caratterizzazione geotecnica è stata redatta per conto di FROSIO NEXT S.r.l. nell'ambito del progetto di autorizzazione dell'impianto di accumulo idroelettrico mediante pompaggio ad alta flessibilità denominato "Taccu sa Pruna", nel comune di Esterzili (SU).

Nella presente relazione sono state esaminate le risultanze della campagna di indagini effettuata tra novembre 2021 e febbraio 2022 allo scopo di consentire la caratterizzazione geotecnica dei terreni e degli ammassi rocciosi interessati dalla realizzazione delle opere sotterranee afferenti al progetto del citato impianto.

I dati ottenuti dall'insieme delle indagini in situ e dalle prove di laboratorio, unitamente alle informazioni fornite dalla caratterizzazione geologica, sono stati interpretati allo scopo di definire il modello geotecnico di riferimento, di redigere il profilo geotecnico in asse al tracciato delle opere e di definire i parametri geotecnici utili alla progettazione delle opere sotterranee previste dal progetto.

Nello specifico, la presente relazione riporta al Capitolo 2 una breve sintesi dell'inquadramento geologico, mentre al Capitolo 3 viene descritta la campagna di indagini effettuata. Nel Capitolo 4 si riportano i dati ottenuti dalle prove di caratterizzazione geotecnica e, infine, nel Capitolo 5 vengono definiti, attraverso l'interpretazione dei dati disponibili, i parametri geotecnici caratteristici degli ammassi rocciosi che interessano le diverse opere in progetto.

La normativa di riferimento è costituita da:

- D.M. 17 gennaio 2018 "Norme tecniche per le costruzioni" - NTC 2018
- Circolare 11 febbraio 2019, n. 617/C.S.LL.PP.

Gli elaborati di riferimento per la presente relazione sono:

- 1351-A-OP-R-01 - Relazione geologica
- 1351-A-OP-D-01 - Carta geologica
- 1351-A-OP-D-02 - Sezione geologica interpretativa
- 1351-A-OP-A-01 - Sintesi stratigrafie sondaggi
- 1351-A-OP-A-02 - Rilievi geomeccanici
- 1351-A-OP-A-03 - Prove geotecniche di laboratorio
- 1351-A-OP-A-04 - Analisi di laboratorio
- 1351-A-OP-A-05 - Indagini geofisiche

2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

Nel presente capitolo si riporta una breve sintesi dell'inquadramento geologico del sito su cui verrà ubicata l'opera in progetto. Per maggiori dettagli si rimanda all'elaborato 1351-A-OP-R-01 - Relazione geologica

2.1 Caratteri generali

Come ben evidenziato dalla *Relazione geologica*, lo scenario geologico e geomorfologico entro cui si sviluppa il progetto è caratterizzato da rocce paleozoiche metamorfiche e da depositi carbonatici mesozoici con esigue coperture sedimentarie di età cenozoica.

Le rocce paleozoiche sono riconducibili a successioni depositate durante il Cambriano e l'Ordoviciano, metamorfosate e deformate durante le fasi collisionali ed estensionali dell'orogenesi varisca. L'area di studio fa parte dell'Unità tettonica di Meana Sardo (in una posizione strutturale immediatamente al di sopra dell'Unità tettonica del Gerrei, Figura 2.1) che ha un metamorfismo di basso grado e che appartiene alla cosiddetta "Zona a falde" della catena varisca. I depositi mesozoici, discordanti sulle rocce metamorfiche, sono essenzialmente conglomerati e siltiti argillose e soprattutto dolomie di età Giurassica in giacitura sub-orizzontale che formano altopiani tabulari, noti come "Tacchi".

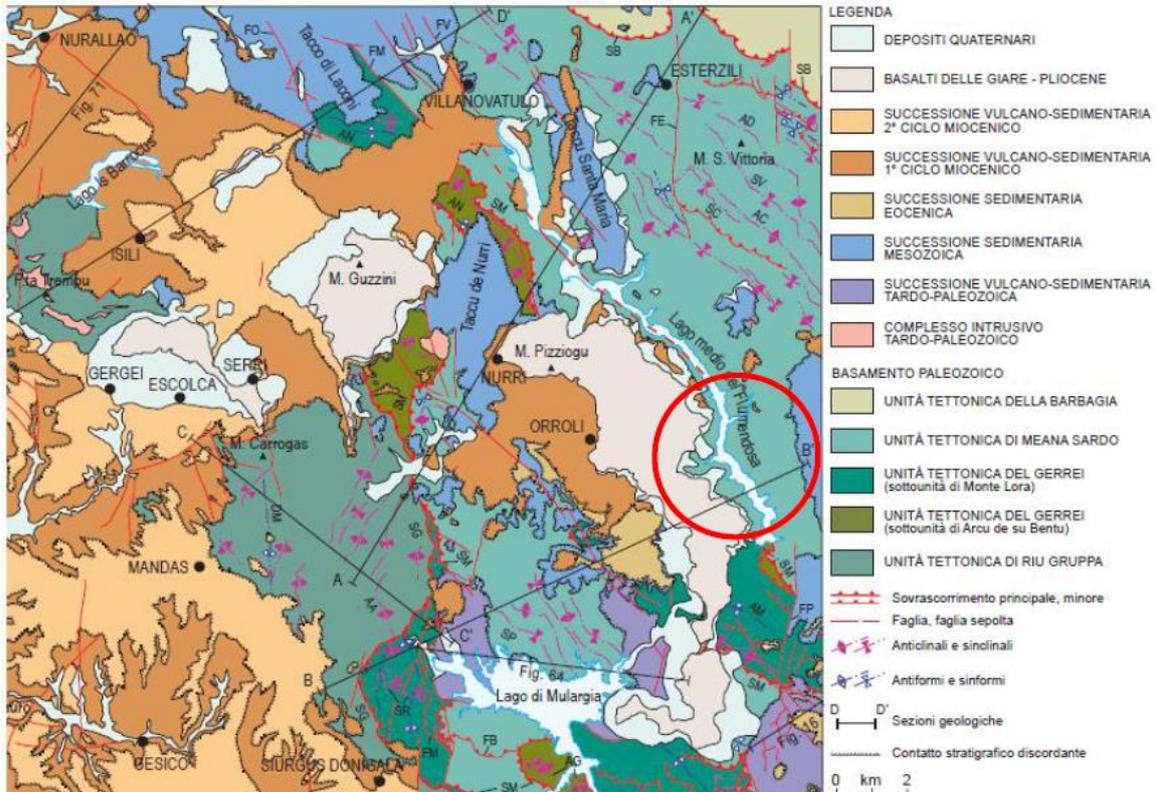


Figura 2.1 - Schema strutturale dell'area di Sa Pruna (da Note illustrative F. Mandas, Progetto CARG). Il cerchio rosso indica l'area di studio.

2.2 Stratigrafia dell'area di studio

La stratigrafia dell'area comprende formazioni di età paleozoica (principalmente rocce metamorfiche e subordinatamente rocce magmatiche) e depositi prevalentemente carbonatici giurassici. Sono poi presenti sottili coperture cenozoiche (Figura 2.2 e Figura 2.3).

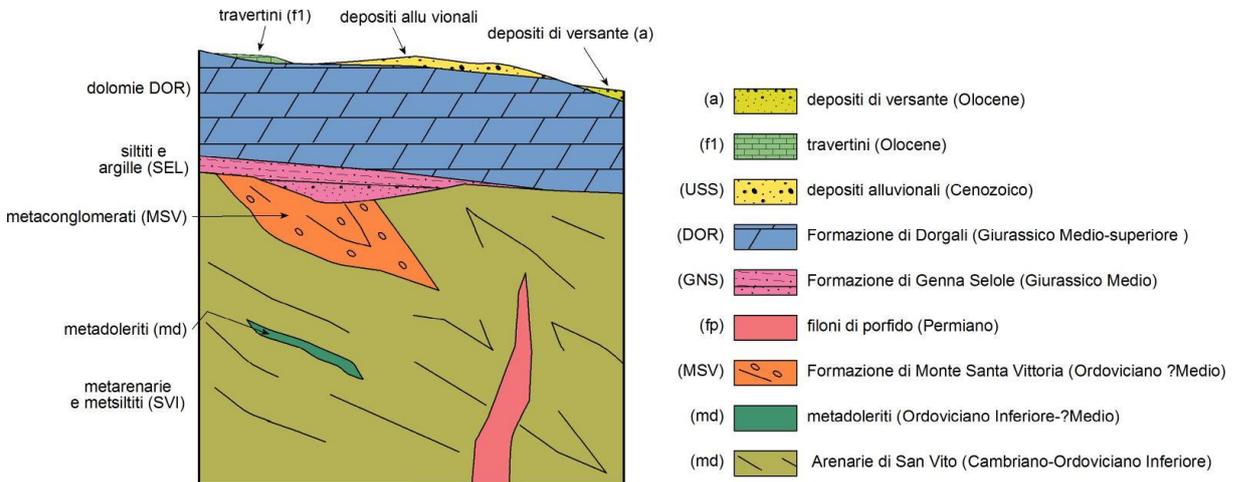


Figura 2.2 – Schema stratigrafico dell'area di Sa Pruna.

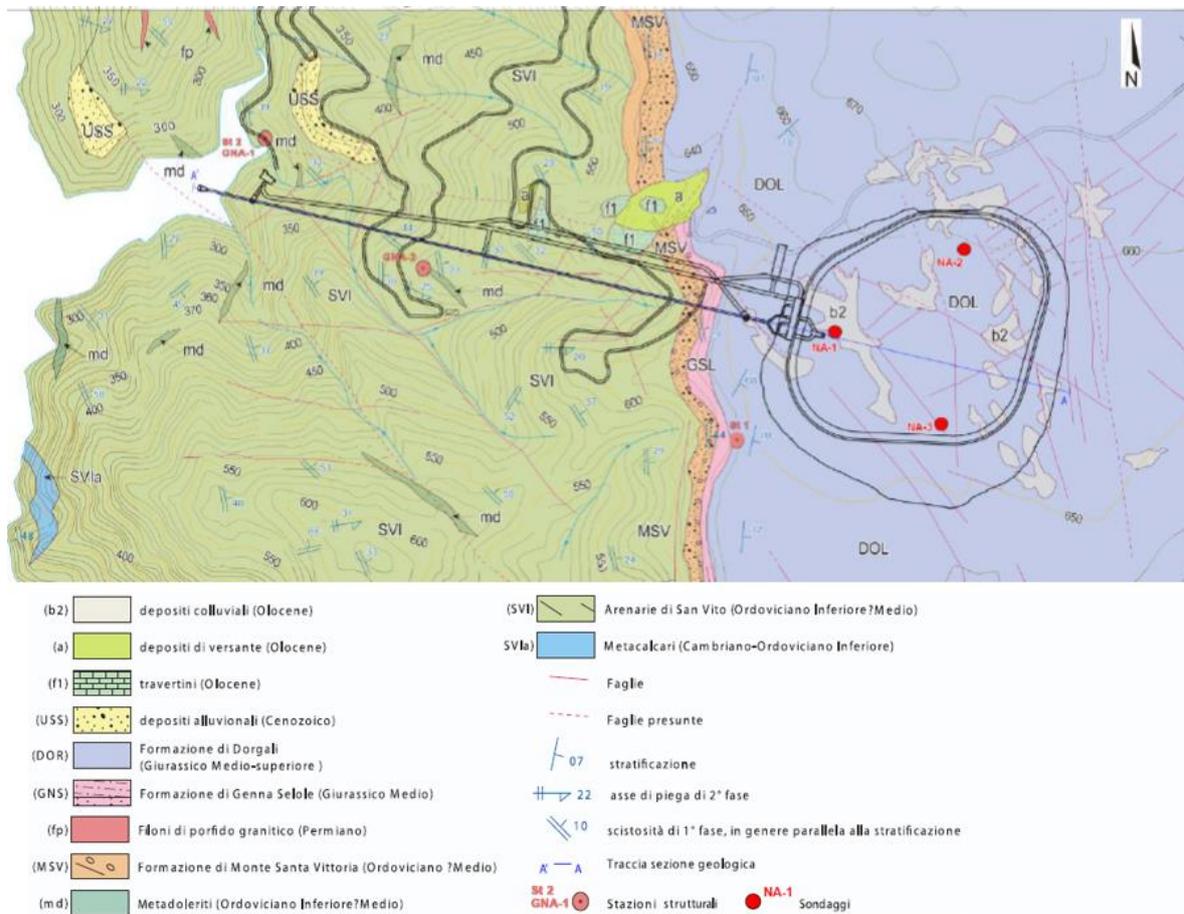


Figura 2.3 – Carta geologica di progetto

2.2.1 Arenarie di San Vito (SVI)

Si tratta di una potente successione terrigena ben affiorante nell'area di studio. Affiora estesamente anche in tutte le alde esterne dove questi metasedimenti rappresentano i termini più antichi affioranti; pertanto la base della successione non è conosciuta.

Nell'area di interesse quest'unità poggia tettonicamente sopra l'Unità del Gerrei, mentre il contatto con la sovrastante successione vulcano-sedimentaria ordoviciana è stratigrafico ed è spesso marcato da un caratteristico livello di metaconglomerati, oppure direttamente, come nel nostro caso, da metavulcaniti o metaepiclastiti (Formazione di Monte Santa Vittoria). La successione è costituita da metarenarie micacee, quarziti e, più raramente, metarenarie feldspatiche e metagrovacche, di colore variabile dal grigio-verdastro al grigio scuro.

Queste metareniti formano regolari alternanze, da centimetriche a metriche, con metasiltiliti e metapeliti grigio-verdastre e scure. Per aumento di spessore degli intervalli arenitici, si passa localmente a metarenarie e quarziti con sottili intercalazioni filladiche scure. Le metareniti sono generalmente ben selezionate, ricche di miche detritiche e con scarsa matrice cloritico-sericitica.

Lo spessore di questa successione potrebbe corrispondere a diverse centinaia di metri. L'età della formazione, pressoché azoica, è basata sul rinvenimento di acritarchi del Cambriano Superiore – Ordoviciano inferiore.

2.2.2 Metadoleriti (MD)

Conosciute in letteratura anche col termine di metabasiti, si tratta di corpi filoniani che intrudono le Arenarie di San Vito. Questi originari corpi ipoabissali sono interessati dal metamorfismo regionale con una scistosità analoga per giacitura a quella delle metamorfiti incassanti, ma con minore pervasività. Macroscopicamente si presentano in genere con un aspetto grigio scuro, con sfumature verdastre, talvolta con una evidente porfiricità per fenocristalli di plagioclasio. Lo spessore dei corpi filoniani è variabile in genere da 1 a 5-6 m. La loro età può essere riferita all'Ordoviciano Medio-Superiore in quanto intrudono le Arenarie di San Vito, ma non attraversano mai le formazioni dell'Ordoviciano Superiore. Queste rocce basiche, con affinità chimica di tipo alcalino, sono interpretate come originari basalti intra-placca in giacitura intrusiva.

2.2.3 *Formazione di Monte Santa Vittoria (MSV)*

Si tratta di rocce metamorfiche provenienti da originarie vulcaniti e dai loro derivati di rimaneggiamento, non sempre in un preciso ordine stratigrafico. Nell'area di studio, le metavulcaniti affiorano alla base. Si tratta di metarioliti afiriche bianco-giallastre a tessitura finemente scistosa con scarsi fenocristalli di quarzo e K-feldspato di piccole dimensioni, immersi in una massa di fondo microcristallina più o meno sericitica e localmente silicizzata. Lo spessore di questa litofacies è variabile da zero a 20-30 m, con forti variazioni laterali. Al di sopra delle metarioliti, ma anche direttamente sulle Arenarie di San Vito, sono presenti le metaepiclastiti: ossia metagrovacche litiche, metarenarie vulcaniche e metaconglomerati. Lo spessore dell'intera formazione sembra variare localmente da pochi metri fino a circa un centinaio di metri.

2.2.4 *Filoni di porfidi granitici (FP)*

Corpi filoniani con struttura isotropa porfirica, sono diffusamente presenti nell'area circostante quella di studio, anche se non rilevati durante i rilievi speditivi effettuati nell'area di interesse. Ciononostante, non si esclude che siano presenti nel sottosuolo dell'area di intervento e che dunque possano essere intercettati dalle opere di scavo per la realizzazione delle opere in progetto.

Sono rocce più tenaci e compatte rispetto alle rocce incassanti e di norma costituiscono zone morfologicamente in rilievo. Hanno una buona costanza di giacitura, in genere nettamente discordante rispetto alle discontinuità presenti nel basamento (superfici di scistosità o contatti tettonici). Le direzioni variano tra N-S e NNW-SSE. Le dimensioni sono variabili, da qualche metro a diverse decine di metri di lunghezza, con spessori in genere metrici. L'età è quella del magmatismo tardo-orogenco ercinico, ossia Carbonifero Superiore - Permiano.

2.2.5 *Formazione di Genna Selole (GNS)*

Nell'area di studio, alla base della cornice carbonatica giurassica, questa formazione affiora con spessori in genere modesti, fino a circa 20 m. In altre località anche presso l'area di studio, le rocce carbonatiche giurassiche poggiano direttamente sul basamento metamorfico senza la presenza di questa formazione.

Spesso le condizioni di affioramento sono sfavorevoli, a causa della scarsa resistenza all'erosione di parte di queste rocce e della presenza di depositi di versante e accumuli di blocchi in frana da crollo che bordano le cornici del Tacco di Sa Pruna.

Questa formazione è composta, alla base, da conglomerati monogenici quarzosi con intercalazioni di quarzoareniti biancastre. Seguono verso l'alto, prevalenti argille bianche o grigio-chiare caolinitiche con clasti ben arrotondati dei litotipi del basamento resistenti all'erosione (quarzo prevalente, "liditi", quarziti, etc.) e siltiti o argilliti carboniose e arenarie fini siltitiche. Sono frequenti le strutture sedimentarie quali gradazioni, laminazioni incrociate e parallele.

Associate alle argille si rinvengono spesso siltiti e arenarie fini siltose da grigio-scuro a grigie e frammenti, localmente abbondanti, di lignite nera con la caratteristica fratturazione concoide con subordinate intercalazioni di microconglomerati monogenici quarzosi. Nelle argilliti e siltiti sono abbondanti resti vegetali e pirite.

Nell'area rilevata, questa formazione poggia in discordanza sul basamento metamorfico. Nella parte alta della formazione sono talora presenti arenarie giallastre a cemento dolomitico, prodromiche alle dolomie sovrastanti (Formazione di Dorgali). In base alle paleoflore, l'unità è attribuita al Giurassico Medio (Dogger).

2.2.6 Formazione di Dorgali (DOR)

Questa formazione è ben rappresentata nel settore orientale dell'area di studio, dove ha giacitura da sub-orizzontale a debolmente inclinata (2-10°) e costituisce una serie di altopiani tabulari, detti "Tacchi" (Taccu sa Pruna nel nostro caso), che caratterizzano fortemente la morfologia della regione.

La formazione ricopre in concordanza quella di Genna Selole o poggia direttamente sul basamento paleozoico; il limite superiore dell'unità è sempre erosivo, con differenti formazioni discordanti su di essa: depositi alluvionali cenozoici (forse la formazione di Ussana dell'Oligocene superiore) oppure i depositi quaternari (di versante, colluviali, etc.). Nella parte basale è costituita da calcari marnosi e marne da giallastri a grigi, con locali intercalazioni arenacee grigio-verdastre. Seguono dolomie e calcari dolomitici di colore da biancastro a nocciola a grigio chiaro, fossiliferi (gasteropodi, ostracodi, lamellibranchi, brachiopodi), in banchi da decimetrici a metrici.

La successione è spesso laminata alla base e verso l'alto è ben stratificata con strati generalmente decimetrici fino a bancate di circa un metro di potenza. Lo spessore massimo affiorante nell'area di intervento è di circa 40 metri.

2.2.7 *Depositi alluvionali (USS)*

Nell'area di studio questa unità litostratigrafica affiora in piccoli lembi isolati ed è rappresentata da conglomerati sia clasto- che matrice-sostenuti, fortemente eterometrici, poligenici e con matrice arenacea e da arenarie poco classate, con un'organizzazione in bancate grossolane. La frazione conglomeratica è di gran lunga quella litologicamente prevalente, in genere con clasti elaborati di dolomie e calcari mesozoici e di metamorfiti e quarzo filoniano di età paleozoica.

L'ambiente deposizionale può essere vario: i sedimenti più grossolani con assetto caotico, che hanno subito trasporto limitato, corrispondono a depositi di scarpata e di conoide alluvionale, quelli più fini sono riferiti ai sistemi conoide-piana alluvionale, comunque in clima semiarido.

In alcune aree è evidente come il deposito fosse canalizzato, come evidenziato anche da alcune campagne di sondaggi eseguite presso l'area di studio (Nuraghe Accodulazzu, Su Cannisoni - Santu Lucifero), che confermano spessori consistenti (fino ad oltre 150 m) in zone circoscritte e riconducono questi depositi a un paleo-alveo (lungo una faglia in corrispondenza dell'attuale Lago Medio del Flumendosa) che, al momento, da oltre quota 700 m s.l.m. scende fino a quota 230 m. Le direzioni di paleocorrente indicano una direzione prevalentemente verso S-SW.

2.2.8 *Travertini (F1)*

Depositi di travertino, generalmente compatto e fitoermale, con abbondanti resti vegetali, affiorano presso i bordi delle coperture carbonatiche mesozoiche nell'area in studio. Sono associati alla precipitazione di carbonati, in genere da parte di alghe calcaree, ma anche per la rapida degassazione associata a variazioni di pendenza e di temperatura, presso sorgenti talora anche non più attive. Questi depositi non sono attuali (comunque olocenici) e non più in equilibrio con le attuali condizioni morfogenetiche in quanto sono sempre dissecati e, a volte, soggetti a dissesti gravitativi legati a crolli ben localizzati.

2.2.9 *Depositi di versante (A)*

Si tratta di depositi detritici costituiti da clasti angolosi con rara classazione e granulometria variabile, accumulati essenzialmente per gravità lungo i versanti rocciosi più ripidi delle cornici dolomitiche o lungo i versanti delle rocce metaforfiche. In certi casi, si tratta di limitati accumuli di blocchi o corpi di frana da crollo. Lo spessore è in genere limitato, fino a circa 3-4 m.

2.3 Assetto strutturale dell'area di studio

L'assetto strutturale dell'area di intervento è principalmente legato alla tettonica polifasica dell'orogenesi varisica, che ha determinato la struttura fondamentale del basamento metamorfico paleozoico durante il Carbonifero superiore - Permiano, e, in maniera più blanda, dallo sviluppo della tettonica terziaria. L'evoluzione tettonica varisica si articola, a grandi linee, in una fase di raccorciamento (D1), connessa alla collisione continentale, ed una fase estensionale post-collisionale (D2). La fase di raccorciamento è quella che ha prodotto le deformazioni più consistenti, pervasive a tutte le scale, con metamorfismo di basso grado sin-cinematico e formazione di sovrascorrimenti che hanno sovrapposto le diverse unità tettoniche, e al loro interno ha prodotto pieghe isoclinali coricate con ampiezza a volte chilometrica ed una marcata scistosità di piano assiale.

Durante la fase post-collisionale, il riequilibrio isostatico dell'edificio a falde sviluppa pieghe asimmetriche con piani assiali sub-orizzontali e zone di taglio con cinematica diretta, impostate sui fianchi delle antiformi, che favoriscono il sollevamento dei nuclei più profondi delle unità tettoniche, esasperando la geometria antiformale dell'edificio a falde acquisita durante la fase tardiva compressiva.

In affioramento, nella area in studio, la stratificazione è molto spesso trasposta sulla scistosità principale. Ciò rende difficile il riconoscimento delle strutture plicative D1 quando mancano forti contrasti litologici e soprattutto lungo i fianchi delle pieghe D1. Nelle Arenarie di San Vito a causa della frequente monotonia litologica e dell'assenza di marker litostratigrafici al loro interno è possibile individuare, solo localmente, le zone di cerniera quando sono presenti evidenti contrasti litologici. Le pieghe sono rovesciate verso SW, fortemente asimmetriche e quelle maggiori hanno lunghezza d'onda di circa 1 km, tendenzialmente isoclinali e con geometria a cerniera ispessita e con fianchi assottigliati. Pieghe isoclinali sono presenti, comunque, a tutte le scale. I piani assiali immergono costantemente verso NE o ENE con inclinazioni medie intorno a 30-35°. Le anticlinali hanno in genere a nucleo le Arenarie di San Vito, mentre le sinclinali hanno spesso a nucleo le metavulcaniti ordoviciane.

Una tettonica più recente, probabilmente già tardo varisica, con ripetute riattivazioni durante Oligocene-Aquitano, il Burdigaliano e il Pliocene ha interessato l'area di studio. In base a giacitura e cinematica, si distinguono tre sistemi di faglie spesso ben visibili anche in foto aerea: quelle dirette (e/o trascorrenti?) orientate circa NE-SW che hanno avuto un ruolo importante nella strutturazione oligo-miocenica; quelle dirette (e/o trascorrenti?) orientate circa N-S, che hanno interessato più volte tutte le successioni fino al Pliocene, rigettando anche le faglie NE-SW, e quelle E-W, che hanno interessato soprattutto il basamento varisico e, localmente la successione giurassica.

2.4 Tettonica recente

Sebbene in tutta l'Isola sia ampiamente descritta un'importante tettonica di età plio-cenica, responsabile anche della strutturazione della "Fossa del Campidano" (Auct.), nell'area di studio ed in quelle circostanti non sono state riconosciute strutture che provino direttamente un'attività tettonica plio-pleistocenica o più recente.

L'approfondimento vallivo, conseguenza diretta del sollevamento plio-pleistocenico, ha generato profonde valli come quella del Flumendosa. Il reticolo irregolare di questa valle nel settore in esame segue la rete di faglie e fratture presenti nel substrato pre-basaltico. Trattandosi di uno dei più importanti corsi d'acqua dell'Isola, l'approfondimento è stato considerevole ed ha originato versanti acclivi lungo i quali si sono prodotte quantità anche non trascurabili di detriti e si sono attivate le numerose frane dei settori a ovest dell'area di studio (Figura 2.4).

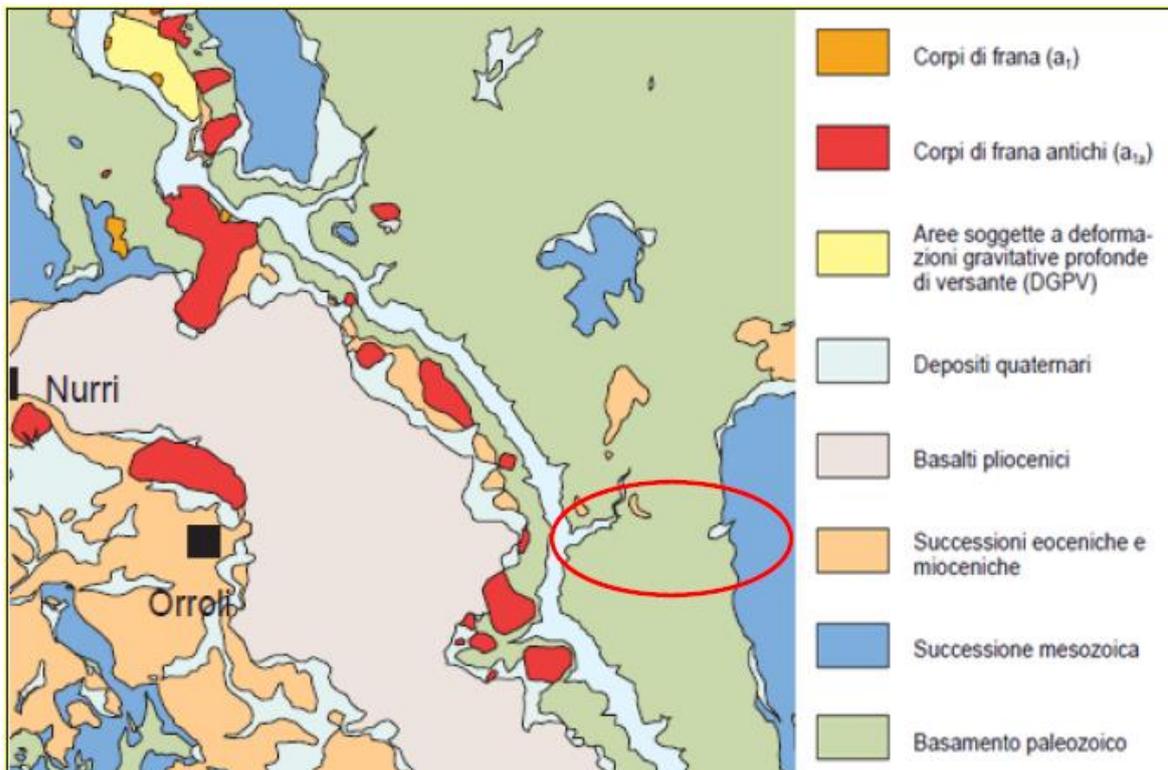


Figura 2.4 - Carta dei corpi di frana dell'area circostante quella in esame.

Dal punto di vista della tettonica recente, i rilievi eseguiti sul terreno e in foto aerea non hanno evidenziato alcun elemento strutturale o morfologico che possa far pensare a strutture disgiuntive attualmente attive o anche recenti (oloceniche). Questa situazione di stabilità tettonica dell'area e del resto della Sardegna è confermata anche dalle recenti (2015) classificazioni sismiche del territorio italiano del Dipartimento della Protezione civile, dove si evince che la Sardegna è sempre nella classe di pericolosità più bassa. Un'ulteriore

e più moderna rettifica da parte dell'Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia ha modificato il territorio italiano, ma senza variazioni per ciò che riguarda la Sardegna.

2.5 Caratteristiche geomorfologiche dell'area di intervento

I tratti geomorfologici dell'area del Medio Flumendosa sono sostanzialmente controllati da tre principali fattori:

- litologia;
- strutture fragili cenozoiche;
- tasso di *uplift* plio-pleistocenico.

Il basamento metamorfico al netto delle differenze tra metavulcaniti e metasedimenti può essere considerato come un'unica unità omogenea in cui la strutturazione interna dell'orogenesi varisica non si esprime con tratti morfostrutturali di rilievo. Sono i basalti pliocenici e i depositi trasgressivi del giurassico che determinano, seppur con una certa asimmetria tra la sinistra e la destra orografica del Flumendosa, il tratto morfologico dominante, cioè l'altopiano interrotto dall'incisione fluviale che si spinge da quote intorno ai 650 m s.l.m. fino a quote di fondovalle di 150 m s.l.m. Questa stretta valle, nel tratto dell'invaso, è scavata quasi interamente nel basamento; solo la porzione superiore dei suoi versanti è costituita basalti in destra e da formazioni carbonatiche giurassiche in sinistra orogenica.

2.6 Caratteri idrogeologici

La distribuzione degli afflussi meteorici nell'arco dell'anno segue l'andamento tipico del clima mediterraneo e la stagione piovosa (compresa orientativamente nel periodo ottobre-aprile) è irregolare e variabile.

Le piogge insistenti e continue sono rare ed insolite, mentre sono frequenti le precipitazioni violente ed abbondanti, come quelle di metà e fine novembre 2021. A seguito di queste piogge, le parti con morfologia concava nella zona dell'altopiano dolomitico sono state ricoperte da pozze d'acqua piovana che sono state assorbite lentamente durante le settimane di svolgimento delle indagini preliminari (novembre e dicembre 2021) a dimostrazione di una certa difficoltà di infiltrazione delle acque meteoriche nel sottosuolo, nonostante la rete di fratturazioni nelle stesse rocce dolomitiche.

Le caratteristiche climatiche unite alla morfologia acclive dell'area di studio, oltre alla natura poco permeabile del terreno, sfavoriscono nel complesso l'infiltrazione delle acque meteoriche nel sottosuolo aumentando invece il regime dei deflussi superficiali.

In base alla stratigrafia dell'area possono essere riconosciute, sostanzialmente, tre unità idrogeologiche, contraddistinte da differente comportamento idraulico e differenti caratteri idrodinamici.

Sotto l'aspetto idro-strutturale, l'unità più superficiale è rappresentata dalle dolomie giurassiche della formazione di Dorgali (permeabili per fratturazione), seguita verso il basso dalle siltiti e argille della Formazione di Genna Selole (sostanzialmente con bassissima permeabilità) e dalle rocce metamorfiche scistose sia terrigene che subordinatamente di origine vulcanico-epiclastica (tutte poco permeabili per fratturazione). In generale, queste tre diverse unità idrogeologiche sono caratterizzate da valori di permeabilità da medi a molto bassi.

L'acquifero più superficiale è rappresentato dalle dolomie giurassiche con giacitura sub-orizzontale, che hanno uno spessore di circa 40 metri e sono limitate alla base dalle siltiti della Formazione di Genna Selole. Si tratta di un acquifero di modesta importanza a causa del suo moderato spessore e della permeabilità sostanzialmente bassa per fratturazione e carsismo molto scarso, come evidenziato anche durante i sondaggi e durante le prove di tipo Lugeon in essi effettuate.

Le sorgenti sono disseminate lungo vari punti dell'altopiano, ma soprattutto lungo i bordi degli affioramenti dolomitici presso il contatto di base con le argille. Poiché la giacitura media delle dolomie pende verso i quadranti meridionali e orientali, i deflussi sotterranei entro queste rocce carbonatiche seguono queste direzioni e pertanto, anche le sorgenti sono maggiormente diffuse in questi settori (Figura 2.5). Si tratta di sorgenti con portate modeste, ma con una certa durata stagionale.

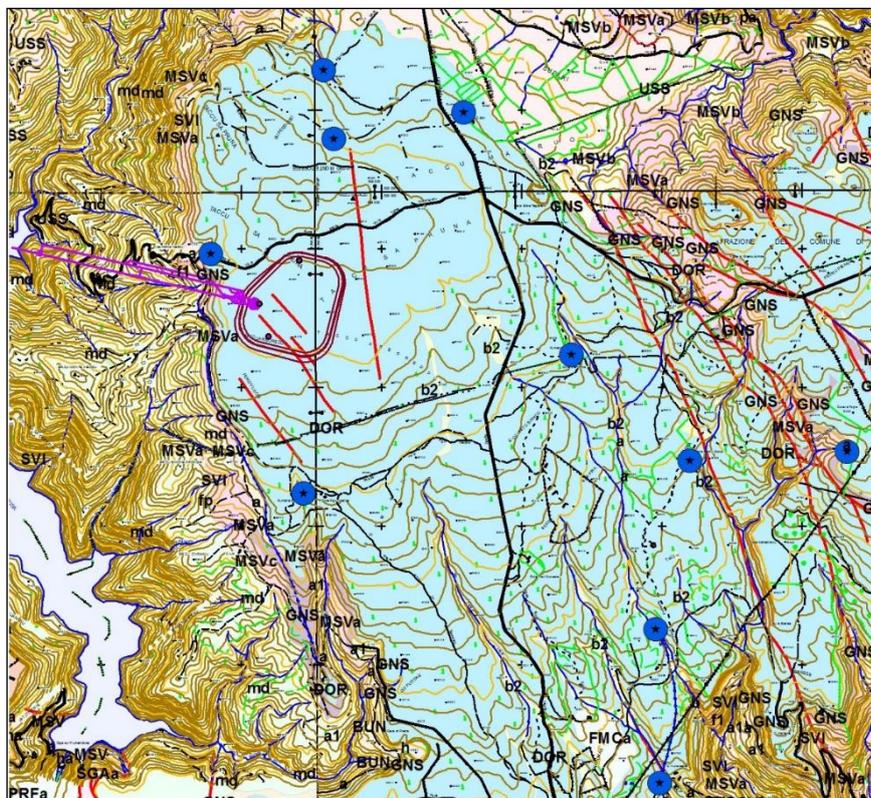


Figura 2.5 - Distribuzione delle sorgenti nell'area di studio

Il livello piezometrico misurato il 13/12/2021 nel foro di sondaggio NA3 indica la quota di -1 m. Per il foro NA1 non è stato possibile eseguire la misurazione per via della cementazione finalizzata alla prova down-hole.

Al di sotto delle dolomie, i sondaggi hanno individuato argille e siltiti carboniose (con uno spessore medio di circa una decina di metri) presenti al di sopra di uno strato di circa 2-3 m di conglomerati e arenarie ben cementati appartenenti alla Formazione di Genna Selole. Si tratta di una formazione tendenzialmente con bassissima permeabilità (confermata dalla prova Lugeon effettuata nel sondaggio NA3) a causa dello spessore delle litologie siltoso-argillose. Questa unità rappresenta quindi l'impermeabile relativo delle rocce dolomitiche soprastanti.

Al di sotto di queste litologie è presente il basamento metamorfico scistoso, rappresentato prevalentemente da metarenarie e metasiltiti (Formazione di San Vito) e dalle metavulcaniti o dai loro prodotti di rimaneggiamento (Formazione di Monte Santa Vittoria). Le caratteristiche di permeabilità possono essere molto discontinue anche all'interno di questo gruppo di rocce, le quali variano la loro permeabilità in funzione dell'importanza delle strutture disgiuntive (fratture, faglie, superfici di stratificazione, giunti di varia origine, etc.), della loro spaziatura ed apertura e mostrano valori di permeabilità generalmente da molto bassi a medio-bassi. Infatti, il sistema di discontinuità è fitto e ben sviluppato solo localmente, in corrispondenza delle fasce di maggior deformazione fragile o nelle aree di intersezione tra di esse. La circolazione idrica sotterranea all'interno delle fessure è favorita nella parte più superficiale dove le discontinuità sono più aperte per fenomeni di decompressione, fino alla profondità di un centinaio di metri. Al di sotto di questa profondità, il carico litostatico tende ad anastomizzare le fessure, chiudendole e limitando la circolazione sotterranea delle acque. Ciò avviene soprattutto se le discontinuità sono poco o mediamente inclinate (come è il caso delle superfici di stratificazione e scistosità nelle metarenarie).

Questo complesso ha uno spessore considerevole (superiore a 400 m) ed è interessato da una circolazione sotterranea molto scarsa, che solo in corrispondenza di discontinuità importanti può divenire significativa.

3. CAMPAGNA DI INDAGINE 2021-2022

Nei mesi compresi tra novembre 2021 e febbraio 2022 è stata condotta una campagna di indagini volta a definire una preliminare caratterizzazione geotecnica del sito in cui è ubicata l'opera in progetto. Nei paragrafi successivi verranno riportati nel dettaglio i risultati di tale campagna.

La campagna conoscitiva si articola nelle seguenti indagini:

- sondaggi geognostici: n. 3 sondaggi a carotaggio continuo rappresentativi delle condizioni stratigrafiche e strutturali delle opere sotterranee e di superficie. Dalle perforazioni è stato possibile eseguire inoltre:
 - prelievo di campioni indisturbati;
 - prove geotecniche di classificazione e di resistenza in laboratorio su campioni indisturbati;
 - analisi chimiche finalizzate alla classificazione delle terre da scavo su campioni rappresentativi;
- indagini geofisiche:
 - sismica tomografica;
 - tomografia di resistività elettrica (ERT);
 - sismica in foro (down-hole) in corrispondenza del foro di sondaggio NA1
- rilievi geomeccanici: n. 2 in aree di affioramento dell'unità delle arenarie di San Vito

Nei paragrafi seguenti vengono brevemente descritte le indagini effettuate nel corso della campagna del 2021-2022, per una loro più ampia descrizione si può fare riferimento alla *Relazione geologica*, mentre si rimanda al capitolo successivo l'interpretazione delle prove in sito ed in laboratorio, finalizzata alla definizione dei parametri geotecnici caratteristici di progetto delle diverse opere.

3.1 Sondaggi geognostici

I sondaggi geognostici sono stati ubicati in corrispondenza dell'invaso di monte e dunque in prossimità delle principali opere sotterranee (Figura 3.1).

Il sondaggio NA1 a carotaggio continuo, ubicato in prossimità del pozzo dell'opera di presa di monte e della centrale in caverna, ha interessato una profondità complessiva da piano campagna pari a circa 60 m. Nel sondaggio sono stati prelevati 27 campioni, in seguito sottoposti a prove di laboratorio.

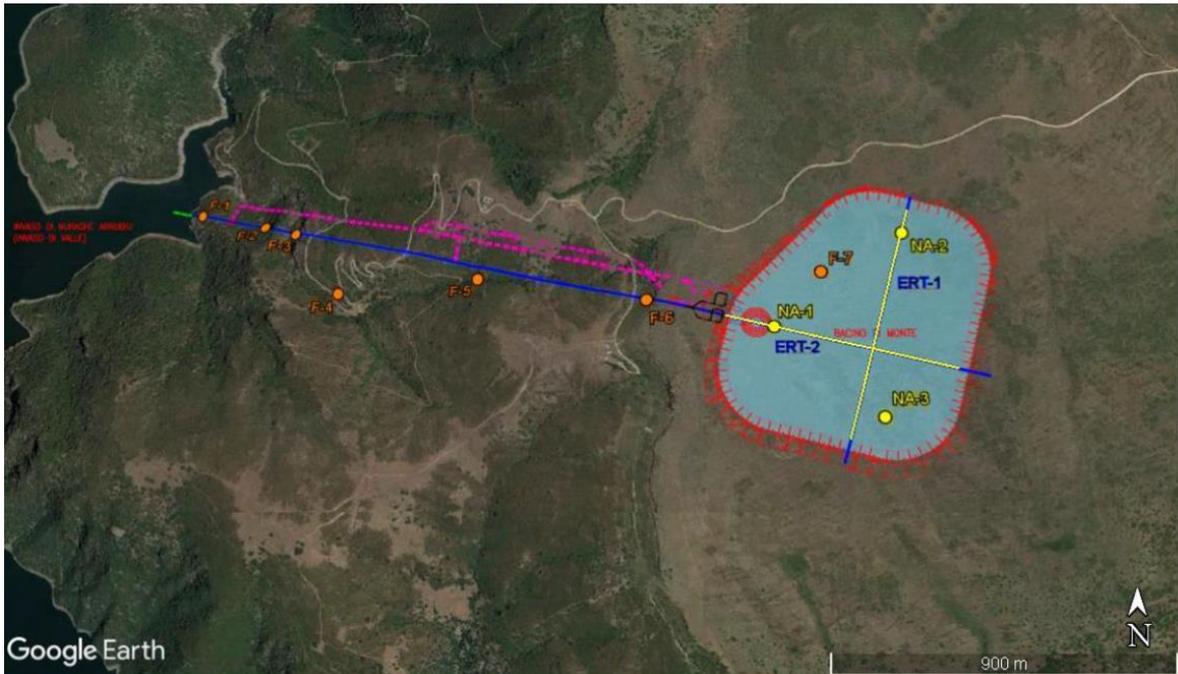


Figura 3.1 - Posizione dei sondaggi a carotaggio continuo eseguiti

Il sondaggio a carotaggio continuo NA2 si trova ubicato anch'esso in corrispondenza dell'invaso di monte, ma leggermente più a nord del sondaggio NA1, ed ha raggiunto la profondità di circa 60 m dal piano campagna. Nel sondaggio sono stati prelevati 21 campioni, in seguito sottoposti a prove di laboratorio.

Il sondaggio a carotaggio continuo NA3 si trova ubicato anch'esso in corrispondenza dell'invaso di monte, ma leggermente più a sud dei precedenti, ed ha raggiunto la profondità di circa 60 m dal piano campagna. Nel sondaggio sono stati prelevati 14 campioni, in seguito sottoposti a prove di laboratorio.

Le stratigrafie interpretative dei sondaggi sono riportate nell'Elaborato 1351-A-OP-A-01.

3.2 Prove di laboratorio

Come si è detto nel paragrafo precedente, dai sondaggi geognostici sono stati prelevati dei campioni per effettuare delle prove di caratterizzazione in laboratorio. A seconda della tipologia di campione e dell'obiettivo di indagine le prove effettuate sono le seguenti:

- caratterizzazione meccanica con:
 - prove di compressione monoassiale
 - prove di compressione triassiale

- prove di carico concentrato (point load test), tali prove sono state effettuate sia su campioni provenienti dai sondaggi profondi sia su campioni prelevati da affioramenti superficiali
- qualificazione delle rocce come inerti da calcestruzzo e/o per la formazione di rilevati:
 - prove di tipo Los Angeles
 - prove di gelività
 - analisi petrografiche al microscopio e analisi chimiche per verificare che non ci siano forme di silice reattiva agli alcali
- riconoscimento fisico delle argille, con la determinazione di:
 - caratteristiche fisiche;
 - analisi granulometrica;
- analisi chimiche per la caratterizzazione delle terre e rocce da scavo.

I certificati delle prove di laboratorio sono riportati nell'Elaborato 1351-A-OP-A-03.

3.3 Rilievi geomeccanici

Sono state effettuate due stazioni di rilievi geomeccanici sugli affioramenti rocciosi ubicati in prossimità dell'imbocco previsto per la galleria di finestra e lungo la strada esistente che dal bacino di monte porta all'invaso di valle. Su ciascuna stazione sono stati rilevati i seguenti parametri, in accordo con delle raccomandazioni ISRM (1978):

- giacitura delle famiglie di discontinuità
- tipo di discontinuità
- spaziatura
- persistenza
- scabrezza a piccola e grande scala
- apertura
- riempimento
- alterazione
- prova con Martello di Schmidt
- condizioni idrauliche.

3.4 Prove di permeabilità in foro

Nei tre sondaggi sono state condotte, a diverse profondità, delle prove di tipo Lugeon al fine di indagare sul grado di permeabilità delle rocce presenti in sito. le prove sono riepilogate nella Tabella 3.1 seguente.

Tabella 3.1 – Prove Lugeon

Sondaggio	Profondità (m)	Litologia
NA1	3-8	Dolomie
NA1	53-58	Metaconglomerati
NA2	5-9	Dolomie
NA2	51-56	Siltiti
NA3	35-40	Dolomie
NA3	55-59.8	Siltiti

3.5 Indagini geofisiche

Nelle aree interessate dalle principali opere, quali la zona del bacino di monte e gli imbocchi delle gallerie previste dal progetto, è stata condotta una campagna di indagini geofisiche che si articola nelle seguenti prove:

- bacino di Monte: indagato mediante l'esecuzione di profili sismici ad onde P e profili geoelettrici polo-dipolo per una lunghezza complessiva di circa 2.275 m per ciascuna delle metodologie e profondità d'indagine di 40-60 m dal p.c. La stessa area è stata indagata mediante l'esecuzione di misure sismiche in foro con la tecnica Down-Hole in corrispondenza del foro di sondaggio NA-1 (56 m di profondità)
- gallerie di accesso e via d'acqua: indagate mediante l'esecuzione di un profilo geoelettrico polo-dipolo PR-2E della lunghezza di 2.225 m, in questo caso le profondità d'indagine sono decisamente maggiori e arrivano a circa 400 m dal p.c.
- Lago di Flumendosa (opera di presa): sono state eseguite indagini mediante tre profili sismici e tre profili geoelettrici polo-dipolo, ubicati nella stessa posizione, per un totale di 825 m di acquisizione per ciascuna metodologia.

In Figura 3.2 sono rappresentati le tracce degli stendimenti geofisici.

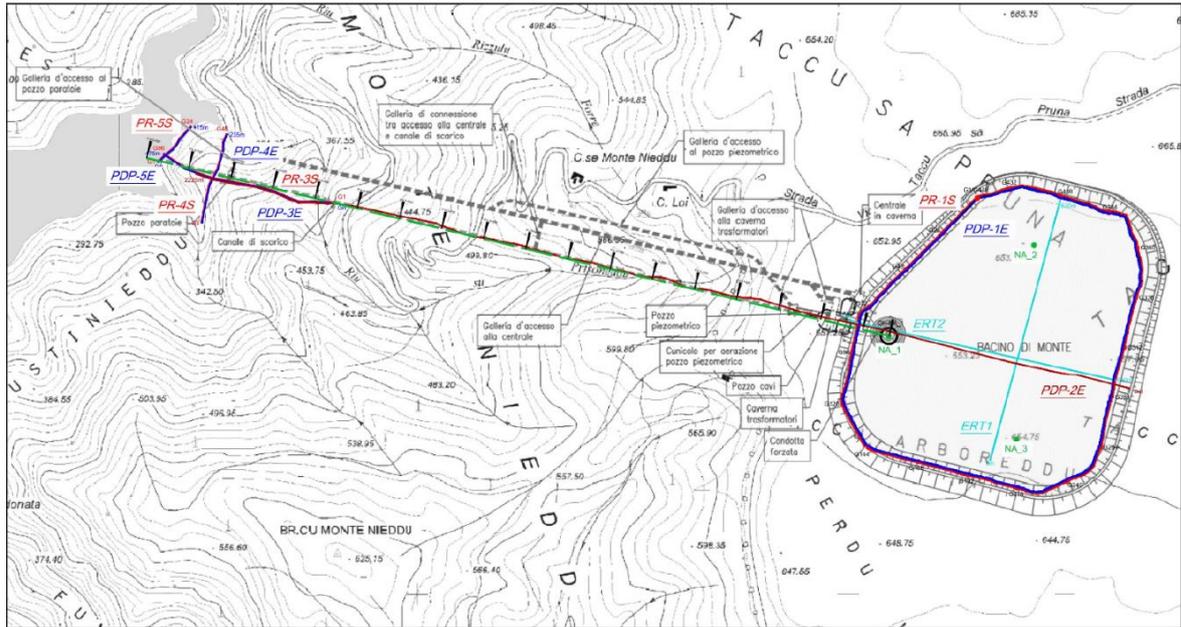


Figura 3.2 - Posizione dei profili delle indagini geofisiche

Le risultanze delle indagini geofisiche sono riportate nell'Elaborato 1351-A-OP-A-05.

4. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Sulla base degli aspetti geologici descritti nella *Relazione geologica* (elaborato 1351-A-OP-R-01) e richiamati nel Capitolo 2 della presente relazione si sono divise le principali litologie presenti nelle seguenti Unità Geotecniche:

- **Dolomie (D)** appartenenti geologicamente alla Formazione di Dorgali (DOR)
- **Siltiti (S)** appartenenti geologicamente alla Formazione di Genna Selole (GNS)
- **Metaconglomerati (M)** appartenenti geologicamente alla Formazione di Monte Santa Vittoria (MSV)
- **Arenarie (A)** appartenenti geologicamente alla Formazione di San Vito (SVI).

Lo studio delle proprietà meccaniche di ciascuna unità geotecnica ha tenuto in conto le risultanze delle prove in sito ed i risultati delle prove di laboratorio descritte nel capitolo precedente. L'analisi dei dati di laboratorio è avvenuta assegnando i risultati ottenuti in ciascuna prova all'unità geotecnica di appartenenza del campione, in funzione dei dati stratigrafici e del modello geologico di riferimento. Nei successivi paragrafi è esposta la modalità di interpretazione delle prove di caratterizzazione e ne vengono quindi riassunti i risultati in base all'unità geotecnica di appartenenza.

4.1 Individuazione delle unità geotecniche e caratterizzazione stratigrafica

L'andamento stratigrafico del sito di progetto è stato determinato puntualmente in corrispondenza dei sondaggi geognostici. Questo ha permesso di definire 4 principali unità litologiche, che dall'alto verso il basso sono rappresentate da:

- dolomie grigie massive, localmente laminate (specie alla base) con rare cavità centimetriche da dissoluzione e solo localmente alterate e con stratificazione sub-orizzontale. Alla base, dolomie arenacee giallastre e livelli centimetrico-decimetrici di siltiti carboniose
- siltiti carboniose di colore nero e di ambiente paralico con tracce di pirite più diffuse nella parte alta; verso il basso arenarie fini siltose di colore scuro alternate a livelli decimetrici di microconglomerati specie nelle porzioni basali. Stratificazione sub-orizzontale
- metaconglomerati grigio-verdastri con elementi di rioliti allungati lungo il piano di scistosità inclinato di circa 30° rispetto all'asse del sondaggio
- metasiltiti e metarenarie fini di colore grigio con superficie di scistosità inclinata di circa 30° rispetto all'asse del sondaggio.

Un'ulteriore unità litologica è stata poi osservata nella parte sommitale (da piano campagna a -2.50 m) dei sondaggi NA2 ed NA3 ed è costituita da detrito colluviale con elementi di dolomie più o meno alterate. Si evidenzia però come tale unità non costituisca in realtà

uno strato uniformemente diffuso al di sopra del tetto delle dolomie, ma piuttosto un riempimento delle fratture presenti sul plateau di Sa Pruna dove la roccia è praticamente affiorante.

Queste differenziazioni litologiche, come meglio dettagliato nella *Relazione geologica* (elaborato 1351-A-OP-R-01), hanno determinato il modello geologico di riferimento del progetto e di fatto costituiscono l'elemento di riferimento anche per il modello geotecnico di riferimento che risulta costituito dalle seguenti unità geotecniche:

- **Unità D:** dolomie grigie massive, localmente laminate (specie alla base) con rare cavità centimetriche da dissoluzione e solo localmente alterate e con stratificazione sub-orizzontale
- **Unità S:** siltiti carboniose di colore nero e di ambiente paralico con tracce di pirite più diffuse nella parte alta; verso il basso arenarie fini siltose di colore scuro alternate a livelli decimetrici di microconglomerati specie nelle porzioni basali. Stratificazione sub-orizzontale.
- **Unità M:** metaconglomerati grigio-verdastri con elementi di rioliti allungati lungo il piano di scistosità inclinato di circa 30° rispetto alla verticale
- **Unità A:** metasiltiti e metarenarie fini di colore grigio con superficie di scistosità inclinata di circa 30° rispetto alla verticale
- **Unità DC:** detrito colluviale con elementi di dolomie più o meno alterate.

Di seguito si riporta l'attribuzione dei terreni incontrati nella perforazione dei sondaggi a carotaggio continuo, descritti nel precedente capitolo, alle diverse unità geotecniche sopra individuate.

Nel sondaggio NA1 sono riconoscibili le seguenti unità geotecniche:

- per i primi 39.50 m circa D
- da 39.50 a 50.90 m S
- da 50.90 a 59.00 m M

Nel sondaggio NA2 sono riconoscibili le seguenti unità geotecniche:

- per i primi 2.30 m circa DC
- da 2.30 a 48.60 m D
- da 48.60 a 58.00 m S
- da 58.00 a 60.00 m A

Nel sondaggio NA3 sono riconoscibili le seguenti unità geotecniche:

- per i primi 2.50 m circa DC
- da 2.50 a 49.40 m circa D
- da 49.40 a 59.50 m S.

Le carote estratte dai sondaggi hanno evidenziato la presenza di alcune zone maggiormente fratturate attribuibili a fasce di disturbo tettonico come evidenziato dalle stratigrafie interpretative.

Le indagini geoelettriche sono state eseguite a due scale di indagine:

- una a scala di dettaglio, per l'esplorazione della parte superficiale del terreno con il fine di caratterizzare le zone di imposta degli argini del bacino di monte e la parte alta del pozzo di carico e scarico delle acque
- una a scala di esplorazione profonda, per caratterizzare la zona di valle dove sono previsti gli imbocchi delle gallerie.

I risultati ottenuti dalle indagini superficiali risultano ben allineati con i risultati delle perforazioni geognostiche: infatti sono evidenti quasi sempre alternanze di strati resistivi e conduttivi correlabili con i livelli descritti nei vari sondaggi eseguiti. Le esplorazioni profonde non sono altrettanto precise per cui sono state ottenute principalmente informazioni utili alla valutazione della presenza o meno di fasce di disturbo tettonico.

Gli andamenti stratigrafici rilevati puntualmente dai sondaggi hanno trovato conferma nell'esame a più ampia scala dalle prove geofisiche svolte. In particolare la tomografia di resistività e la tomografia sismica hanno evidenziato aspetti di seguito descritti ⁽¹⁾.

- Bacino di monte: dal punto di vista stratigrafico si è evidenziata una copertura di terreni costituiti da prodotti di alterazione dell'ammasso roccioso e da roccia intensamente fratturata che mediamente oscilla tra 2 e 3 m di spessore, raramente sfiora i 5 m di spessore e presenta resistività inferiori a 200 ohm·m e velocità sismiche inferiori a 1.000-1.500 m/s.

Al di sotto di questo strato superficiale le indagini tomografiche di resistività hanno evidenziato uno strato mediamente molto resistivo (da oltre 500 fino a 1.500-2.000 ohm·m) che presenta spessori variabili da poco più di 30 fino a circa 50 m. Questo strato corrisponde all'ammasso roccioso della Formazione di Dorgali. L'elevata compattezza di questa roccia è evidenziata dalle elevate velocità sismiche che sono risultate talora anche superiori a 5.000-6.000 m/s. Questi valori sono stati confermati anche dalle misure in foro con la tecnica Dow-Hole eseguite sul foro NA-1 fino a 56 m dal p.c. Al di sotto di questo strato calcareo-dolomitico, le tomografie di resistività hanno evidenziato un deciso e continuo calo dei valori con minimi dell'ordine di 150-200 ohm·m che è stato associato alla Formazione conglomeratico-argillosa di Genna Selole, all'interno della quale si trovano anche orizzonti ricchi di carbone. Il passaggio alla sottostante formazione metamorfica paleozoica si può intuire dai trend di risalita della resistività che compaiono in alcuni tratti. Tuttavia, i segnali non sono così chiari da poterne tracciare un'ipotesi di

⁽¹⁾ Per una trattazione completa delle indagini geofisiche svolte e della loro interpretazione si veda il Rapporto Tecnico delle indagini geofisiche riportato in nell'Elaborato 1351-A-OP-A-05.

andamento. Le tomografie di resistività così come quelle sismiche hanno, inoltre, evidenziato anche alcune situazioni anomale nel contesto dello strato calcareo-dolomitico che possono essere associate alla presenza di strutture ad andamento sub-verticale (fratture o faglie). Dalle tomografie sismiche sono state evidenziate, in particolare, anche alcune zone di riduzione generalizzata delle velocità sismiche che fanno pensare a contesti di intensa fratturazione piuttosto che a singole fratture che, comunque si possono indicare nei tratti in cui la diminuzione di velocità è massima.

- Gallerie di accesso, via d'acqua e pozzo paratoie: le indagini condotte per studiare la porzione di ammasso roccioso che saranno interessate dallo scavo delle gallerie di accesso, della via d'acqua e dal pozzo paratoie, sono state unicamente di tipo geoelettrico in quanto le profondità in esame sono estremamente elevate e non raggiungibili con la tecnica della sismica tomografica senza uso di esplosivo. Le indagini svolte hanno permesso di evidenziare alcune fasce di disturbo presenti lungo il tracciato delle opere in sotterraneo, le quali dovranno necessariamente essere tenute in considerazione durante lo sviluppo del progetto.

4.2 Risultanze delle prove di laboratorio

Nel presente paragrafo sono state raccolte ed interpretate le prove di laboratorio effettuate sui campioni prelevati dai sondaggi, suddivise in funzione del litotipo di appartenenza.

4.2.1 Caratterizzazione delle dolomie - Unità D

Si riportano di seguito i risultati delle prove di laboratorio effettuate sulle Dolomie e la loro interpretazione sotto il profilo geotecnico.

4.2.1.1 Caratteristiche fisiche

Dai sondaggi NA1, NA2 e NA3 sono stati prelevati, a diverse profondità comprese tra 5.3 e 9.6 m, 15 campioni sottoposti a prove di laboratorio. Nella tabella seguente si riportano i valori del peso di volume determinato in laboratorio per le dolomie appartenenti alla Formazione di Dorgali (DOR).

Tabella 4.1 – Unità D: peso di volume determinato in laboratorio

Sondaggio	Profondità (m)	Prova eseguita	Peso di volume (kg/m ³)	Peso di volume (kN/m ³)
NA1	7.4 - 7.7	compressione monoassiale	2831.1	27.77
NA2	7.0 - 7.4	compressione monoassiale	2857.5	28.00
NA2	8.0 – 8.4	compressione monoassiale	2852.3	27.95
NA3	6.5 – 6.8	compressione monoassiale	2780	27.24
NA3	7.0 – 7.3	compressione monoassiale	2747	26.92
NA3	8.7 – 9.0	compressione monoassiale	2784.3	27.29
NA1	5.3 – 5.8 6.0 – 6.3	compressione triassiale	2739	26.87
NA1	5.3 – 5.8 6.0 – 6.3	compressione triassiale	2687	26.33
NA1	5.3 – 5.8 6.0 – 6.3	compressione triassiale	2717	26.63
NA2	8.4 – 9	compressione triassiale	2802	27.46
NA2	8.4 – 9	compressione triassiale	2789	27.33
NA2	8.4 – 9	compressione triassiale	2779	27.23
NA3	9.0 – 9.6	compressione triassiale	2774	27.19
NA3	9.0 – 9.6	compressione triassiale	2764	27.09
NA3	9.0 – 9.6	compressione triassiale	2766	27.11
		Valore medio	2778	27.2

Su campioni di dolomie sono state effettuate anche delle prove di qualificazione per l'impiego di tale materiale per la produzione di aggregati lapidei per calcestruzzo. Si riportano di seguito gli esiti delle prove Los Angeles e delle prove di resistenza al gelo.

Tabella 4.2 – Esiti delle prove Los Angeles e di resistenza al gelo-disgelo dell'unità D

Sondaggio	Profondità (m)	Coefficiente Los Angeles "LA"	Perdita percentuale di massa nella prova di resistenza al gelo e disgelo (F)
NA1	5.0 – 9.0		1.6 %
NA2	5.0 – 9.0	21 %	0.3 %
NA3	4.0 – 10.0	22 %	0.1 %

Le analisi chimiche condotte su campioni prelevati dalla Formazione di Dorgali relative all'utilizzo delle terre e rocce da scavo non hanno evidenziato nessun superamento delle limitazioni indicate nella tabella 1 colonna A dell'allegato 5 del D.Lgs 152/06 e s.m.i., e pertanto il materiale risulta idoneo ad attività di recupero e riutilizzo previste dalla normativa vigente fatto salvo il rispetto delle disposizioni e autorizzazioni disposte dalle autorità competenti.

4.2.1.2 Caratteristiche di resistenza e di deformabilità

Su 15 campioni prelevati dai sondaggi sono state effettuate le seguenti prove:

- compressione monoassiale
- compressione triassiale

i cui risultati sono illustrati di seguito.

Nella Tabella 4.3 si riportano, per ciascun campione, i parametri di resistenza e deformabilità ricavati dalle prove di compressione monoassiale. Si rimanda ai certificati dell'Elaborato 1351-A-OP-A-03 per maggiori dettagli relativi alle prove eseguite.

Tabella 4.3 – Unità D: prova di compressione monoassiale

Sondaggio	Profondità (m)	Modulo di deformabilità E (GPa)	Coefficiente di Poisson ν (-)	Resistenza a compressione monoassiale σ_{ci} (MPa)
NA1	7.4 - 7.7	41.76	0.12	62.5
NA2	7.0 - 7.4	22.40	0.13	65.9
NA2	8.0 – 8.4	27.65	0.20	23.8
NA3	6.5 – 6.8	21.74	0.19	38.3
NA3	7.0 – 7.3	68.95	0.22	39.3
NA3	8.7 – 9.0	29.37	0.15	14.8
	Valore massimo	68.95	0.22	65.90
	Valore medio	35.31	0.17	40.77
	Valore minimo	21.74	0.12	14.80

Come si può osservare dai valori riportati in tabella, le prove hanno evidenziato un'elevata variabilità di risultati, sia per il modulo di deformazione sia per la resistenza a rottura. Tale aspetto, ancora più evidente nel grafico riportato in Figura 4.1, può essere correlato alla presenza di microfratture all'interno di alcuni provini, per cui i campioni più integri hanno restituito valori più elevati, mentre quelli con microfratture hanno evidenziato valori inferiori di resistenza e modulo elastico.

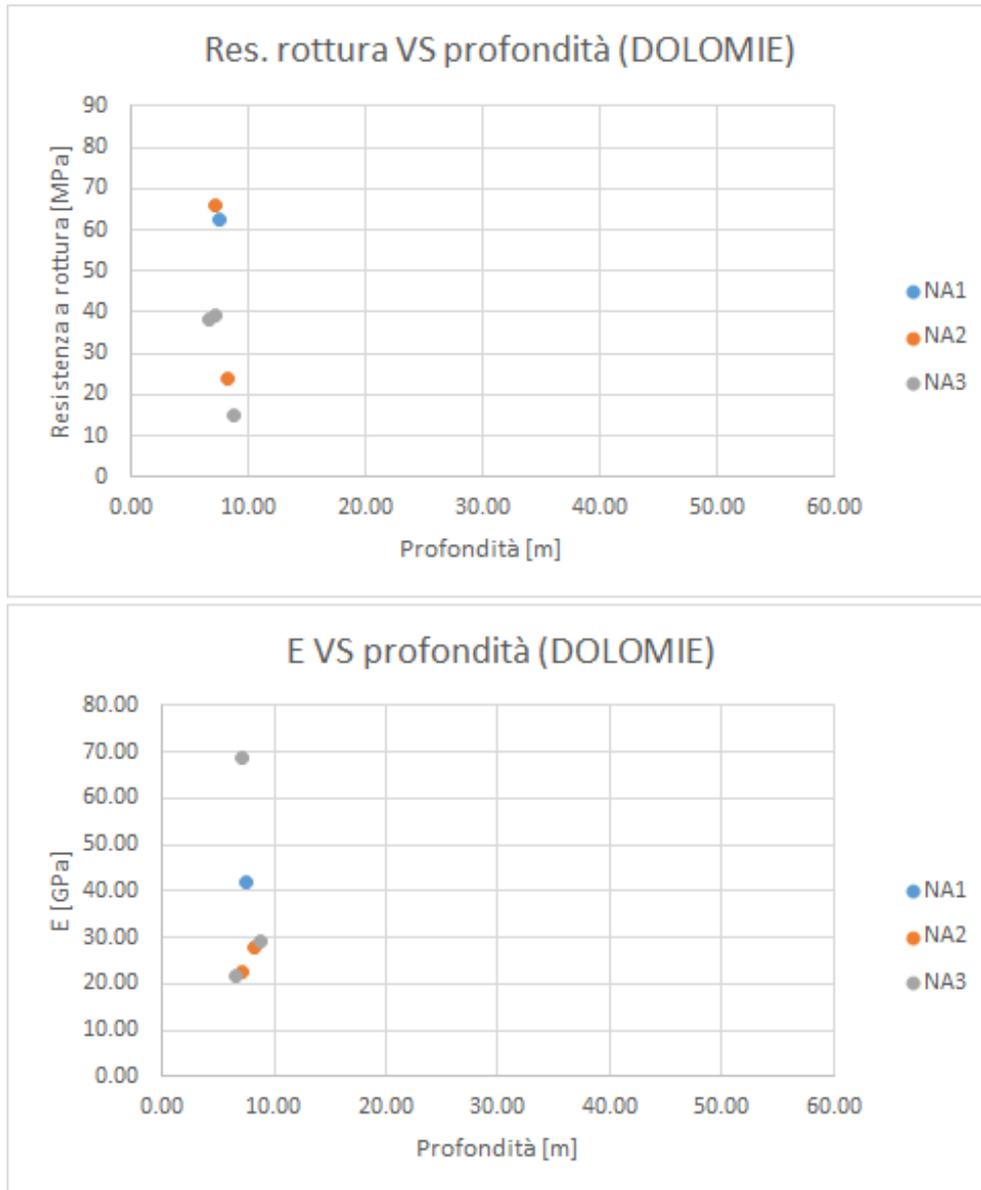


Figura 4.1 – Unità D: parametri di resistenza e deformabilità ottenuti dalle prove di compressione monoassiale rapportati alla profondità di campionamento

Nella Tabella 4.4 si riportano, per ciascun campione, i valori della tensione di confinamento e della tensione di rottura registrati durante le prove di compressione triassiale. Si rimanda ai certificati dell'Elaborato 1351-A-OP-A-03 per maggiori dettagli relativi alle prove eseguite.

Tabella 4.4 – Unità D: prove di compressione triassiale

Sondaggio	Profondità (m)	Tensione di confinamento σ_3 (MPa)	Tensione di rottura σ_1 (MPa)
NA1	5.3 – 5.8 6.0 – 6.3	1	142.2
NA1	5.3 – 5.8 6.0 – 6.3	2	110.3

Sondaggio	Profondità (m)	Tensione di confinamento σ_3 (MPa)	Tensione di rottura σ_1 (MPa)
NA1	5.3 – 5.8 6.0 – 6.3	4	126.8
NA2	8.4 – 9	0.5	167.4
NA2	8.4 – 9	1	127.6
NA2	8.4 – 9	2	132
NA3	9.0 – 9.6	0.4	121
NA3	9.0 – 9.6	0.8	147
NA3	9.0 – 9.6	1	157.4

Come si può osservare dai valori riportati in tabella, e dal grafico riportato in Figura 4.2, i risultati delle prove appaiono ben allineati tra loro. Si riscontra un comportamento leggermente anomalo sull'andamento delle curve ottenute dai campioni NA1_1 e NA2 in quanto all'aumentare della tensione di confinamento non si osserva il classico incremento della tensione di rottura. L'usuale andamento della prova si è invece osservato per il campione NA3_1. Tali anomalie potrebbero essere dovute anche in questo caso alla presenza di microfratture all'interno del provino che hanno influenzato negativamente l'andamento della prova.

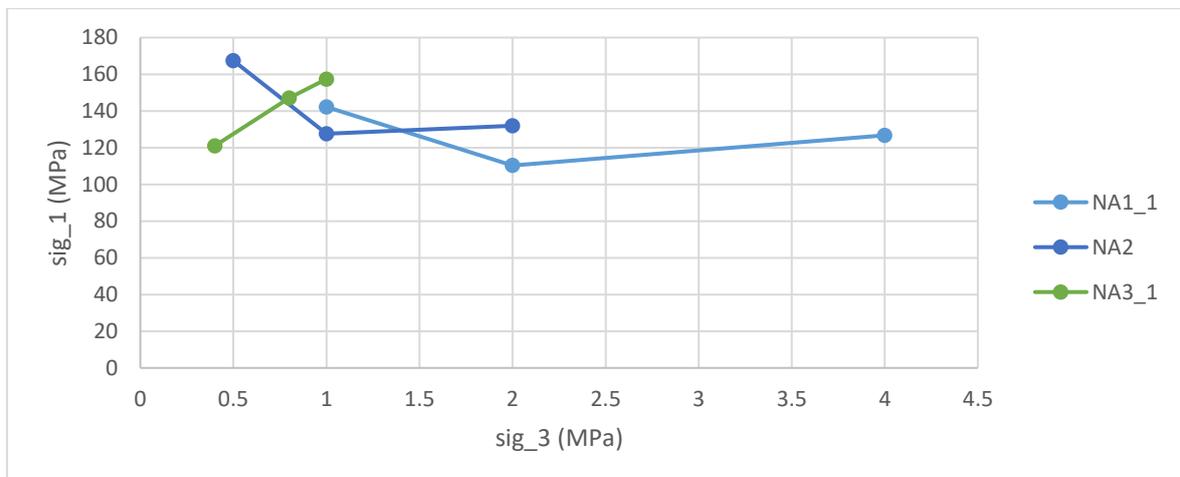


Figura 4.2 – Unità D: prove di compressione triassiale sul piano delle tensioni principali

4.2.2 Caratterizzazione delle siltiti - Unità S

Si riportano di seguito i risultati delle prove di laboratorio effettuate sulle Siltiti e la loro interpretazione sotto il profilo geotecnico.

4.2.2.1 Caratteristiche fisiche

Dai sondaggi NA1, NA2 e NA3 sono stati prelevati, a diverse profondità comprese tra 42 e 55 m, 11 campioni sottoposti a prove di laboratorio. Nella tabella seguente si riportano i valori del peso di volume determinato in laboratorio per le Siltiti appartenenti alla formazione di Genna Selole (GNS)

Tabella 4.5 – Unità S: peso di volume determinato in laboratorio

Sondaggio	Profondità (m)	Tipo di prova	Peso di volume (kg/m ³)	Peso di volume (kN/m ³)
NA1	42 – 42.4	compressione monoassiale	2796.9	27.4
NA1	43 – 43.3	compressione monoassiale	2365.1	23.2
NA1	43.3 – 43.7	compressione monoassiale	2414.4	23.7
NA2	50 – 50.35	compressione monoassiale	2812.6	27.6
NA2	51.4 – 51.65	compressione monoassiale	2330.3	22.84
NA2	55 – 55.3	compressione monoassiale	2774.3	27.2
NA3	53.2 – 53.5	compressione monoassiale	2814.1	27.58
NA1	42.4 – 43	compressione triassiale	2652	25.99
NA1	42.4 – 43	compressione triassiale	2683	26.29
NA1	42.4 – 43	compressione triassiale	2684	26.3
NA3	52.4 – 53	compressione triassiale	2549	24.98
		Valore medio	2625.1	25.7

Un campione appartenente alla Formazione di Genna Selole, prelevato dal sondaggio NA3 a profondità comprese tra 50.00 e 58,00 m dal p.c. è stato sottoposto ad analisi petrografica al microscopio per verificare la presenza o meno di forme di silice reattiva agli alcali. Dall'esame delle sezioni sottili non è stata riscontrata la presenza di silice amorfa. Per ulteriori approfondimenti in merito si riportano nell'Elaborato 1351-A-OP-A-03 i certificati del laboratorio che ha effettuato l'analisi petrografica.

Le analisi chimiche condotte su campioni prelevati dalla formazione di Genna Selole relative all'utilizzo di tale litologia come inerte da costruzione non hanno evidenziato nessun superamento delle limitazioni indicate nella tabella 1 colonna A dell'allegato 5 del D.Lgs 152/06 e s.m.i., e pertanto il materiale risulta idoneo ad attività di recupero e riutilizzo previste dalla normativa vigente fatte salve il rispetto delle disposizioni e autorizzazioni disposte dalle autorità competenti.

4.2.2.2 Caratteristiche di resistenza e di deformabilità

Su 11 campioni prelevati dai sondaggi sono state effettuate le seguenti prove:

- compressione monoassiale
- compressione triassiale

i cui risultati sono illustrati di seguito

Nella Tabella 4.6 si riportano, per ciascun campione, i parametri di resistenza e deformabilità ricavati dalle prove di compressione monoassiale. Si rimanda ai certificati dell'Elaborato 1351-A-OP-A-03 per maggiori dettagli relativi alle prove eseguite.

Tabella 4.6 – Unità S: prove di compressione monoassiale

Sondaggio	Profondità (m)	Modulo di deformabilità E (GPa)	Coefficiente di Poisson ν (-)	Resistenza a compressione monoassiale σ_{ci} (MPa)
NA1	42 – 42.4	43.38	0.12	82.9
NA1	43 – 43.3	22.04	0.17	60.0
NA1	43.3 – 43.7	21.56	0.23	59.1
NA2	50 – 50.35	32.61	0.22	25.0
NA2	51.4 – 51.65	10.65	0.20	19.0
NA2	55 – 55.3	21.51	0.22	18.5
NA3	53.2 – 53.5	34.91	0.22	20.5
	Valore massimo	43.38	0.23	82.90
	Valore medio	26.67	0.20	40.71
	Valore minimo	10.65	0.12	18.50

Come si può osservare dai valori riportati in tabella, le prove hanno evidenziato una variabilità di risultati significativa per il modulo di deformazione e ancora più spiccata per la resistenza a rottura. Tale aspetto, ancora più evidente nel grafico riportato in Figura 4.3, può essere correlato, anche in questo caso, alla presenza di microfratture all'interno di alcuni provini, per cui i campioni più integri hanno restituito valori più elevati, mentre quelli con microfratture hanno evidenziato valori inferiori di resistenza e modulo elastico.

Nella

si riportano, per ciascun campione, i valori della tensione di confinamento e della tensione di rottura registrati durante le prove di compressione triassiale. Si rimanda ai certificati dell'Elaborato 1351-A-OP-A-03 per maggiori dettagli relativi alle prove eseguite.

Tabella 4.7 – Unità S: prove di compressione triassiale

Sondaggio di provenienza	Profondità (m)	Tensione di confinamento σ_3 (MPa)	Tensione di rottura σ_1 (MPa)
NA1	42.4 – 43	1	116.4
NA1	42.4 – 43	2	141.7
NA1	42.4 – 43	4	152.5
NA3	52.4 – 53	0.4	63.7

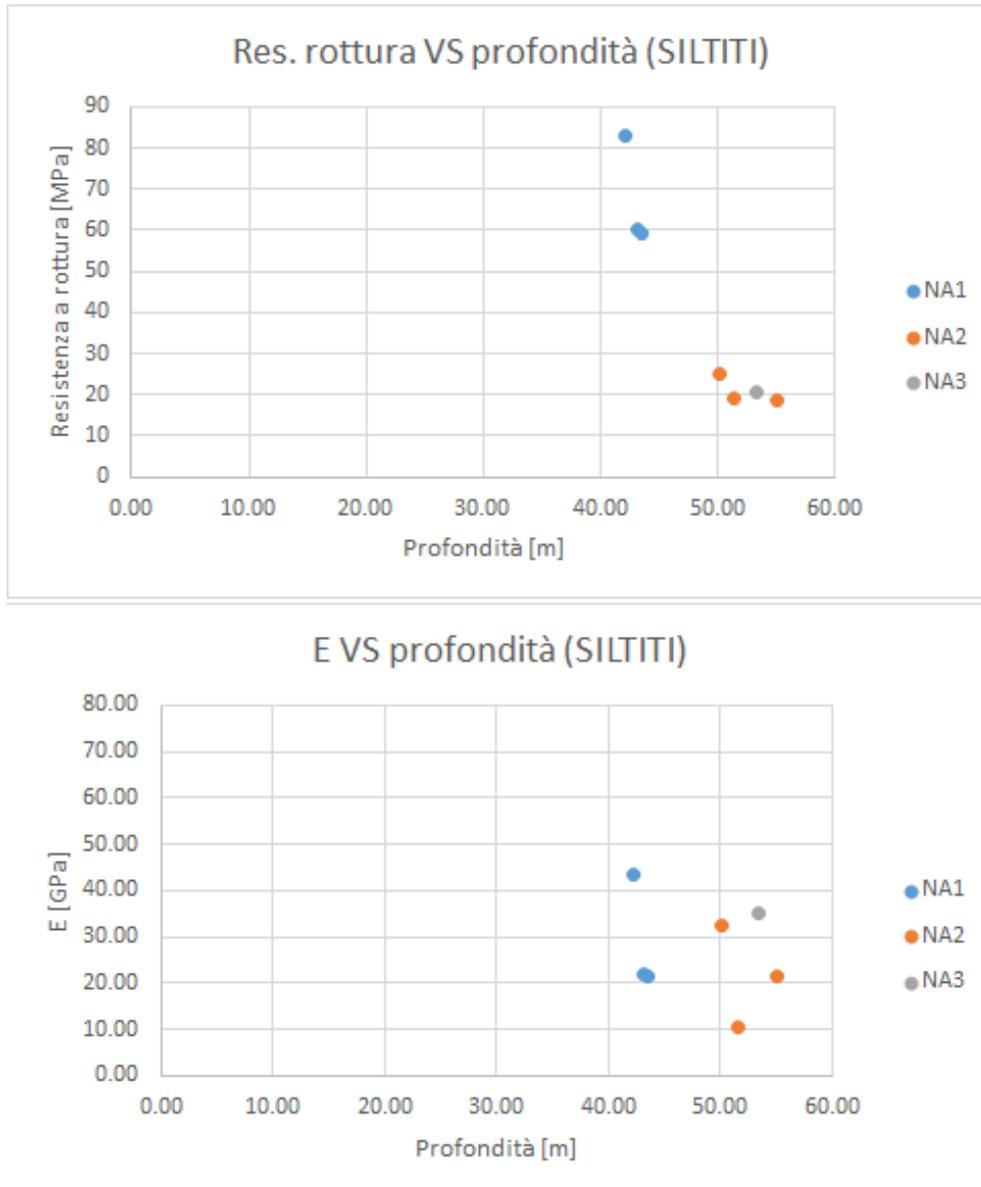


Figura 4.3 – Unità S: parametri di resistenza e deformabilità ottenuti dalla prova di compressione monoassiale rapportati alla profondità di campionamento

Come si può osservare dai valori riportati in tabella e dal grafico riportato in Figura 4.4, le prove sono state condotte su 3 provini provenienti dal sondaggio NA1, mentre per quanto riguarda il sondaggio NA3, i certificati riportano il risultato di un unico provino soggetto alla pressione di confinamento minima prevista dal programma di prove.

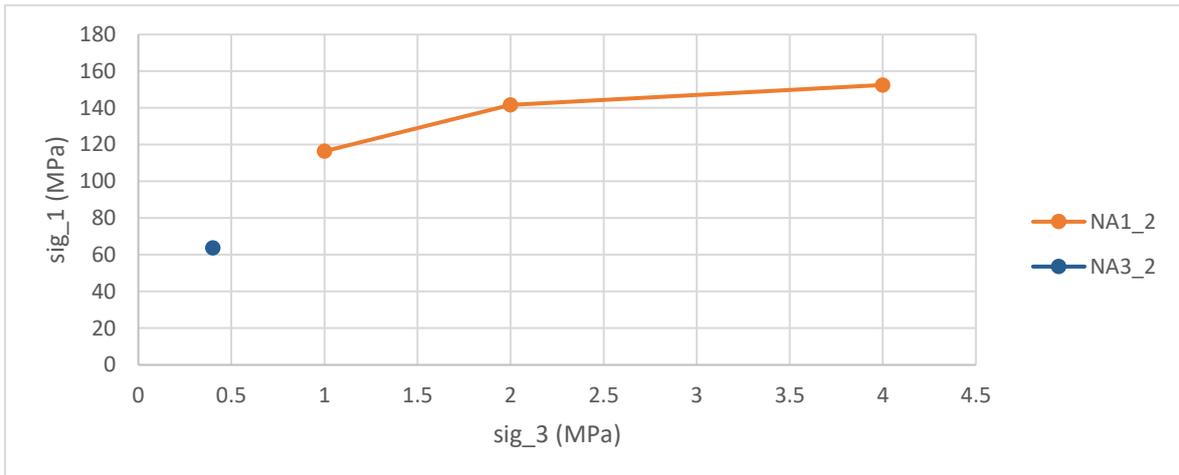


Figura 4.4 – Unità S: prove di compressione triassiale sul piano delle tensioni principali

4.2.3 Caratterizzazione dei metaconglomerati - Unità M

Si riportano di seguito i risultati delle prove di laboratorio effettuate sui metaconglomerati e la loro interpretazione sotto il profilo geotecnico.

4.2.3.1 Caratteristiche fisiche

Dal sondaggio NA1 sono stati prelevati, a diverse profondità comprese tra 54 e 58 m, 9 campioni sottoposti a prove di laboratorio. Nella tabella seguente si riportano i valori del peso di volume determinato in laboratorio per i metaconglomerati appartenenti alla formazione di Monte Santa Vittoria (MSV).

Tabella 4.8 – Unità M: peso di volume determinato in laboratorio

Sondaggio di provenienza	Profondità (m)	Tipo di prova	Peso di volume (kg/m ³)	Peso di volume (kN/m ³)
NA1	54 – 54.2	compressione monoassiale	2529.7	24.8
NA1	54.2 – 54.4	compressione monoassiale	2531.6	24.8
NA1	54.4 – 54.6	compressione monoassiale	2540.5	24.9
NA1	52 – 52.8	compressione triassiale	2529	24.8
NA1	52 – 52.84	compressione triassiale	2551	25.0
NA1	52 – 52.8	compressione triassiale	2523	24.7
NA1	56 – 56.8	compressione triassiale	2476	24.3
NA1	56 – 56.8	compressione triassiale	2480	24.3
NA1	56 – 56.8	compressione triassiale	2437	23.9
		Valore medio	2510.9	24.6

Un campione appartenente alla Formazione di Monte Santa Vittoria, prelevato dal sondaggio NA1 a profondità comprese tra 53.50 e 53.80 m dal p.c. è stato sottoposto ad analisi petrografica al microscopio per verificare la presenza o meno di forme di silice reattiva agli alcali. Dall'esame delle sezioni sottili non è stata riscontrata la presenza di silice amorfa. Per ulteriori approfondimenti in merito si riportano in nell'Elaborato 1351-A-OP-A-03 i certificati del laboratorio che ha effettuato l'analisi petrografica.

Le analisi chimiche condotte su campioni prelevati dalla formazione di Monte Santa Vittoria relative all'utilizzo come materiale inerte da costruzione non hanno evidenziato nessun superamento delle limitazioni indicate nella tabella 1 colonna A dell'allegato 5 del D.Lgs 152/06 e s.m.i., e pertanto il materiale risulta idoneo ad attività di recupero e riutilizzo previste dalla normativa vigente fatte salve il rispetto delle disposizioni e autorizzazioni disposte dalle autorità competenti.

4.2.3.2 Caratteristiche di resistenza e di deformabilità

Su 9 campioni prelevati dai sondaggi sono state effettuate le seguenti prove:

- compressione monoassiale
- compressione triassiale

i cui risultati sono illustrati di seguito

Nella Tabella 4.9 si riportano, per ciascun campione, i parametri di resistenza e deformabilità ricavati dalle prove di compressione monoassiale. Si rimanda ai certificati dell'Elaborato 1351-A-OP-A-03 per maggiori dettagli relativi alle prove eseguite.

Tabella 4.9 – Unità M: prove di compressione monoassiale

Sondaggio	Profondità (m)	Modulo di deformabilità E (GPa)	Coefficiente di Poisson ν (-)	Resistenza a compressione monoassiale σ_{ci} (MPa)
NA1	54 – 54.2	4.92	0.15	10.3
NA1	54.2 – 54.4	4.92	0.09	10.3
NA1	54.4 – 54.6	5.29	0.14	13.3
	Valore massimo	5.29	0.15	13.30
	Valore medio	5.05	0.13	11.30
	Valore minimo	4.92	0.09	10.30

Come si può osservare dai valori riportati in tabella, le prove hanno evidenziato dei valori piuttosto bassi sia per il modulo di deformazione sia per la resistenza a rottura. Tale aspetto risulta ancora più evidente nel grafico riportato in Figura 4.5 nel quale si è mantenuta invariata la scala degli assi rispetto ai casi precedenti.

Nella Tabella 4.10 si riportano, per ciascun campione, i valori della tensione di confinamento e della tensione di rottura registrati durante le prove di compressione triassiale. Si rimanda ai certificati dell'Elaborato 1351-A-OP-A-03 per maggiori dettagli relativi alle prove eseguite.

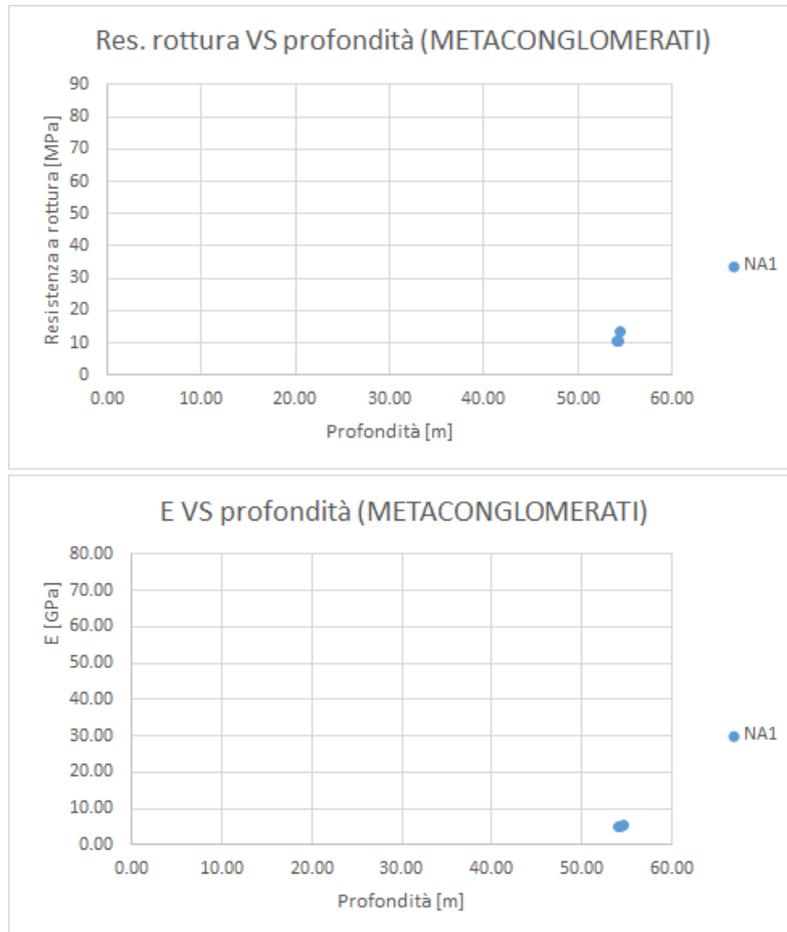


Figura 4.5 – Unità M: parametri di resistenza e deformabilità ottenuti dalla prova di compressione monoassiale rapportati alla profondità di campionamento

Tabella 4.10 – Unità M: prova di compressione triassiale

Sondaggio	Profondità (m)	Tensione di confinamento σ_3 (MPa)	Tensione di rottura σ_1 (MPa)
NA1	52 – 52.8	1	16.6
NA1	52 – 52.8	2	8.8
NA1	52 – 52.8	4	15.5
NA1	56 – 56.8	1	19.8
NA1	56 – 56.8	2	25.8
NA1	56 – 56.8	4	27.5

Come si può osservare dai valori riportati in tabella, e dal grafico riportato in Figura 4.6, i valori di resistenza a rottura, analogamente a quanto riscontrato nel caso della prova di compressione monoassiale, appaiono modesti e senza un'evidente variazione al variare della tensione di confinamento.

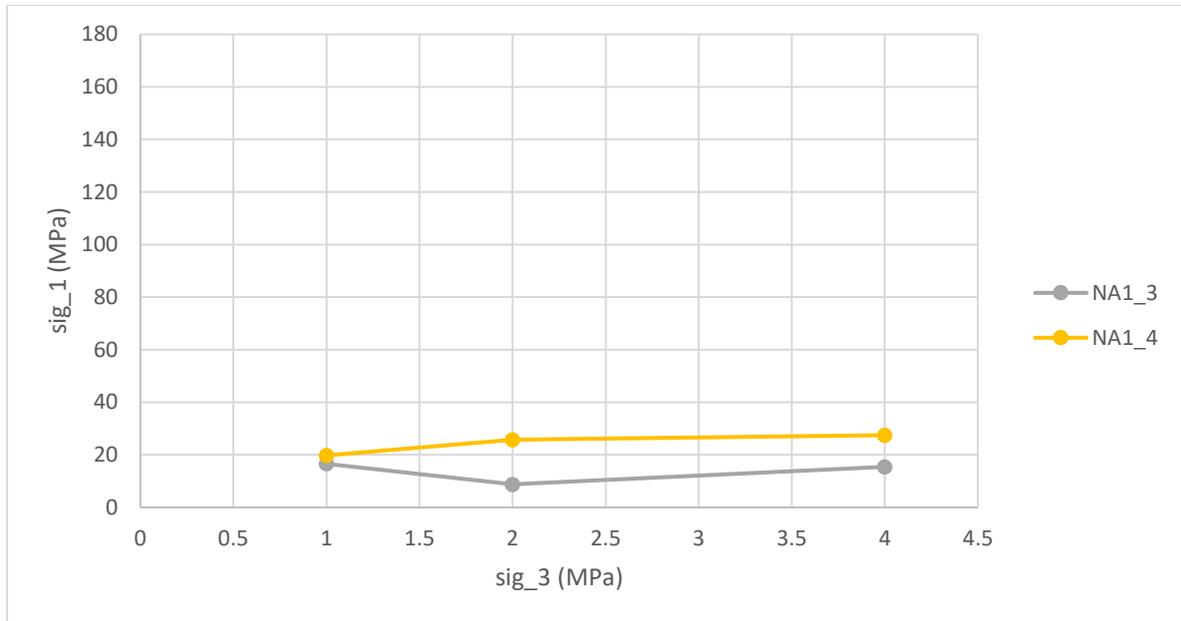


Figura 4.6 – Unità M: prove di compressione triassiale sul piano delle tensioni principali

4.2.4 Caratterizzazione delle arenarie - Unità A

Dei tre sondaggi profondi effettuati in corrispondenza del bacino di monte solamente il sondaggio NA2 ha intercettato, negli ultimi due metri circa, l'unità delle Arenarie di San Vito. Pertanto per consentire una caratterizzazione geotecnica di questa unità, basata su una quantità di dati sufficiente, sono stati prelevati dei campioni da affioramenti rocciosi presenti lungo il tracciato delle opere in progetto.

Si riportano di seguito i risultati delle prove di laboratorio effettuate sulle arenarie e la loro interpretazione sotto il profilo geotecnico.

4.2.4.1 Caratteristiche fisiche

Un campione appartenente alla Formazione di San Vito, prelevato dal sondaggio NA1 a profondità comprese tra 57.70 e 60.00 m dal p.c. è stato sottoposto ad analisi petrografica al microscopio per verificare la presenza o meno di forme di silice reattiva agli alcali. Dall'esame delle sezioni sottili non è stata riscontrata la presenza di silice amorfa. Per ulteriori approfondimenti in merito si riportano in nell'Elaborato 1351-A-OP-A-03 i certificati del laboratorio che ha effettuato l'analisi petrografica.

4.2.4.2 Caratteristiche di resistenza e di deformabilità

Dalla parte terminale del sondaggio NA2 sono stati prelevati dei campioni e dei frammenti di roccia su cui sono state eseguite in laboratorio delle prove di Point Load Test. In considerazione della limitata quantità di materiale appartenente alla formazione di San Vito estraibile dal sondaggio NA2 e con l'obiettivo di avere una stima statisticamente più robusta dei parametri di tale formazione, sono stati prelevati ulteriori 25 frammenti di roccia dagli affioramenti rocciosi presenti lungo il tracciato delle opere in progetto. Su tali frammenti sono state effettuate delle ulteriori prove di Point Load i cui risultati sono illustrati di seguito. I report delle prove sono riportati nell' Elaborato 1351-A-OP-A-03.

Nell'interpretazione delle prove, il valore della resistenza a compressione monoassiale è stato ottenuto moltiplicando il valore dell'indice di carico puntuale I_s per il coefficiente K di Palmstrom, il cui valore varia in funzione del valore di I_s secondo quanto riportato in Tabella 4.11.

Tabella 4.11 – Valori di K da assumere in funzione di I_s secondo Palmstrom

I_s (MPa)	K
1.8 – 3.5	14
3.5 – 6.0	16
6.0 – 10	20
> 10	24

L'interpretazione delle prove effettuate sui campioni provenienti dal sondaggio NA2 viene riportata in Tabella 4.12. Come si può osservare i valori di resistenza ottenuti sono risultati tutti estremamente bassi.

Tabella 4.12 – Unità A: resistenza a compressione da prove di Point Load effettuate su campioni prelevati dal sondaggio NA2

Profondità (m)	Litotipo	Tipologia di provino	I_{s50} (MPa)	σ_{ci} (MPa)
58.2	Metaconglomerati grigio-verdastri con piani di scistosità	Carota	0.16	2.22
58.6	Metaconglomerati grigio-verdastri con piani di scistosità	Carota	0.22	3.09
59.1	Metaconglomerati grigio-verdastri con piani di scistosità	Carota	0.37	5.13
58.6	Metaconglomerati grigio-verdastri con piani di scistosità	Forma irregolare	0.35	4.90
59.1	Metaconglomerati grigio-verdastri con piani di scistosità	Forma irregolare	0.52	7.28
		Valore medio	0.32	4.53

Tale effetto può essere correlato al fatto che tutte le prove di Point Load eseguite su campioni provenienti dal sondaggio NA2 sono state effettuate imponendo una direzione di

carico inclinata di circa 40° rispetto ai piani di scistosità. Tale configurazione di prova, sebbene si ponga in una via intermedia tra una prova effettuata in direzione ortogonale ed una effettuata in direzione parallela ai piani di scistosità, evidentemente ha comportato la rottura del provino lungo i piani preferenziali dati dalle discontinuità esistenti e pertanto i risultati ottenuti sono ritenuti poco significativi al fine della definizione della resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta.

Le prove eseguite sui campioni prelevati dagli affioramenti rocciosi lungo il tracciato delle opere sono state condotte tutte su frammenti di roccia di forma irregolare imponendo una direzione di carico ortogonale rispetto ai piani di scistosità. L'interpretazione complessiva delle prove viene riportata in Tabella 4.13.

Tabella 4.13 – Unità A: resistenza a compressione da prove di Point Load effettuate su campioni prelevati da affioramenti rocciosi

Campione	Litotipo	Is (MPa)	σ_{ci} (MPa)
PL01	Metasiltiti di colore grigio con piani di scistosità	1.14	15.96
PL02	Metasiltiti di colore grigio con piani di scistosità	2.36	33.04
PL03	Metasiltiti di colore grigio con piani di scistosità	4.97	79.52
PL04	Metasiltiti di colore grigio con piani di scistosità	3.43	48.02
PL05	Metasiltiti di colore grigio con piani di scistosità	2.01	28.14
PL06	Metasiltiti di colore grigio con piani di scistosità	2.75	38.50
PL07	Metasiltiti di colore grigio con piani di scistosità	5.23	83.84
PL08	Metasiltiti di colore grigio con piani di scistosità	0.29	4.06
PL09	Metasiltiti di colore grigio con piani di scistosità	1.30	18.20
PL10	Metasiltiti di colore grigio con piani di scistosità	1.38	19.32
PL11	Metasiltiti di colore grigio con piani di scistosità	4.51	72.16
PL12	Metasiltiti di colore grigio con piani di scistosità	1.74	24.36
PL13	Metasiltiti di colore grigio con piani di scistosità	1.61	22.54
PL14	Metasiltiti di colore grigio con piani di scistosità	0.60	8.40
PL15	Metasiltiti di colore grigio con piani di scistosità	1.43	20.02
PL16	Metasiltiti di colore grigio con piani di scistosità	2.46	34.44
PL17	Metasiltiti di colore grigio con piani di scistosità	5.27	84.32
PL18	Metasiltiti di colore grigio con piani di scistosità	2.45	34.30
PL19	Metasiltiti di colore grigio con piani di scistosità	2.55	36.68
PL20	Metasiltiti di colore grigio con piani di scistosità	1.81	25.34
PL21	Metasiltiti di colore grigio con piani di scistosità	2.74	38.36
PL22	Metasiltiti di colore grigio con piani di scistosità	1.25	17.50
PL23	Metasiltiti di colore grigio con piani di scistosità	3.76	60.16
PL24	Metasiltiti di colore grigio con piani di scistosità	2.70	37.80
PL25	Metasiltiti di colore grigio con piani di scistosità	2.67	37.38
	Valore massimo	5.27	84
	Valore medio	2.50	37
	Valore minimo	0.29	4

Come si può osservare dai valori riportati in tabella, le prove hanno evidenziato un'elevata variabilità di risultati, con una certa maggioranza dei valori medio bassi rispetto a quelli medio alti. Tale aspetto, ancora più evidente nel grafico riportato in Figura 4.7, può essere correlato alla natura più o meno scistosa dei provini sottoposti alle prove. Aspetto reso evidente anche dal confronto visivo delle fotografie degli affioramenti da cui sono stati prelevati i campioni. Per tale ragione l'unità delle arenarie è stata suddivisa in due sotto unità:

- Unità A (valori medi), correlata alle condizioni in cui l'ammasso presenta una tessitura più massiva e meno scistosa
- Unità A (valori minimi), correlata alle condizioni in cui l'ammasso presenta una tessitura più scistosa.

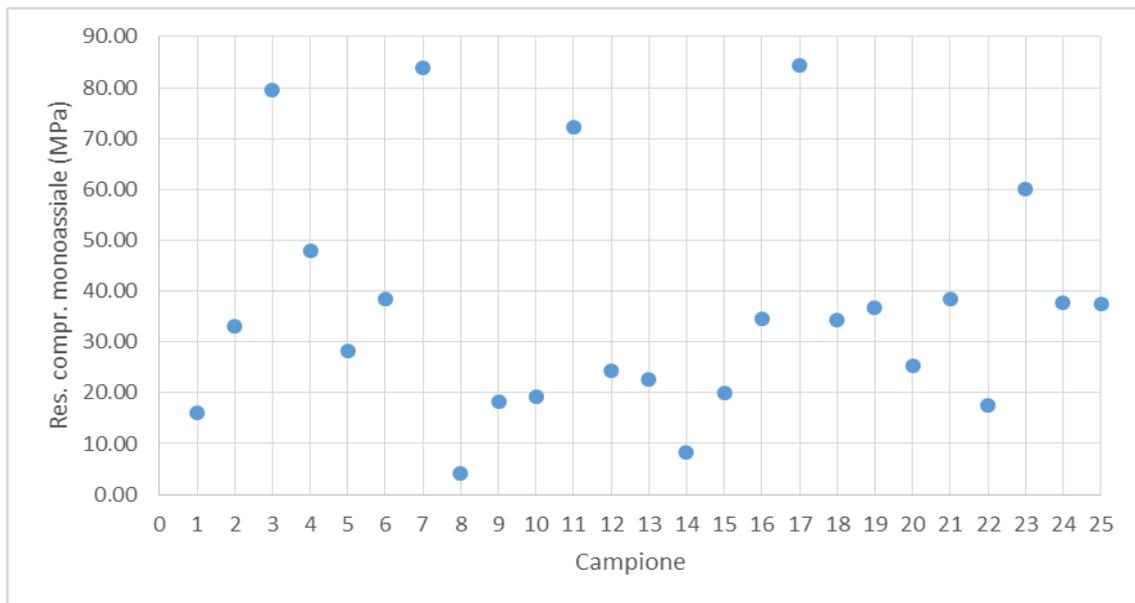


Figura 4.7 – Unità A: parametri di resistenza ottenuti dalla prova di Point Load effettuata su frammenti prelevati da affioramenti rocciosi

Si riportano di seguito i valori massimi, minimi e medi dell'indice di carico puntuale I_s e della resistenza a compressione monoassiale ottenuti suddividendo l'unità A in due sotto unità in funzione del livello di fratturazione riscontrato.

Tabella 4.14 – Unità A: Resistenza a compressione da prove di Point Load Test per le due sotto unità

	Unità A (valori medi)		Unità A (valori minimi)	
	I_s (MPa)	σ_{ci} (MPa)	I_s (MPa)	σ_{ci} (MPa)
Valore massimo	5.27	84	2.75	39
Valore medio	4.53	71	1.85	26
Valore minimo	3.43	48	0.29	4

4.2.5 Caratterizzazione del Detrito Colluviale - Unità DC

I sondaggi NA2 e NA3 hanno evidenziato, nella zona più superficiale, la presenza di uno strato dello spessore di circa 2.50 m di detrito colluviale con elementi di dolomie più o meno alterate. Si evidenzia però come tale unità non costituisca in realtà uno strato uniformemente diffuso al di sopra del tetto della dolomia, ma piuttosto un riempimento delle fratture presenti sul plateau di Sa Pruna, dove la roccia è praticamente affiorante.

Pertanto, in considerazione della limitata presenza di questo materiale e della sua sostanziale ininfluenza sulle opere in progetto, le indagini di caratterizzazione si sono limitate alle analisi chimiche relative all'utilizzo di questi materiali in seno al cantiere. Le analisi chimiche condotte sui campioni prelevati non hanno evidenziato nessun superamento delle limitazioni indicate nella tabella 1 colonna A dell'allegato 5 del D.Lgs 152/06 e s.m.i., e pertanto il materiale risulta idoneo ad attività di recupero e riutilizzo previste dalla normativa vigente fatte salve il rispetto delle disposizioni e autorizzazioni disposte dalle autorità competenti.

4.3 Risultanze delle prove in sito

Nel presente paragrafo sono state raccolte ed interpretate le prove effettuate in sito durante la campagna di indagini conoscitive.

4.3.1 Prove Lugeon

In ciascuno dei sondaggi NA1, NA2 e NA3 sono state condotte 2 prove di tipo Lugeon al fine di indagare la permeabilità degli ammassi rocciosi presenti in sito.

Si evidenzia che per ammassi rocciosi del tipo di quelli presenti in sito la permeabilità risulta direttamente correlata alle discontinuità, alla loro spaziatura, apertura e persistenza, mentre è possibile considerare la matrice rocciosa pressoché impermeabile. Per tale motivo un'elevata permeabilità è solitamente indice di una diffusa ed intensa fratturazione, con fratture comunicanti e capaci di costituire vie di deflusso per le acque.

Nella tabella seguente si riportano, per ciascuna prova, il sondaggio di appartenenza, la profondità di prova, l'unità geotecnica corrispondente ed infine il valore di permeabilità ottenuto dalla prova. Come si può osservare in tutti i casi la permeabilità misurata si è rivelata bassa o molto bassa, il che è indice di una limitata fessurazione nelle zone indagate.

Tabella 4.15 – Prove Lugeon: valori del coefficiente di permeabilità

Sondaggio	Profondità (m)	Unità Geotecnica	Coefficiente di permeabilità (m/s)
NA1	3-8	D	8.51E-07

Sondaggio	Profondità (m)	Unità Geotecnica	Coefficiente di permeabilità (m/s)
NA1	53-58	M	4.94E-07
NA2	5-9	D	1.56E-06
NA2	51-56	S	3.05E-07
NA3	35-40	D	4.17E-06
NA3	55-59.8	S	1.27E-07

4.3.2 Prove Down-Hole

In corrispondenza del sondaggio NA1 è stata realizzata una prova di tipo Down-hole. Nelle Figure 4.8÷4.10 seguenti vengono riportati i risultati ottenuti durante la prova e per ulteriori approfondimenti si rimanda all'Elaborato 1351-A-OP-A-05.

Si può osservare che lungo la verticale del foro NA1 si riconoscono 5 sismo-strati (Figure 4.8 e 4.9), di cui i primi 2 sono compresi entro i primi 7 m di profondità e rappresentano la modesta coltre eluvio-colluviale superficiale ($V_s = 263$ m/s) e la parte più fratturata ed alterata delle dolomie ($V_s = 722$ m/s).

Il terzo sismo-strato corrisponde alle dolomie poco fratturate con valori di velocità delle onde di compressione V_p pari a quasi 5000 m/s e velocità delle onde di taglio $V_s = 2250$ m/s. Questo strato si estende sino a 31 m di profondità ed è seguito da un sismo-strato di potenza pari a 18 m con velocità inferiori: $V_p = 2993$ m/s e $V_s = 1580$ m/s.

Questa zona di abbassamento delle velocità delle onde elastiche non è strettamente correlata alla stratigrafia riscontrata nel sondaggio NA1 e sembra accorpere una zona di disturbo tettonico riscontrata nelle dolomie tra 32 e 34 m di profondità, il passaggio delle dolomie franche a dolomie arenacee con intercalazioni di argille e siltiti carboniose alla base della formazione dolomitica e l'ingresso nella formazione di siltiti carboniose di Genna Selole.

Al di sotto dei 47 m di profondità le velocità aumentano nuovamente e sembrano confermare la variazione litologica della formazione di Genna Selole, che alla base è rappresentata da arenarie fini siltose alternate a microconglomerati, per passare quindi ai metaconglomerati della formazione di Monte Santa Vittoria. Le velocità di questo quinto sismo-strato sono $V_p = 5264$ m/s e $V_s = 2773$ m/s.

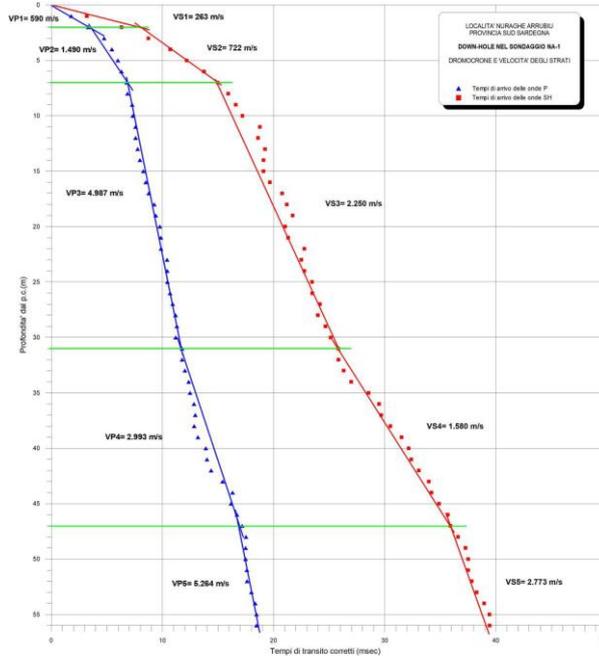


Figura 4.8 – Down-Hole NA1: Dromocrone e calcolo della velocità di strato

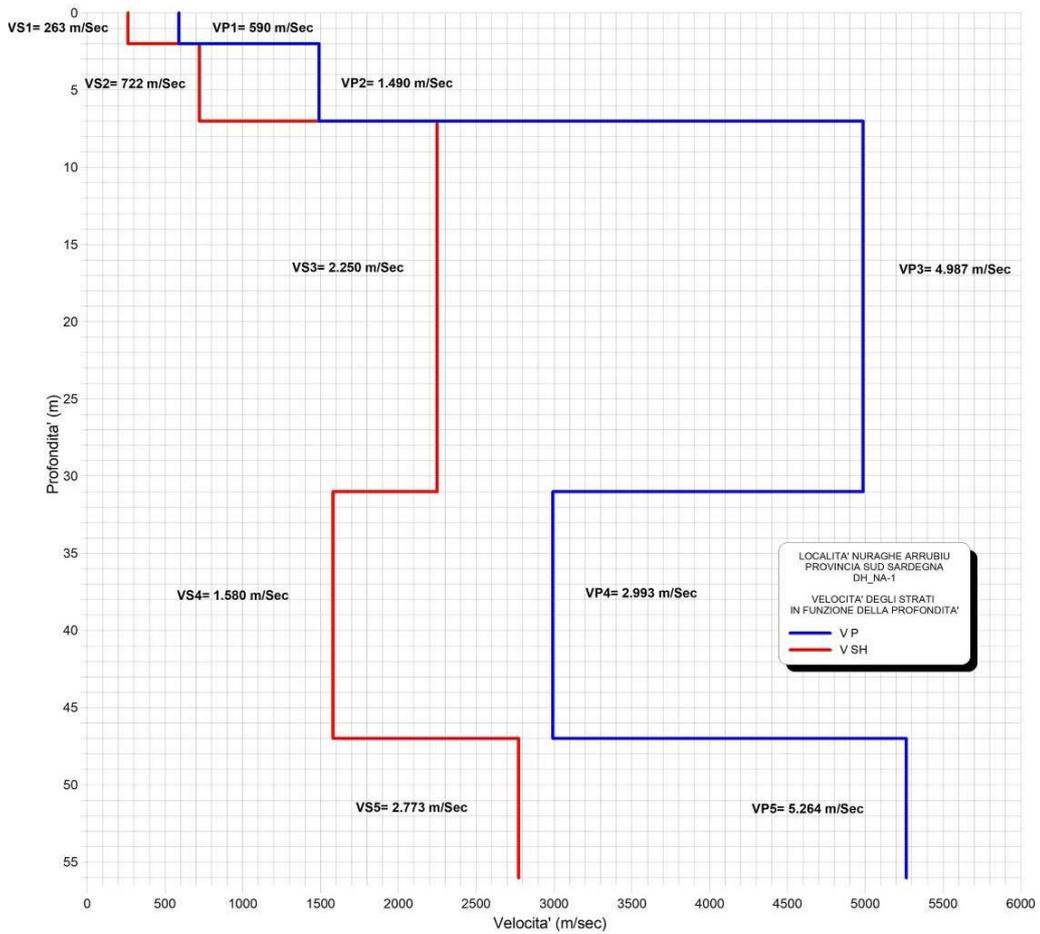


Figura 4.9 – Down-Hole NA1: diagramma delle velocità delle onde P e SH

In base ai valori delle velocità delle onde P e delle onde SH è possibile ricavare il modulo elastico dinamico E_{din} e il rapporto di Poisson dinamico ν_{din} (Figura 4.10) sulla base delle seguenti formule:

$$\nu_{din} = \frac{V_p^2 - 2V_s^2}{2(V_p^2 - V_s^2)}$$

$$E_{din} = 2\rho V_s^2(1 + \nu)$$

In Tabella 4.16 sono raccolti i valori dei parametri elastici dinamici calcolati.

Tabella 4.16 - Down-Hole NA1: parametri elastici ricavati

Sismo-strato	Vp (m/s)	Vs (m/s)	γ (kN/m ³)	E_{din} (MPa)	ν_{din}
1	590	263	22	426.9	0.376
2	1490	722	25	3577.7	0.347
3	4987	2250	27.2	38522.6	0.372
4	2993	1580	25.7	17093.4	0.307
5	5264	2773	24.6	50441.6	0.308

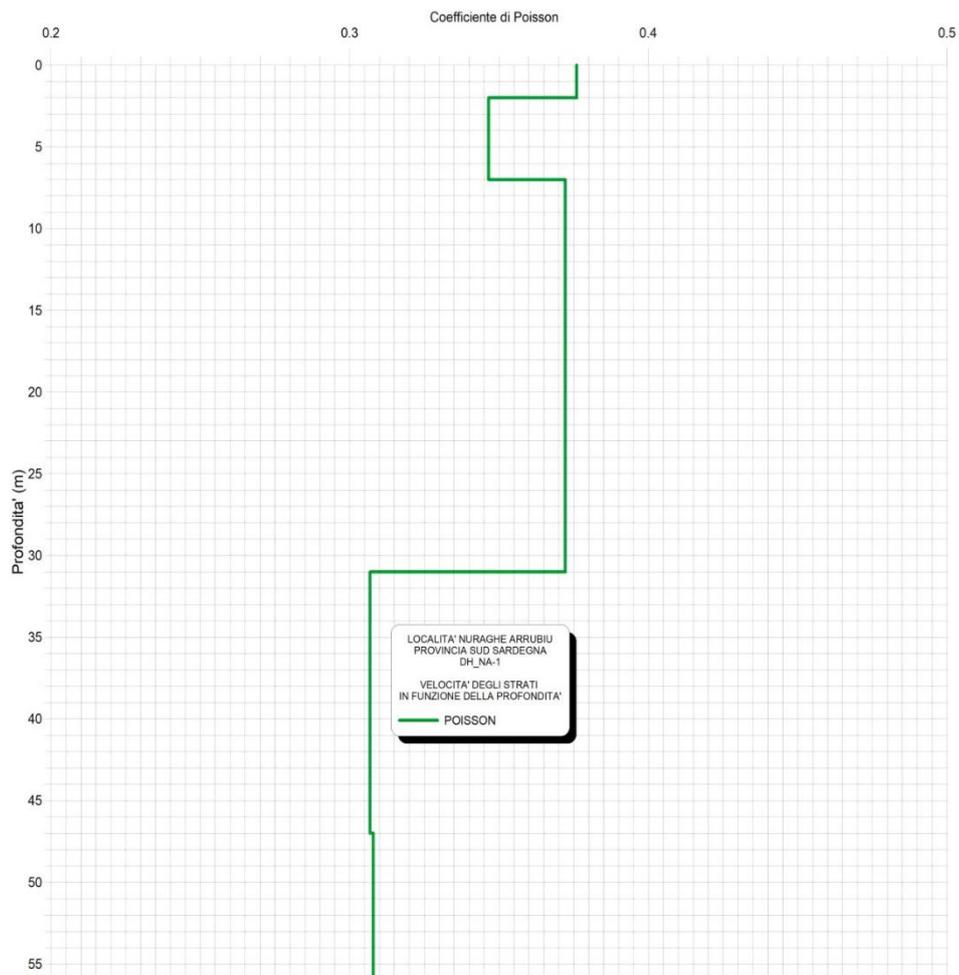


Figura 4.10 – Down-Hole NA1: andamento con la profondità del rapporto di Poisson

4.4 Rilievi geomeccanici

Come si è detto al Paragrafo 3.3, sono state effettuate due stazioni di rilievo geomeccanico sugli affioramenti rocciosi appartenenti all'Unità delle Arenarie di San Vito, ubicati in prossimità dell'imbocco previsto per la galleria di accesso (ove l'affioramento appare meno scistoso) e lungo la strada esistente che dal bacino di monte porta all'invaso di valle (ove l'affioramento appare più scistoso). La localizzazione delle due stazioni di misura è riportata in Figura 4.11.

In sede di caratterizzazione geologica dell'area di progetto è stata effettuata un'accurata elaborazione dei dati ottenuti dal rilievo, con lo scopo di definire le principali famiglie di discontinuità presenti nell'affioramento e di attribuire a ciascuna di esse i valori rappresentativi per la loro caratterizzazione geotecnica.

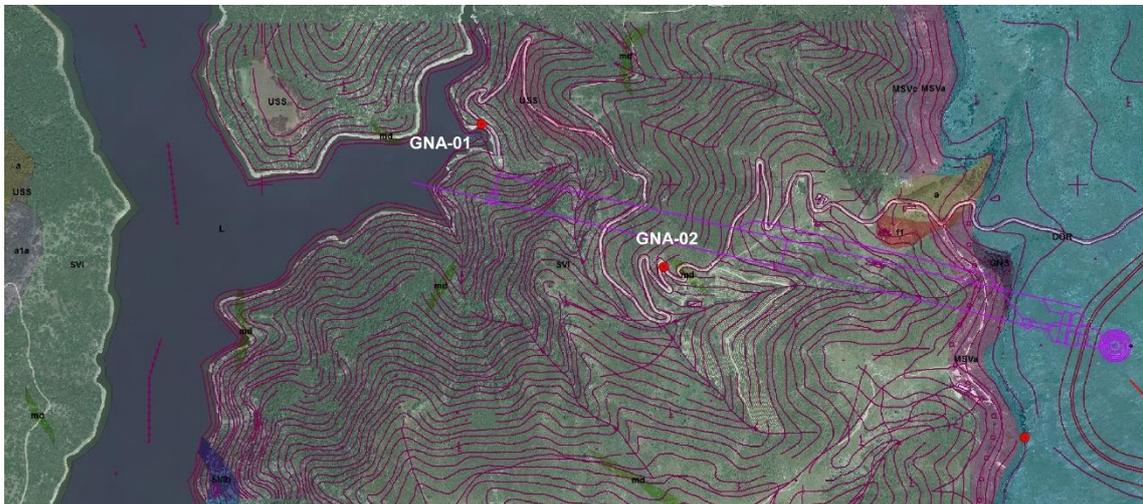


Figura 4.11 – Localizzazione delle due stazioni di rilievo geomeccanico

Si riporta di seguito una breve sintesi dei principali parametri geotecnici derivati dall'elaborazione delle 2 stazioni di rilievo, mentre si rimanda alla *Relazione geologica* per la trattazione completa delle elaborazioni svolte a partire dal rilievo geomeccanico.

La stazione strutturale GNA-01, ubicata in prossimità dell'imbocco della galleria di accesso, mostra un ammasso roccioso mediamente fratturato con metarenarie poco scistose (Figura 4.12).

Nell'affioramento sono state riconosciute 4 famiglie di discontinuità (Figura 4.13), la cui giacitura media è riportata in Tabella 4.17.



Figura 4.12 – Ripresa dell'affioramento roccioso dove è stata rilevata la stazione geo-strutturale GNA-01

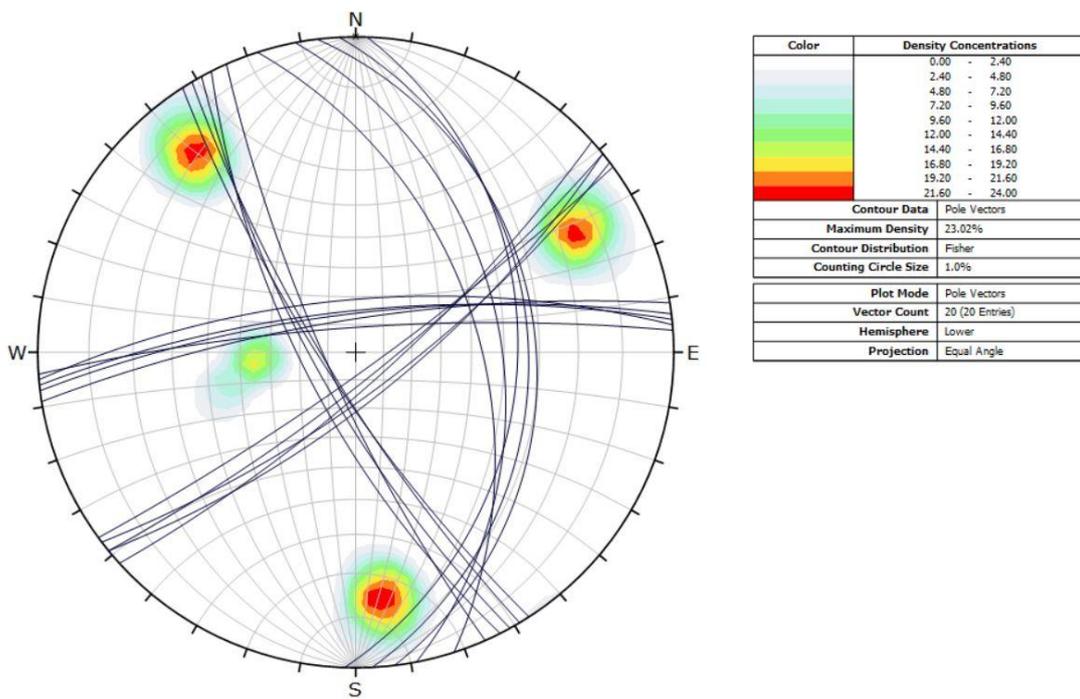


Figura 4.13 – Rappresentazione stereografica dei sistemi di discontinuità rilevati nella stazione geo-strutturale GNA-01

Tabella 4.17 – Stazione geo-strutturale GNA-01: sistemi di discontinuità rilevati

Famiglia	Tipo	Inclinazione (°)	Direzione di immersione (°)
J1	scistosità	38	082
J2	giunto	76	241
J3	giunto	78	141
J4	giunto	76	354

Le caratteristiche medie di questi sistemi di discontinuità sono di seguito sinteticamente riepilogate:

- il sistema J1 ha forma planare con scabrezza a piccola scala modesta (Joint Roughness Coefficient, JRC=5); la persistenza è inferiore al metro e la spaziatura è dell'ordine di alcuni centimetri e l'apertura delle discontinuità varia da 0.1 a 1 mm
- il sistema J2 ha forma planare e scabrezza a piccola scala media (JRC=7-8); la persistenza è inferiore al metro e la spaziatura varia tra 5 e 20 cm; l'apertura delle discontinuità varia da 0.1 a 1 mm
- il sistema J3 ha forma planare e scabrezza a piccola scala medio-alta (JRC=10); la persistenza è inferiore al metro e la spaziatura varia tra 8 e 20 cm; l'apertura delle discontinuità varia da 0.1 a 1 mm
- il sistema J4 ha forma planare e scabrezza a piccola scala media (JRC=7); la persistenza varia tra 1 e 3 m e la spaziatura varia tra 10 e 30 cm; l'apertura delle discontinuità varia da 0.1 a 1 mm.

Le prove effettuate con martello di Schmidt sono state interpretate tramite correlazioni empiriche per ricavare la resistenza a compressione monoassiale riferita alla superficie di discontinuità, JCS (Joint Compressive Strength), i cui valori sono riportati in Tabella 4.18.

Tabella 4.18 – Stazione geo-strutturale GNA-01: valore di JCS da misure sclerometriche

Sistema	J1	J2	J3	J4
Resistenza a compressione, JCS (MPa)	66	79	74	64

È interessante osservare che l'assenza di alterazione sulle superficie di discontinuità fa sì che il valore medio di JCS, pari a 71 MPa, sia molto prossimo al valore medio della resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta della facies meno scistosa delle arenarie ottenuta dalle prove di Point Load e riportati in Tabella 4.13 Tabella 4.14.

La stazione strutturale GNA-02, ubicata lungo la strada che scende dal futuro bacino alla galleria di accesso, mostra un ammasso roccioso mediamente fratturato con metarenarie molto scistose (Figura 4.14).



Figura 4.14 - Ripresa dell'affioramento roccioso dove è stata rilevata la stazione geo-strutturale GNA-02

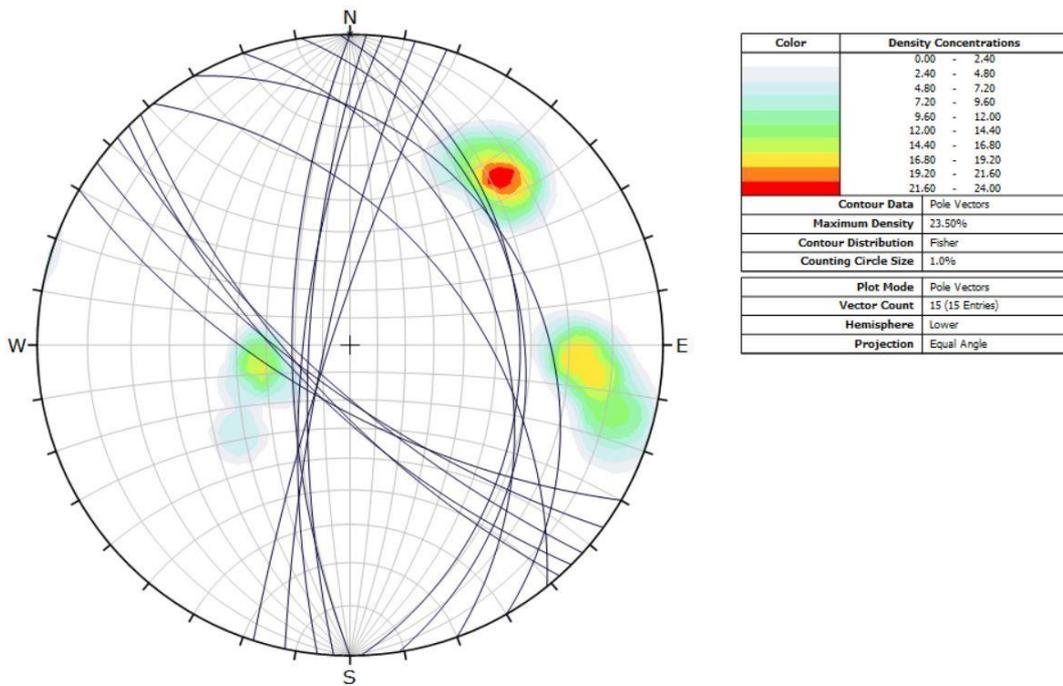


Figura 4.15 - Rappresentazione stereografica dei sistemi di discontinuità rilevati nella stazione GNA-02

Nell'affioramento sono state riconosciute 3 famiglie di discontinuità (Figura 4.15), la cui giacitura media è riportata in Tabella 4.19.

Tabella 4.19 - Stazione geo-strutturale GNA-01: sistemi di discontinuità rilevati

Famiglia	Tipo	Inclinazione (°)	Direzione di immersione (°)
J1	scistosità	35	069
J2	giunto	71	220
J3	giunto	76	278

Le caratteristiche medie di questi sistemi di discontinuità sono di seguito sinteticamente riepilogate:

- il sistema J1 ha forma planare con scabrezza a piccola scala bassa (JRC=4); la persistenza è inferiore al metro e la spaziatura è dell'ordine di alcuni centimetri e l'apertura delle discontinuità varia da 0.1 a 1 mm
- il sistema J2 ha forma planare con scabrezza a piccola scala media (JRC=8); la persistenza è inferiore al metro e la spaziatura varia tra 15 e 80 cm e l'apertura delle discontinuità varia da 0.1 a 1 mm
- il sistema J3 ha forma planare con scabrezza a piccola scala media (JRC=7); la persistenza è compresa tra 1 e 3 m e la spaziatura varia tra 0.2 e 1.1 m; l'apertura delle discontinuità varia da 0.1 a 1 mm.

Le prove effettuate con martello di Schmidt sono state interpretate per ricavare la resistenza a compressione monoassiale riferita alla superficie di discontinuità, JCS (Joint Compressive Strength), i cui valori sono riportati in Tabella 4.20.

Tabella 4.20 - Stazione geo-strutturale GNA-02: valore di JCS da misure sclerometriche

Sistema	J1	J2	J3
Resistenza a compressione, JCS (MPa)	56	29	25

I valori di JCS ricavati per questa stazione geo-strutturale risultano decisamente inferiori a quelli ricavati nella precedente stazione strutturale, nonostante non venga osservata alterazione sulla superficie dei giunti. Il valore medio di resistenza risulta pari a 37 MPa, ed è simile ai valori di resistenza a compressione monoassiale ottenuti dalle prove di Point Load per la facies più scistosa delle metarenarie, riportati in Tabella 4.13 Tabella 4.14.

4.5 Caratterizzazione della roccia intatta

I parametri di resistenza della roccia intatta sono stati definiti con riferimento al criterio empirico di Hoek-Brown (Hoek et al., 1988, 1995, 1997, 2002). Tale criterio, nel piano delle

tensioni principali σ_1 - σ_3 , è formulato in funzione dei tre parametri σ_{ci} , m_i ed s , secondo la seguente relazione:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \cdot \left(m_i \cdot \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^{0.5}$$

dove:

m_i dipende dalle caratteristiche litologiche della roccia e consente di rappresentare l'incremento di resistenza al crescere della pressione di confinamento laterale σ_3

s permette di stimare la riduzione di resistenza dovuta alla presenza di discontinuità preesistenti o indotte dalla storia di carico; nel caso di roccia intatta, priva di evidente micro-fratturazione a piccola scala, $s = 1$

σ_{ci} è la resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta.

I parametri di resistenza della roccia intatta, (σ_{ci} e m_i) sono stati definiti, a partire dai dati delle prove di laboratorio, utilizzando il programma RocLab, che calcola i valori dei parametri della parabola, la cui equazione coincide con la formulazione analitica di Hoek-Brown, che meglio interpola i dati di laboratorio disponibili.

Nell'operazione di interpolazione si è osservato che per i campioni di dolomia e di siltite si ottenevano valori di m_i molto elevati, segno che parte dei campioni presentavano evidenze di micro-fratturazione che ha influito sui valori delle resistenze a rottura. Si è pertanto deciso, in questi due casi di utilizzare il valore di m_i consigliato in letteratura per la corrispondente litologia.

I valori di m_i e σ_{ci} ottenuti dall'interpolazione sono riepilogati in Tabella 4.21.

Tabella 4.21 - Parametri del criterio di Hoek-Brown per roccia intatta

Unità	m_i	σ_{ci} (MPa)	Note
D	9	63.85	il valore di m_i è stato definito da letteratura
S	7	43.02	il valore di m_i è stato definito da letteratura
M	5.006	11.21	
A	13	70	il valore di m_i è stato definito da letteratura

4.6 Classificazione geomeccanica dell'ammasso roccioso

La classificazione dell'ammasso roccioso è stata effettuata con riferimento agli indici RMR (Bieniawski, 1989) e GSI (Hoek et al., 1995, 1997, 2002), dei quali viene di seguito riportata una breve descrizione.

4.6.1 Indici di classificazione RMR e GSI

L'indice RMR (*Rock Mass Rating*, Bieniawski, 1989) viene determinato sulla base della somma dei coefficienti numerici associati alla valutazione delle seguenti caratteristiche (Tabella 4.22):

- resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta σ_{ci}
- RQD
- spaziatura delle discontinuità
- condizioni delle discontinuità
- presenza d'acqua
- orientazione delle discontinuità rispetto alla direzione di avanzamento dello scavo.

Tabella 4.22 - Valori dei coefficienti numerici che compongono l'indice RMR (Bieniawski, 1989)

GEOMECHANICS CLASSIFICATION OF ROCK MASS (BIENIAWSKI, 1989)								
A. Classification parameters and their ratings								
PARAMETER	RANGES OF VALUES							
	> 10 MPa	4 - 10 MPa	2 - 4 MPa	1 - 2 MPa	For this low range - uniaxial compressive test is preferred			
Strength of intact rock material	Point-load strength index	> 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
Drill core quality RQD		90% - 100%	75% - 90%	50% - 75%	25% - 50%	< 25%		
	Rating	20	17	13	8	3		
Spacing of discontinuities		> 2 m	0.6 - 2 m	0.2 - 0.6 m	60 - 200 mm	< 60 mm		
	Rating	20	15	10	8	5		
Condition of discontinuities		Very rough surfaces. Not continuous. No separation. Unweathered wall rock.	Slightly rough surfaces. Separation < 1mm. Slightly weathered walls.	Slightly rough surfaces. Separation < 1mm. Highly weathered walls.	Slickensided surfaces. OR Gouge < 5mm thick OR Separation 1-5mm. Continuous.	Soft gouge > 5mm thick or Separation > 5mm Continuous		
	Rating	30	25	20	10	0		
Ground water	Inflow per 10 m tunnel length	None	< 10 l/min	10 - 25 l/min	25 - 125 l/min	> 125 l/min		
	Ratio joint water pressure / major principal stress	0	0.0 - 0.1	0.1 - 0.2	0.2 - 0.5	> 0.5		
	General conditions	completely dry asciutto	Damp	Wet	Dripping	Flowing		
	Rating	15	10	7	4	0		
B. Rating adjustment for discontinuity orientations								
Ratings	Strike and dip orientation of joints	Very favourable	Favourable	Fair	Unfavourable	Very unfavourable		
	Tunnels	0	-2	-5	-10	-12		
	Foundations	0	-2	-7	-15	-25		
	Slopes	0	-5	-25	-50	-60		
Effect of discontinuity strike and dip orientation in tunnelling								
Strike perpendicular to tunnel axis	Drive with dip	Dip 45°-90°		Very favourable				
		Dip 20°-45°		Favourable				
Strike parallel to tunnel axis	Drive against dip	Dip 45°-90°		Fair				
		Dip 20°-45°		Unfavourable				
Irrespective of strike		Dip 45°-90°		Very Unfavourable				
		Dip 0°-20°		Unfavourable				
C. Rock mass classes determined from total ratings								
Class No.	I	II	III	IV	V			
Description	Very good rock	Good rock	Fair rock	Poor rock	Very poor rock			
Rating	81 - 100	61 - 80	41 - 60	21 - 40	< 20			
D. 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 to 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°			

Il valore dell'indice RMR è dato dalla somma dei 6 coefficienti numerici P_i associati ai valori delle grandezze sopra elencate:

$$RMR = \sum_{i=1}^6 P_i$$

Sulla base dell'indice RMR è poi possibile ricavare il valore dell'indice GSI, ponendo pari a zero il coefficiente relativo all'orientazione delle discontinuità (P₆) e assumendo pari a 15 il coefficiente relativo alle venute d'acqua (P₅) ed applicando la seguente formula:

$$GSI = BRMR - 5 = \sum_1^4 P_i - 5$$

dove BRMR è dato dalla somma dei soli primi 4 coefficienti.

Il valore dell'indice GSI (*Geological Strength Index*, Hoek et al., 1995, 2002) può essere derivato direttamente da valutazioni qualitative sul campo, individuando un campo significativo per le condizioni geologico-strutturali dell'ammasso indagato, secondo l'abaco riportato in Figura 4.16.

<p>GEOLOGICAL STRENGTH INDEX FOR JOINTED ROCKS (Hoek and Marinos, 2000)</p> <p>From the lithology, structure and surface conditions of the discontinuities, estimate the average value of GSI. Do not try to be too precise. Quoting a range from 33 to 37 is more realistic than stating that GSI = 35. Note that the table does not apply to structurally controlled failures. Where weak planar structural planes are present in an unfavourable orientation with respect to the excavation face, these will dominate the rock mass behaviour. The shear strength of surfaces in rocks that are prone to deterioration as a result of changes in moisture content will be reduced if water is present. When working with rocks in the fair to very poor categories, a shift to the right may be made for wet conditions. Water pressure is dealt with by effective stress analysis.</p>		SURFACE CONDITIONS				
STRUCTURE		VERY GOOD Very rough, fresh unweathered surfaces	GOOD Rough, slightly weathered, iron stained surfaces	FAIR Smooth, moderately weathered and altered surfaces	POOR Stickensided, highly weathered surfaces with compact coatings or fillings or angular fragments	VERY POOR Stickensided, highly weathered surfaces with soft clay coatings or fillings
		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90			N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80	70			
	VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets		60			
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			50		
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces			40	30	
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes				20	
						10
		N/A	N/A			

Figura 4.16 - Abaco per la determinazione dell'indice GSI per ammassi rocciosi fratturati

Nel caso in esame, il calcolo dell'indice BRMR e dell'indice GSI è stato condotto per le Arenarie di San Vito sulla base dei due rilievi geo-strutturali eseguiti ed ha permesso di determinare i valori degli indici riportati in Tabella 4.23. Per il dettaglio delle valutazioni condotte si rimanda alle schede riportate nell'Elaborato 1351-A-OP-A-02.

Tabella 4.23 - Unità A: indici di classificazione BRMR e GSI dell'ammasso roccioso

Stazione	BRMR	GSI
GNA-01	62	57
GNA-02	53	48

Per quanto riguarda le restanti unità geotecniche, il valore di GSI è stato stimato sulla base dell'abaco di Figura 4.16 in base ai dati raccolti nelle perforazioni di sondaggio ed i valori ottenuti sono rappresentati in Figura 4.17 ed in Tabella 4.24.

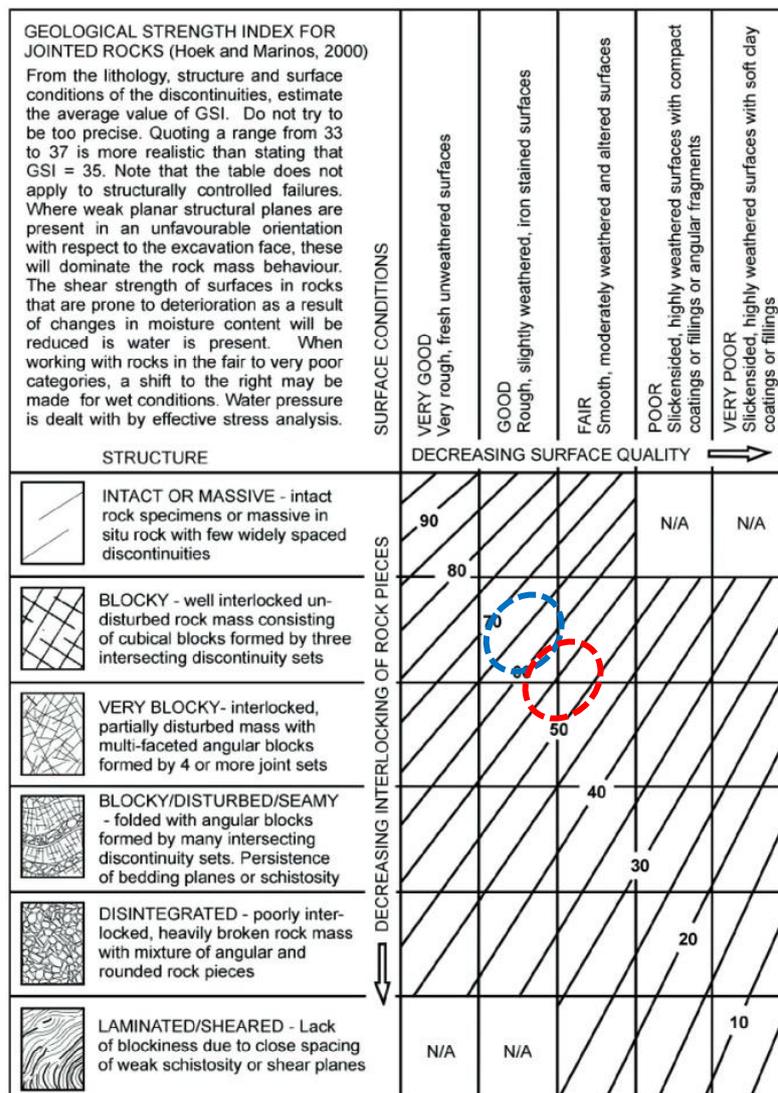


Figura 4.17 - Abaco per la determinazione dell'indice GSI per ammassi rocciosi fratturati. in blu i valori caratteristici delle Unità D ed S e in rosso i valori caratteristici dell'Unità M

Tabella 4.24 - Unità D, S ed M: indice di classificazione GSI dell'ammasso roccioso

Unità	GSI
D	60-70
S	55-65
M	55-65

4.7 Caratterizzazione geotecnica dell'ammasso roccioso

La caratterizzazione geotecnica dell'ammasso roccioso è stata condotta in riferimento a un modello di mezzo continuo equivalente, ovvero un mezzo omogeneo ed isotropo, con modello costitutivo elasto-plastico ideale, le cui caratteristiche di resistenza sono quantificate in riferimento al criterio non lineare di Hoek-Brown.

Nel modello continuo equivalente le caratteristiche di resistenza e di deformabilità dell'ammasso roccioso sono stimate scalando i parametri meccanici della roccia intatta mediante correlazioni empiriche espresse in funzione dell'indice GSI, sulla base delle espressioni di seguito illustrate.

4.7.1 Definizione dei parametri di resistenza

Per l'ammasso roccioso le caratteristiche di resistenza del modello continuo equivalente sono quantificate facendo riferimento al criterio di resistenza di Hoek-Brown (1988, 2002), espresso dalla relazione:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} \left(m_b \cdot \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

essendo m_b , s ed a dei fattori di scala legati all'indice GSI e definiti, rispettivamente, mediante le seguenti espressioni empiriche:

$$m_b = m_i \cdot e^{\left(\frac{GSI-100}{28-14 \cdot D} \right)}$$

$$s = e^{\left(\frac{GSI-100}{9-3 \cdot D} \right)} \quad (\text{per } GSI > 25)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} \cdot (e^{-GSI/15} - e^{-20/3})$$

essendo:

GSI Geological Strength Index

σ_{ci} resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta

m_i parametro che consente di rappresentare l'incremento di resistenza al crescere della pressione di confinamento laterale σ_3 ,

- D grado di disturbo dell'ammasso roccioso; assunto pari a 0.0, dal momento che gli scavi verranno effettuati con mezzi meccanici o con esplosivo in condizione di volata controllata.

4.7.2 Definizione dei parametri di deformabilità

Secondo quanto proposto da Hoek e Diederichs (2006), il modulo di elasticità E_d dell'ammasso roccioso può essere valutato mediante la seguente relazione empirica, espressa in funzione di GSI, E_i (modulo di deformabilità della roccia intatta) e D:

$$E_d = E_i \cdot \left(0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{((60+15 \cdot D - GSI)/11)}} \right)$$

essendo:

- E_i il valore medio dei moduli secanti E_{sec} derivati dai risultati delle prove di compressione monoassiale.
- GSI Geological Strength Index
- D grado di disturbo dell'ammasso roccioso; assunto pari a 0.0, dal momento che gli scavi verranno effettuati con mezzi meccanici o con esplosivo in condizione di volata controllata.

In assenza dei valori del modulo di elasticità da prove di laboratorio, il modulo dell'ammasso roccioso può essere ricavato dalla medesima formula sostituendo al valore di E_i la seguente espressione:

$$E_i = MR \cdot \sigma_{ci}$$

dove il coefficiente MR è ricavato da valori di letteratura.

4.8 Parametri geotecnici caratteristici

Nel presente paragrafo si propone una sintesi dei parametri caratteristici di resistenza e deformabilità da associare alle unità geotecniche individuate, definiti attraverso le correlazioni empiriche che legano l'indice di classificazione GSI ai parametri di resistenza del criterio di resistenza non lineare di Hoek- Brown ed ai parametri di deformabilità dell'ammasso roccioso, descritte nei precedenti paragrafi, tenuto conto delle risultanze delle indagini in sito ed in laboratorio.

4.8.1 Parametri geotecnici caratteristici per l'Unità D

In Tabella 4.25 si riportano i valori dei parametri utili a definire le caratteristiche di resistenza e deformabilità dell'unità geotecnica D composta dalle dolomie appartenenti alla Formazione di Dorgali, valutati con stime cautelative partendo dai dati a disposizione:

Tabella 4.25 - Unità D: parametri fisici, di resistenza e di deformabilità

γ (kN/m ³)	GSI	σ_{ci} (MPa)	m_i	m_b	s	a	ν	E_i (GPa)	E_d (GPa)
27.5	65	64	9	2.579	0.0205	0.502	0.25	35.31	22.31

4.8.2 Parametri geotecnici caratteristici per l'Unità S

In Tabella 4.26 si riportano i valori dei parametri utili a definire le caratteristiche di resistenza e deformabilità dell'unità geotecnica S composta dalle siltiti appartenenti alla formazione di Genna Selole, valutati con stime cautelative partendo dai dati a disposizione:

Tabella 4.26 - Unità S: parametri fisici, di resistenza e di deformabilità

γ (kN/m ³)	GSI	σ_{ci} (MPa)	m_i	m_b	s	a	ν	E_i (GPa)	E_d (GPa)
25.6	65	43	7	2.006	0.0205	0.502	0.25	26.67	16.85

4.8.3 Parametri geotecnici caratteristici per l'Unità M

Nella Tabella 4.27 si riportano i valori dei parametri utili a definire le caratteristiche di resistenza e deformabilità dell'unità geotecnica M composta dai metaconglomerati appartenenti alla formazione di Monte Santa Vittoria, valutati con stime cautelative partendo dai dati a disposizione:

Tabella 4.27 - Unità M: parametri fisici, di resistenza e di deformabilità

γ (kN/m ³)	GSI	σ_{ci} (MPa)	m_i	m_b	s	a	ν	E_i (GPa)	E_d (GPa)
25	60	11.3	5.006	1.200	0.0117	0.503	0.30	5.05	2.63

4.8.4 Parametri geotecnici caratteristici per l'Unità A

Nel seguito si riportano i valori dei parametri utili a definire le caratteristiche di resistenza e deformabilità dell'unità geotecnica A composta dalle arenarie appartenenti alla formazione di San Vito, valutati con stime cautelative partendo dai dati a disposizione.

In considerazione delle differenti condizioni riscontrate durante la campagna di indagini si prospettano tre diversi set di parametri per l'unità A, riferiti alle seguenti condizioni:

- arenarie (parametri medi): da impiegarsi nelle condizioni in cui l'ammasso si presenta più integro e meno scistoso
- arenarie (parametri minimi): da impiegarsi nelle condizioni in cui l'ammasso si presenta più fratturato e scistoso
- arenarie (faglia): da impiegarsi nelle condizioni in cui l'ammasso viene attraversato da zone di disturbo tettonico.

Tabella 4.28 - Unità A: parametri fisici, di resistenza e di deformabilità

Unità	γ (kN/m³)	GSI	σ_{ci} (MPa)	m_i	m_b	s	a	v	MR	E_d (GPa)
parametri medi	26	55	70	13	2.606	0.0067	0.504	0.25	275	7.86
parametri minimi	26	40	26	12	1.408	0.0013	0.511	0.30	675	2.80
faglia	26	30	26	12	0.985	0.0004	0.522	0.35	675	1.43

5. PROBLEMATICHE GEOTECNICHE ATTESE

Le opere in progetto si sviluppano per la maggior parte in sotterraneo e solo il bacino di monte si trova in superficie, con problematiche geotecniche di differente natura.

Per quanto riguarda il bacino di monte, la scarsa presenza di coltre eluvio-colluviale e/o detritica fa sì che i suoi argini risultino fondati direttamente sull'ammasso roccioso dolomitico che costituisce l'altopiano alla sommità del rilievo. I problemi di carattere geotecnico sono quindi legati alla necessità di uniformare il piano di posa degli argini ed all'impermeabilizzazione del fondo del bacino.

Questo comporta la bonifica delle sacche di terreno presenti in corrispondenza delle discontinuità e la profilatura e rimodellamento dell'ammasso roccioso di fondazione degli argini e del fondo bacino. Per quanto concerne l'impermeabilizzazione del fondo del bacino questa sarà ottenuta con sistemi specifici, appositamente studiati per evitare l'infiltrazione delle acque nell'ammasso roccioso dolomitico fratturato.

Per quanto concerne le opere sotterranee, le possibili problematiche geotecniche sono rappresentate da:

- intersezione degli scavi con linee di disturbo tettonico: il problema è particolarmente importante per le opere di dimensioni maggiori (caverna della centrale e caverna della sottostazione elettrica), la cui localizzazione deve essere attentamente studiata per evitare o ridurre al minimo l'intersezione con le zone di faglia e/o intensa fratturazione
- orientazione delle tensioni principali rispetto allo scavo: allo stato attuale non sono disponibili dati certi sullo stato tensionale naturale agente in sito. Per la componente verticale si assume quindi un valore pari al carico geostatico e per le componenti orizzontali può assumersi un valore di k_0 compreso tra 0.5 e 1, con valori crescenti secondo la profondità. L'indagine sull'effettiva condizione tensionale naturale dovrà essere svolta nelle future fasi di progettazione al fine anche di orientare, se necessario, in modo diverso le grandi caverne per migliorare la risposta tensionale dell'ammasso roccioso allo scavo
- elevata profondità degli scavi: la notevole profondità degli scavi delle caverne, della galleria di accesso, della via d'acqua e del pozzo piezometrico (>500 m) necessita di un esame approfondito rispetto al potenziale problema di *rock burst* o *colpi di tensione* che produce distacchi anche violenti della roccia sulla parete di scavo e che è tipo di rocce da poco a mediamente fratturate e di buone caratteristiche meccaniche. Sempre legato al tema dell'elevata profondità è anche il potenziale fenomeno di *squeezing*, che si manifesta al contrario in presenza di ammassi rocciosi molto fratturati. Un approfondimento sui due temi è fornito di seguito
- interferenza con il sistema idrogeologico: data la scarsa permeabilità delle Arenarie di San Vito, in cui si sviluppano le gallerie, le caverne, il pozzo piezometrico e il pozzo

paratoie, risulta nulla o poco significativa l'interferenza con i sistemi idrogeologici che presentano presenza di falde acquifere significative solo in corrispondenza delle dolomie superficiali. Solo in corrispondenza delle zone di imbocco della galleria di accesso e del pozzo paratoie potrà essere presente in sotterraneo una modesta infiltrazione di acque superficiali in caso di eventi meteorici; per il resto si ipotizzano solo stillicidi in corrispondenza delle zone maggiormente fratturate e/o di faglia. L'unica opera che interessa con lo scavo le dolomie è il pozzo di carico/scarico del bacino di monte, che tuttavia è un'opera rivestita con rivestimento in c.a. in modo da evitare un eventuale drenaggio di acqua. In fase di costruzione, ove localmente si riscontrassero venute significative di acqua in corso di scavo si provvederà ad interventi di impermeabilizzazione locale mediante iniezioni cementizie, al fine di non depauperare la risorsa idrica.

5.1 Fenomeni deformativi a grande profondità

Lo scavo di opere sotterranee a grande profondità, come spiegato innanzi, può comportare il manifestarsi di differenti problematiche in funzione delle condizioni tensionali e dello stato di fratturazione dell'ammasso roccioso. In particolare, possono manifestarsi i seguenti fenomeni:

- *squeezing*, in corrispondenza di ammassi rocciosi molto fratturati soggetti a elevati stati tensionali; questo fenomeno dà origine a forti convergenze del cavo e potenziale instabilità del fronte di scavo
- *spalling, rock burst o colpi di tensione*, in corrispondenza di ammassi rocciosi poco fratturati e con buone caratteristiche meccaniche soggetti ad elevati stati tensionali; questo fenomeno dà origine a distacchi più o meno violenti di roccia sul contorno di scavo anche con emissione sonora, da cui il nome italiano di "colpi di tensione o colpi di montagna" per i casi più violenti.

Facendo riferimento alla classificazione proposta dall'AFTES (*Caractérisation des massifs rocheux utile à l'étude et à la réalisation des ouvrages souterrains – Raccomandazione del GT1 – 2003*) è possibile definire la classe delle condizioni di sollecitazione (Tabella 5.1) sulla base del rapporto σ_{ci}/σ_0 , dove σ_{ci} rappresenta la resistenza a compressione uniassiale della roccia intatta e σ_0 è il valore della massima sollecitazione agente sul cavo in un piano ortogonale all'asse della galleria.

In Tabella 5.2 per ciascuna unità geotecnica si è considerata la condizione tensionale più gravosa che si manifesta nello scavo delle opere sotterranee per una preliminare analisi dello stato di sollecitazione, da cui emerge che le Unità D ed S ed M rientrano nella classe CN1, l'unità M è in classe CN2 e l'unità A spazia dalla classe CN1 per le arenarie in facies meno scistosa, alla classe CN2 al limite della CN3, per le arenarie in facies più scistosa e nelle zone di faglia.

Tabella 5.1 - Classificazione preliminare dello stato di sollecitazione nell'intorno delle opere sotterranee

CLASS	σ_c/σ_0 RATIO	DESCRIPTION OF STRESS STATES
CN 1	> 4	WEAK Rock matrix satisfactorily strong but support may be needed because of jointing
CN 2	2 à 4	MODERATE Failure or plastic zones possible at tunnel walls
CN 3	< 2	STRONG Rock matrix strength manifestly insufficient

Tabella 5.2 - Classificazione dello stato di sollecitazione massimo

Unità	Prof. max (m)	γ (kN/m ³)	σ_0 (MPa)	GSI	σ_{ci} (MPa)	σ_{ci}/σ_0	CN
D	40	27.5	1.1	65	64	58.18	CN1
S	50	25.6	1.28	65	43	33.59	CN1
M	200	25	5.0	60	11.3	2.26	CN2
A parametri medi	490	26	12.74	55	70	5.49	CN1
A parametri minimi	490	26	12.74	40	26	2.04	CN2
A faglia	490	26	12.74	30	26	2.04	CN2

Il comportamento dell'ammasso roccioso delle unità D, S e M, in funzione dello stato di sollecitazione agente, resta in campo elastico o in campo elasto-plastico con sviluppo di modesti raggi plastici.

L'unità A, al contrario, sia in relazione alle diverse condizioni geologico-strutturali e geomeccaniche, sia in relazione allo stato tensionale agente, che varia da coperture di poche decine di metri a quasi 500 m, esibisce una notevole varietà di comportamenti: da un comportamento in campo elastico ad un comportamento elasto-plastico, fino a manifestare fenomeni di *squeezing* con deformazioni significative nelle zone di faglia e di alta copertura e a fenomeni di *rock-burst* dove l'ammasso roccioso è meno fratturato, ha migliori caratteristiche meccaniche e le coperture sono alte.

Un'analisi preliminare della potenzialità di accadimento dei fenomeni di *rock-burst* e di *squeezing* è stata fatta sulla base dell'abaco sviluppato da Russo et al. (2014), rappresentato in Figura 5.1, basandosi sui valori degli indici di classificazione RMR e GSI, dei parametri di resistenza dell'ammasso roccioso σ_{cm} , di resistenza della roccia intatta σ_{ci} e del massimo stato tensionale agente p_0 , pari alla componente verticale geostatica a 490 m di profondità, riportati in Tabella 5.3.

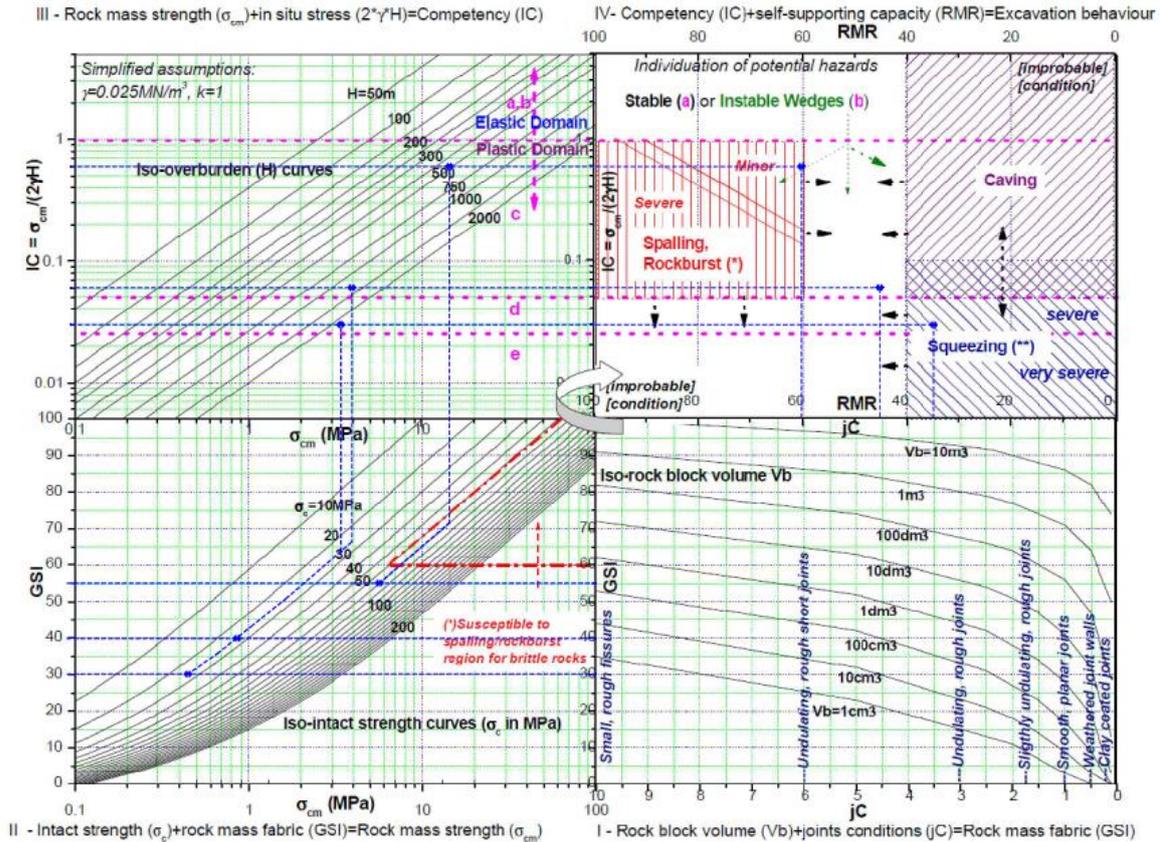


Figura 5.1 - Unità A: applicazione del GDE Multiple Graph

Tabella 5.3 - Unità A: parametri utilizzati nell'abaco GDE Multiple Graph (Russo et al, 2014)

Unità	Prof. max (m)	γ (kN/m ³)	p_0 (MPa)	GSI	RMR	σ_{ci} (MPa)	σ_{cm} (MPa)
A parametri medi	490	26	12.74	55	60	70	15.40
A parametri minimi	490	26	12.74	40	45	26	3.98
A faglia	490	26	12.74	30	35	26	3.13

In base al grafico di Figura 5.1 è possibile concludere che:

- per le migliori condizioni dell'ammasso roccioso (unità A parametri medi), alle massime profondità di scavo previste, si potranno manifestare fenomeni di *rock-burst* di modesta entità, per lo più sotto forma di "spalling" ovvero "sfaldamenti" delle pareti di scavo, senza fenomeni di natura violenta
- per le condizioni mediocri dell'ammasso roccioso (unità A parametri minimi) il comportamento sarà in campo elasto-plastico
- per le condizioni peggiori dell'ammasso roccioso (unità A faglia), alle massime profondità potrebbero manifestarsi fenomeni di *squeezing* anche significativi e di difficile controllo per le sezioni di scavo di maggiore dimensione. Questa indicazione preliminare, da ve-

rificare in sede di calcolo, è significativa per quanto riguarda il posizionamento delle caverne della centrale e dei trasformatori, che devono essere ubicate in zone lontane da disturbi tettonici significativi.

Una valutazione preliminare delle deformazioni attese per l'Unità A parametri minimi e A faglia è possibile attraverso il grafico di Figura 5.2 (Carranza Torres, 2004; Duncan Fama, 1993; Hoek, 2017), da cui si ottengono i valori riportati in Tabella 5.4.

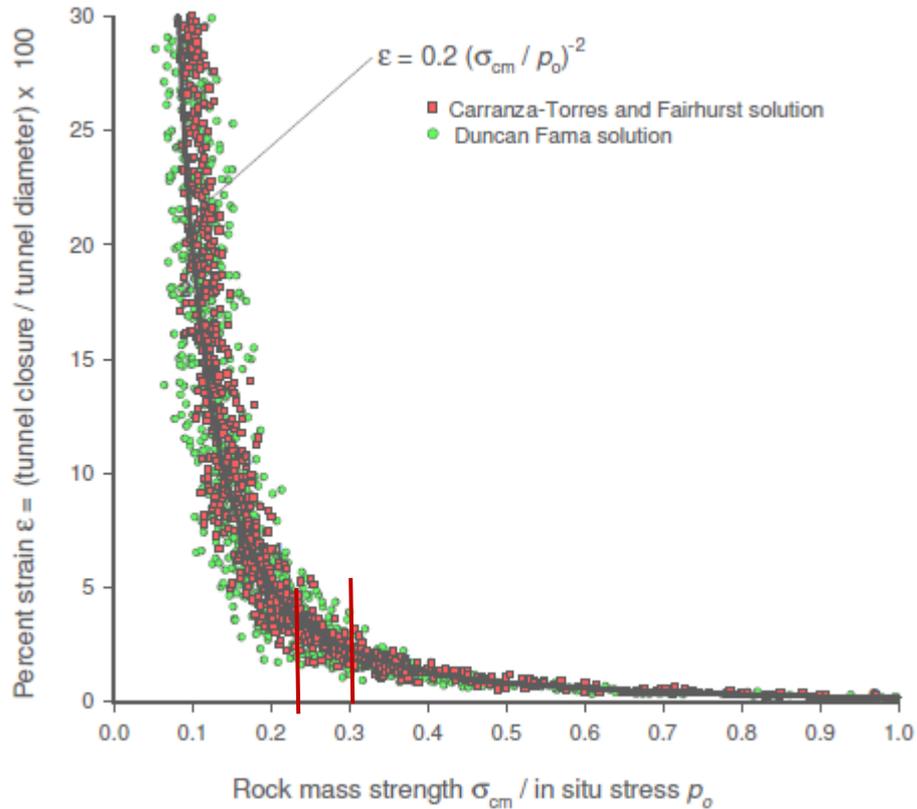


Figura 5.2 - Unità A: deformazione percentuale attesa alla massima copertura

Tabella 5.4 - Unità A: valori di deformazione percentuale attesa alla massima copertura

Unità	Prof. max (m)	γ (kN/m ³)	p ₀ (MPa)	σ _{cm} (MPa)	σ _{cm} /p ₀	ε (%)
A parametri medi	490	26	12.74	15.40	1.21	0.14
A parametri minimi	490	26	12.74	3.98	0.31	2.05
A faglia	490	26	12.74	3.13	0.24	3.31

Una stima del raggio plastico r_p nell'intorno dello scavo, in assenza di sostegno, può essere fatta sulla base della seguente formula:

$$\frac{r_p}{r_0} = 1.25 \left(\frac{\sigma_{cm}}{p_0} \right)^{-0.57}$$

dove r_0 è il raggio equivalente dello scavo, da cui si ottengono i valori riportati in Tabella 5.5.

Tabella 5.5 - Unità A: stima del raggio plastico nell'intorno dello scavo

Unità	p_0 (MPa)	σ_{cm} (MPa)	σ_{cm}/p_0	r_p/r_0
A parametri medi	12.74	15.40	1.21	1.12
A parametri minimi	12.74	3.98	0.31	2.43
A faglia	12.74	3.13	0.24	2.78

È evidente come nelle condizioni i di massima copertura, la plasticizzazione dell'ammasso roccioso in assenza di interventi è decisamente significativa per le condizioni di ammasso roccioso mediocri e scadenti.

6. BIBLIOGRAFIA

Bieniawski Z.T. (1989). "Engineering Rock Mass Classification", J. Wiley, New York, 1989.

Carranza-Torres C. (2004). "Elasto-plastic solution of tunnel problems using the generalized form of the Hoek-Brown failure criterion". In proc. ISRM SINOROCK2004 symposium China, (Eds. J.A. Hudson and F. Xia-Ting). Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 41(3), 480–481.

Carranza-Torres C. (2004). "Some Comments on the Application of the Hoek-Brown Failure Criterion for Intact Rock and Rock Masses to the Solution of Tunnel and Slope Problems". In MIR 2004 – X conference on rock and engineering mechanics, Torino, (eds. G. Barla and M. Barla). Chapter 10, 285–326. Pàtron Editore, Bologna

Duncan Fama M.E. (1993). "Numerical modelling of yield zones in weak rocks". In Comprehensive rock engineering, (ed. J.A. Hudson) 2, 49-75. Oxford: Pergamon.

Hoek E., Brown E.T. (1988). "The Hoek-Brown failure criterion - a 1988 update". Proc. 15th Can. Rock Mechanics Symp., University of Toronto, pp. 31-38.

Hoek E., Brown E.T. (1997). "Practical estimates of rock mass strength". Int. J. Rock Mech. Min. Sci., Vol. 34, No 8, pp. 1165-1186.

Hoek E. (2000). "2000 Terzaghi Lecture", presented in ASCE Civil Engineering Conference and Exposition, Seattle, October 2000; published in September 2001 on ASCE Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Journal.

Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B. (2002). "Hoek-Brown failure criterion - 2002 edition". Proc. North American Rock Mechanics Society meeting, Toronto, July 2002, pp. 267-273.

Hoek E., Diederichs M.S. (2006). "Empirical estimation of rock mass modulus". International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 43, pp. 203-215.

Hoek E. (2017). "Practical Rock Engineering", <https://www.rocscience.com/learning/hoek-corner>

Russo G. (2014). "An update of the "Multiple Graph" approach for the preliminary assessment of the excavation behaviour in rock tunnelling". Tunnelling and Underground Space Technology, 41, pp. 74–81