

TITLE:

AVAILABLE LANGUAGE: IT

Impianto di San Giacomo III Installazione di un nuovo gruppo di pompaggio Comune di Fano Adriano (TE)

Progetto Definitivo **RELAZIONE GEOTECNICA**

File: GRE.EEC.D.99.IT.H.17170.00.007.00 Relazione Geotecnica.docx

REV.	DATE	DESCRIPTION	PREPARED	VERIFIED	APPROVED
00	15.06.2022	<i>Emissione</i>	D.Battaglia	C.Piccinin F.Maugliani	A.Balestra

GRE VALIDATION

		Support Team:	Project Engineer: P. VIGANONI
COLLABORATORS	VERIFIED BY	VALIDATED BY	

PROJECT / PLANT

SAN GIACOMO III

GRE CODE

GROUP	FUNCTION	TYPE	ISSUER	COUNTRY	TEC	PLANT	SYSTEM	PROGRESSIVE	REVISION
GRE	EEC	D	9 9	I T H	1 7 1 7 0	0 0 0 0	0 0 7 0	0	0

CLASSIFICATION PUBLIC

UTILIZATION SCOPE PROGETTO DEFINITIVO PER AUTORIZZAZIONE

This document is property of Enel Green Power S.p.A. It is strictly forbidden to reproduce this document, in whole or in part, and to provide to others any related information without the previous written consent by Enel Green Power S.p.A.

00	15.06.2022	Bat	MFr/Bal
Versione	Data	Redatto	Verificato

Lombardi SA Ingegneri Consulenti
Via del Tiglio 2, C.P. 934, CH-6512 Bellinzona-Giubiasco
Telefono +41(0)91 735 31 00
www.lombardi.group, info@lombardi.group

INDICE

1.	INTRODUZIONE	1
2.	DESCRIZIONE DELL'OPERA	3
3.	INDAGINI GEOGNOSTICHE	5
3.1	Dati Costruttivi Caverna di San Giacomo 2	5
3.2	Rilievi geomeccanici	6
3.3	Point load Test	10
3.4	Indagini diga di Piaganini	10
3.4.1	Massa volumica reale/apparente	10
3.4.2	Velocità sonica	11
3.4.3	Compressione Monoassiali	11
3.5	Indagini diga di Polverina	12
3.5.1	Massa volumica reale/apparente	13
3.5.2	Velocità sonica	13
3.5.3	Compressione Monoassiali	13
4.	MODELLO GEOTECNICO	14
4.1	Centrale in caverna	14
4.1.1	Modello geotecnico 3D	15
4.1.2	Assetto strutturale	18
5.	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA	20
5.1	Parametri roccia intatta	21
5.2	Parametri ammasso roccioso UG1	21
5.3	Parametri ammasso roccioso UG2	22
5.4	Parametri ammasso roccioso UG3	23
6.	CONDIZIONI GEOTECNICHE DELLE OPERE	25
7.	BIBLIOGRAFIA	26
7.1	Riferimenti tecnico scientifici	26
7.2	Norme tecniche applicabili	26
7.3	Documenti storici sull'opera	26

7.4	Documenti forniti dalla Committenza	27
7.5	Documenti di progetto	27

INDICE DELLE FIGURE

Figura 1:	Ubicazione della centrale di San Giacomo	1
Figura 2:	Planimetria generale e schema degli impianti dell'asta del Vomano Errore. L'origine riferimento non è stata trovata. (parz. ridisegnato)	3
Figura 3:	Schema idraulico della centrale	4
Figura 4:	Estratto Tav.1 [14] ricolorata per semplificarne la lettura.	6
Figura 5:	Ubicazione stazioni di rilievo geomeccanico	7
Figura 6:	Stereogrammi delle misure registrate nei 2 rilievi geomeccanici e delle relative famiglie principali di discontinuità.	8
Figura 7:	Distribuzione condizioni di riferimento per le unità geotecniche nel grafico GSI di Marinis [11].	15
Figura 8:	rilievi fronti di scavo georeferenziati in 3d (in blu la centrale S. Giacomo III)	16
Figura 9:	Vista da Sud del modello 3D con volumi delle classi di roccia identificate (in blu la centrale S. Giacomo III)	16
Figura 10:	Vista da Est del modello 3D con volumi delle classi di roccia identificate (in blu la centrale S.Giacomo III)	17
Figura 11:	Sezione geologico-geotecnica trasversale e longitudinale	18
Figura 12:	stereoplot delle famiglie di discontinuità della caverna S. Giacomo II ricostruite dai dati costruttivi.	19
Figura 13:	Criteri di rottura secondo Mohr-Coulomb (blu) e Hoek-Brown (rosso) per l'unità geotecnica UG1.	22
Figura 14:	Criteri di rottura secondo Mohr-Coulomb (blu) e Hoek-Brown (rosso) per l'unità geotecnica UG2.	23
Figura 15:	Criteri di rottura secondo Mohr-Coulomb (blu) e Hoek-Brown (rosso) per l'unità geotecnica UG3.	24

INDICE DELLE TABELLE

Tabella 1: Riassunto delle caratteristiche principali dei rilievi geomeccanici	7
Tabella 2: Riassunto delle famiglie di giunti principali dei rilievi geomeccanici (Imm. Immersione; Incl: inclinazione)	8
Tabella 3: Tabella di riferimento per la definizione della rugosità a scala metrica J_w da Cai [4].	8
Tabella 4: Tabella di riferimento per la definizione della rugosità a scala centimetrica J_s da Cai [4] ..	9
Tabella 5: Tabella di riferimento per la definizione della condizione di alterazione dei giunti J_a da Barton [1].	9
Tabella 6: Riassunto delle caratteristiche di ammasso dai rilievi geomeccanici	9
Tabella 7: Statistica dei risultati delle prove di Point Load.	10
Tabella 8: Risultati statistici delle misure del peso di volume apparente e reale.	11
Tabella 9: Risultati statistici delle misure delle velocità soniche.	11
Tabella 10: Risultati statistici delle misure della compressione monoassiale.	12
Tabella 11: Risultati statistici delle misure del modulo E.	12
Tabella 12: Risultati statistici delle misure del Coefficiente di Poisson.	12
Tabella 13: valori medi delle prove eseguite sulla formazione Bisciario.	13
Tabella 14: Sintesi delle caratteristiche delle principali famiglie di discontinuità incontrate	19
Tabella 15: Parametri geotecnici di riferimento della roccia intatta.	21
Tabella 16: Parametri di resistenza e deformabilità dell'ammasso roccioso UG1.	21
Tabella 17: Parametri di resistenza e deformabilità dell'ammasso roccioso UG2.	22
Tabella 18: Parametri di resistenza e deformabilità dell'ammasso roccioso UG3.	23

ALLEGATI

Allegato 1 Rilievi geomeccanici

Allegato 2 Schede Point Load

1. INTRODUZIONE

Enel S.p.A. ha affidato a Lombardi SA l'incarico professionale di ingegneria per la Progettazione Definitiva per Autorizzazione di una nuova centrale di pompaggio in caverna (San Giacomo III) da realizzarsi in prossimità delle 2 esistenti (San Giacomo I e II), di proprietà Enel Produzione SpA, site nel territorio del comune di Fano Adriano, in provincia di Teramo (**Figura 1**). La centrale in caverna il salto tra il serbatoio della diga di Provvidenza e quello della diga di Piaganini.

La presente relazione riguarda la definizione delle caratteristiche geotecniche dell'area interessata dal progetto.

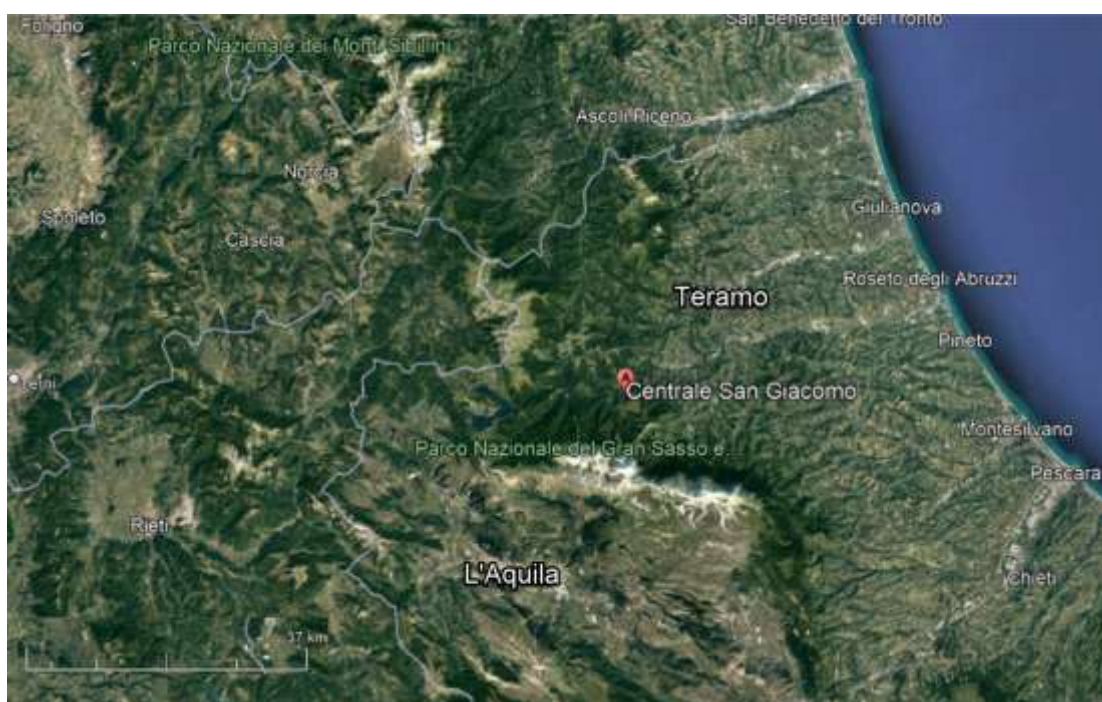


Figura 1: Ubicazione della centrale di San Giacomo

- **Capitolo 1:** contiene l'introduzione al tema tecnico nel seguito sviluppato;
- **Capitolo 2:** descrive brevemente le caratteristiche dell'impianto esistente;
- **Capitolo 0:** descrive le indagini disponibili;
- **Capitolo 4:** descrive il modello geologico-geotecnico del sito;
- **Capitolo 5:** illustra la caratterizzazione geotecnica degli ammassi e dei giunti;
- **Capitolo 6:** descrive le condizioni geotecniche delle opere;
- **Capitolo 7:** riporta i riferimenti bibliografici.

Sono inoltre inclusi i seguenti Allegati:

- Allegato 1: Rilievi Geomeccanici
- Allegato 2: Point Load Test

Gli elaborati progettuali a cui il presente rapporto fa riferimento sono:

- GRE.EEC.D.99.IT.H.17170.00.007.00 Relazione Geologica
- GRE.EEC.D.99.IT.H.17170.00.009.00 Carta geologico-geomorfologica generale
- GRE.EEC.D.99.IT.H.17170.00.010.00 Sezioni geotecniche trasversali della centrale
- GRE.EEC.D.99.IT.H.17170.00.011.00 Sezione geotecniche longitudinali della centrale

2. DESCRIZIONE DELL'OPERA

La centrale di San Giacomo I e II (o Centrale Ignazio Silone) fa parte degli impianti che utilizzano a scopo idroelettrico le acque del Fiume Vomano. Questo corso d'acqua nasce alle pendici del Monte San Franco nel Parco Nazionale del Gran Sasso e sfocia nel Mar Adriatico nei pressi di Roseto degli Abruzzi per una lunghezza complessiva di circa 76 km. Tra i suoi affluenti nell'area di interesse si ricordano il Rio Fucino, il Rio Arno ed il T.Mavone.

Lo schema degli impianti presenti lungo l'asta del Vomano è illustrato in **Figura 2** e **Figura 3**.

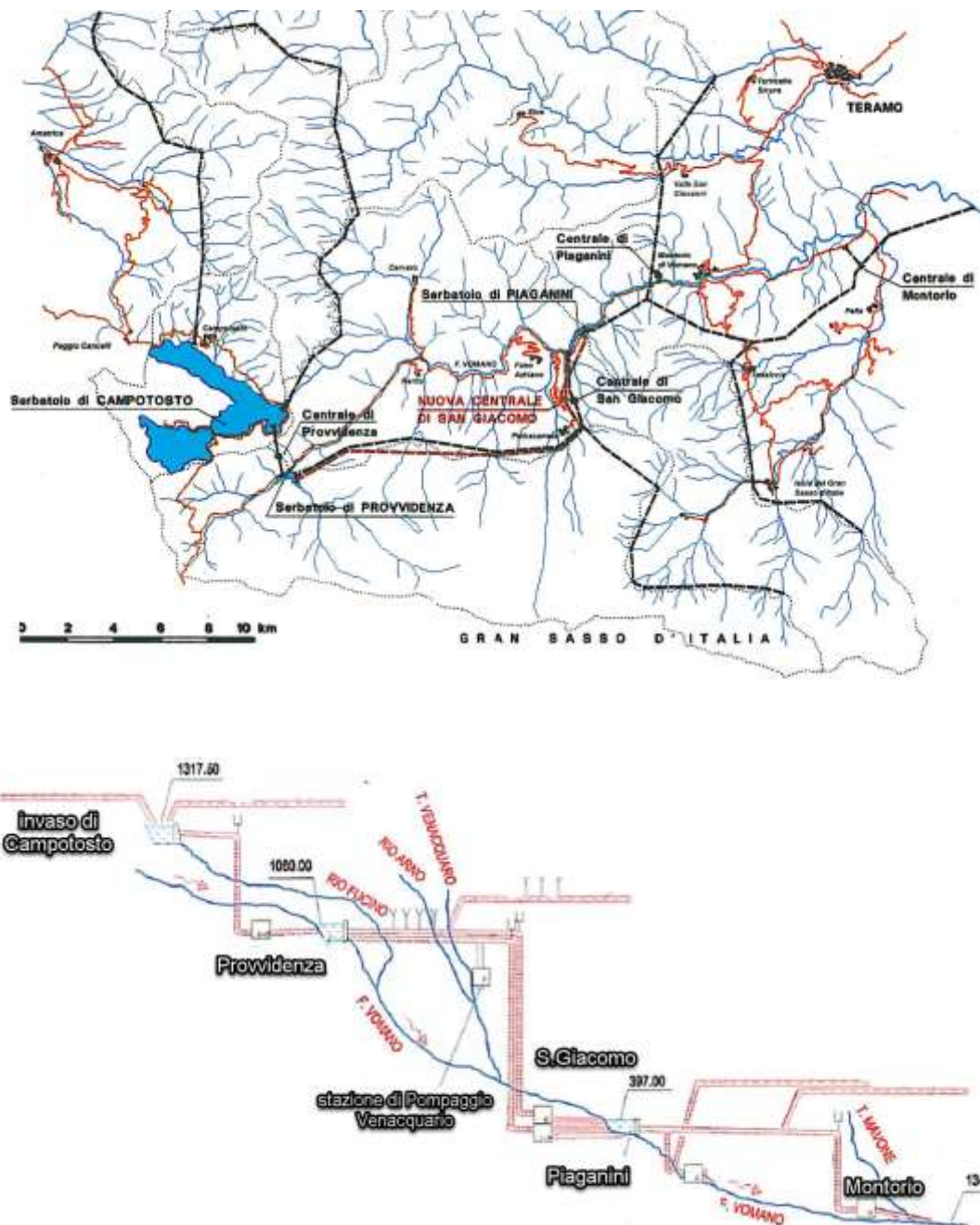


Figura 2: Planimetria generale e schema degli impianti dell'asta del Vomano **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** (parz. ridisegnato)

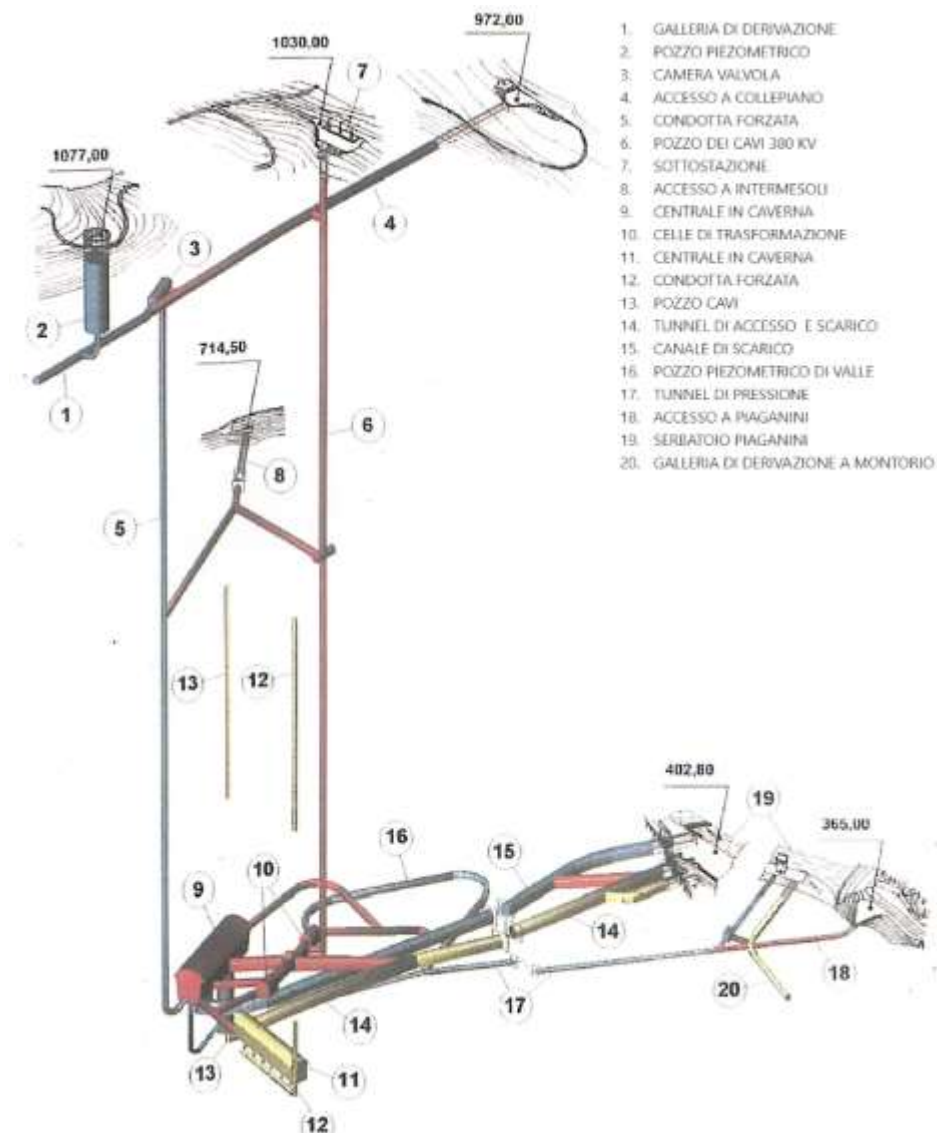


Figura 3: Schema idraulico della centrale

L'intervento in progetto prevede:

- realizzazione di una nuova caverna sotto le caverne esistente in cui installare la nuova pompa, dotata di galleria accesso carrabile e galleria di via di fuga;
- connessione alla condotta forzate esistente di San Giacomo II;
- modifiche al pozzo piezometrico di monte con formazione di una camera di espansione superiore, interrata;
- Costruzione di un nuovo pozzo piezometrico di valle
- Costruzione di una nuova galleria di scarico/aspirazione con nuova opera di presa a lago nel serbatoio Piaganini
- connessione dei cavi MT al trasformatore esistente.

3. INDAGINI GEOGNOSTICHE

Per la caratterizzazione geotecnica degli ammassi interessati dalle opere in progetto sono state acquisite ed elaborate informazioni estratte dai documenti forniti dalla Concessionaria e da pubblicazioni scientifiche, inoltre sono stati eseguiti alcuni rilievi geomeccanici con prove di point load. Per le prossime fasi di progetto sarà in ogni caso indispensabile l'esecuzione di una campagna di indagini approfondita per verificare la correttezza del modello geotecnico illustrato di seguito.

3.1 Dati Costruttivi Caverna di San Giacomo 2

Le informazioni disponibili sulla realizzazione della Caverna San Giacomo 2 derivano dalla relazione geologico strutturale redatta dal Geol. M. Faitelli nel 1995 [14] e dalle quattro tavole allegate:

- Tav.1 Rilievo geologico strutturale della parete lato accesso;
- Tav.2 Rilievo geologico strutturale della parete fronte accesso;
- Tav.3 Rilievo geologico strutturale delle pareti trasversali;
- Tav.4 Rilievo geologico strutturale delle pareti del pozzo reversibile

Le tavole, di cui è visibile un estratto in **Figura 4**, mostrano i rilievi delle pareti della caverna e del pozzo e riportano una zonazione dell'ammasso roccioso di calcari marnosi del Bisciario (Unità geologica BIS), suddiviso in tre classi generiche in base al livello di fratturazione, ma senza la applicazione di un sistema di classificazione geomeccanico. Le classi sono:

- roccia poco fratturata o poco laminata (Discreta-buona)
- roccia mediamente fratturata e mediamente laminata.(Mediocre)
- roccia molto laminata e fratturata (Scadente).

Inoltre, sulle tavole sono riportate le direzioni dei giunti principali e l'andamento della stratificazione, tuttavia senza informazioni sulla loro giacitura.

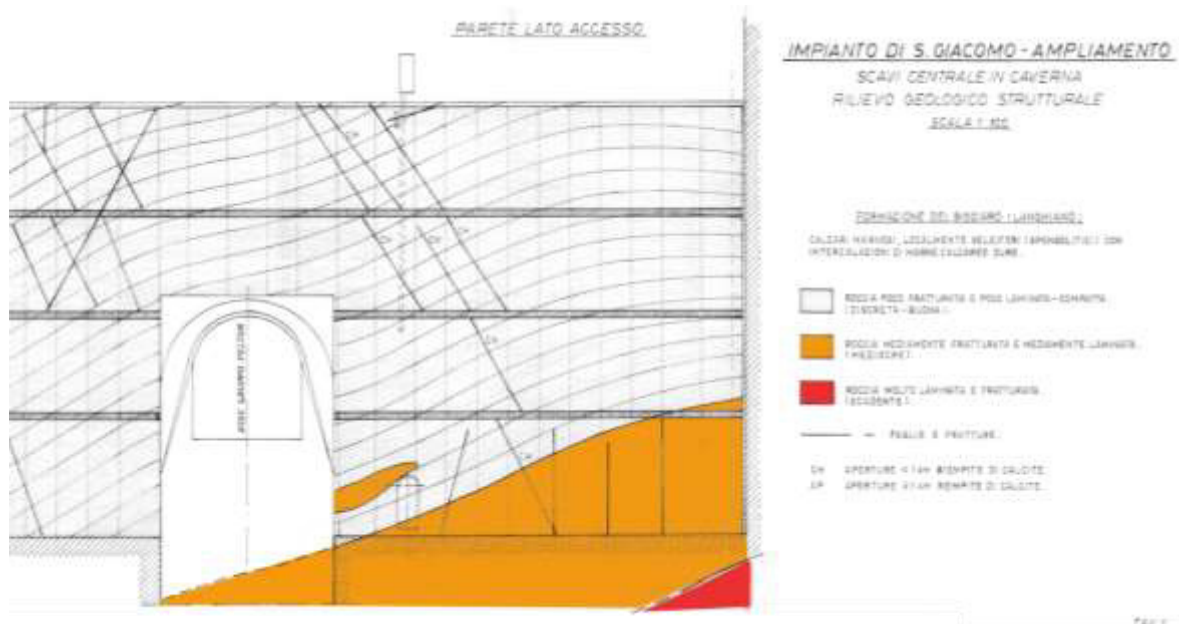


Figura 4: Estratto Tav.1 [14] ricolorata per semplificarne la lettura.

3.2 Rilievi geomeccanici

Nel gennaio 2022 sono stati eseguiti 2 rilievi geomeccanici (**Figura 5**), al fine di valutare i principali set di discontinuità che intersecano l'ammasso roccioso, e di determinare le condizioni dell'ammasso. L'ammasso roccioso è stato caratterizzato utilizzando il sistema di classificazione GSI proposto da Hoek [7]. La metodologia di rilevamento e le schede elaborate sono riportate nell'Allegato 1.

Il rilievo RG-SG01 è stato eseguito su rocce della formazione del Bisciario (BIS) in corrispondenza dell'unico, minuscolo (1.5x1m), affioramento di roccia presente in sotterraneo presso la galleria di accesso al timpano della centrale San Giacomo II. Il rilievo RG-SG02 è stato realizzato invece sulle Marne con Cerrognia (Unità Geologica CCR) affioranti lungo l'alveo del rio San Giacomo, immediatamente a monte del ponte stradale.



Figura 5: Ubicazione stazioni di rilievo geomeccanico

In totale sono stati misurati e descritti 52 piani di discontinuità, 34 nelle marne con Cerrognna (CRR) e 18 nella formazione del Bisciario (BIS). Le discontinuità rilevate in ciascun rilievo possono essere raggruppate in 4 set di disgiunzione principali, che rappresentano il 90% delle misure per il Bisciario e il 73% per le marne con Cerrognna. Nelle **Tabella 1** e **Tabella 2** vengono riportate le caratteristiche degli affioramenti e i valori medi di orientazione, spaziatura e persistenza dei set riconosciuti, mentre la **Figura 6** rappresenta le orientazioni dei dati e delle famiglie principali su diagramma stereografico.

RG	X UTM- WGS84	Y UTM- WGS84	Z m.s.l.m	Ubicazione	Resistenza roccia	Alterazione
					(ISRM 1978)	(ISRM 1978)
RG-SG01	381410	4710473	420	Galleria di accesso al timpano della centrale	R2	W1
RG-SG02	381488	4712159	398	Alveo Rio San Giacomo	R2-R3	W1

Tabella 1: Riassunto delle caratteristiche principali dei rilievi geomeccanici

RG	S		K1		K2		K3	
	Imm (°)	Inclin (°)	Imm (°)	Inclin (°)	Imm (°)	Inclin (°)	Imm (°)	Inclin (°)
RG-SG01	281	19	273	66	121	81	75	81
RG-SG02	188-240	33-66	353	33	147	87	-	-

Tabella 2: Riassunto delle famiglie di giunti principali dei rilievi geomeccanici (Imm. Immersione; Incl: inclinazione)

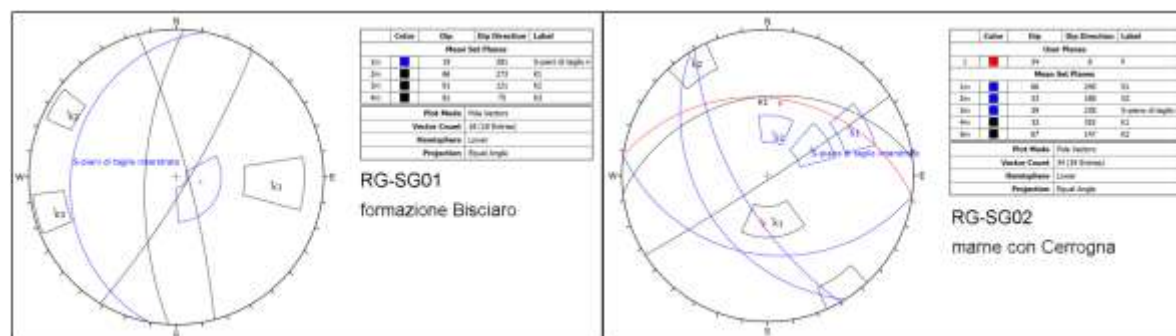


Figura 6: Stereogrammi delle misure registrate nei 2 rilievi geomeccanici e delle relative famiglie principali di discontinuità.

Per quanto concerne le caratteristiche di ammasso è stato applicato il criterio di Cai [6] per la definizione del Geological Strength Index di Hoek [7]. L'approccio prevede il calcolo del GSI in base a due parametri: il volume unitario di roccia delimitato dai set di fratturazione e il Joint Condition Factor (J_c) che definisce lo stato delle discontinuità.

Il J_c è un parametro definito da Cai [6] e comprende la combinazione di tre parametri:

$$J_c = \frac{J_w J_s}{J_A}$$

Dove J_w : rugosità alla scala metrica,

J_s : rugosità alla scala centimetrica (parametro J_r di Barton [2]),

J_A : alterazione dei giunti (parametro J_a di Barton [2]).

Le tabelle seguenti rappresentano i riferimenti tecnici dei suddetti parametri.

Waviness terms	Undulation	Rating for waviness J_w
Interlocking (large-scale)		3
Stepped		2.5
Large undulation	> 3%	2
Small to moderate undulation	0.3–3%	1.5
Planar	< 0.3%	1

Undulation = a/D
 D - length between maximum amplitudes

Tabella 3: Tabella di riferimento per la definizione della rugosità a scala metrica J_w da Cai [4].

Smoothness terms	Description	Rating for smoothness J_s
Very rough	Near vertical steps and ridges occur with interlocking effect on the joint surface	3
Rough	Some ridge and side-angle are evident; asperities are clearly visible; discontinuity surface feels very abrasive (rougher than sandpaper grade 30)	2
Slightly rough	Asperities on the discontinuity surfaces are distinguishable and can be felt (like sandpaper grade 30-300)	1.5
Smooth	Surface appear smooth and feels so to touch (smoother than sandpaper grade 300)	1
Polished	Visual evidence of polishing exists. This is often seen in coating of chlorite and specially talc	0.75
Slickensided	Polished and striated surface that results from sliding along a fault surface or other movement surface	0.6-1.5

Tabella 4: Tabella di riferimento per la definizione della rugosità a scala centimetrica J_s da Cai [4]

Term	Description	J_A	
Rock wall contact	<i>Clear joints</i>		
	Healed or "welded" joints (unweathered)	Softening, impermeable filling (quartz, epidote, etc.)	0.75
	Fresh rock walls (unweathered)	No coating or filling on joint surface, except for staining	1
	Alteration of joint wall: slightly to moderately weathered	The joint surface exhibits one class higher alteration than the rock	2
	Alteration of joint wall: highly weathered	The joint surface exhibits two classes higher alteration than the rock	4
	<i>Coating or thin filling</i>		
Filled joints with partial or no contact between the rock wall surfaces	Sand, silt, calcite, etc.	Coating of frictional material without clay	3
		Coating of softening and cohesive minerals	4
	Sand, silt, calcite, etc.	Filling of frictional material without clay	4
Filled joints with partial or no contact between the rock wall surfaces	Compacted clay materials	"Hard" filling of softening and cohesive materials	6
	Soft clay materials	Medium to low over-consolidation of filling	8
	Swelling clay materials	Filling material exhibits swelling properties	8-12

Tabella 5: Tabella di riferimento per la definizione della condizione di alterazione dei giunti J_a da Barton [1].

Il volume unitario V_b è stato valutato come media geometrica tra i valori massimi e minimi misurati. Il valore di GSI è stato dunque calcolato in modo quantitativo secondo la seguente formulazione:

$$GSI(V_b, J_c) = \frac{26.5 + 8.79 \ln J_c + 0.9 \ln V_b}{1 + 0.0151 \ln J_c - 0.0253 \ln V_b}$$

Dove V_b : volume unitario del blocco;

J_c : Fattore di condizione dei giunti.

I parametri di riferimento e la classe di ammasso definita in ciascun rilievo sono riportati in **Tabella 6** mentre la distribuzione delle classi di ammasso su grafico è rappresentata in **Figura 7**.

Rilievo n°	Volume blocchi			Parametri giunti				GSI
	min	Media geom.	max	J_w	J_s	J_a	J_c	
	(cm^3)			-	-	-	-	
RG-SG01	3.E+01	2.E+02	2.E+03	1	0.6	1	0.6	25
RG-SG02	3.E+03	3.E+04	3.E+05	1.5	1	1	1.5	45

Tabella 6: Riassunto delle caratteristiche di ammasso dai rilievi geomeccanici

3.3 Point load Test

Su campioni di roccia prelevati dagli affioramenti dei rilievi geomeccanici sono state eseguite un totale di 33 prove di Point Load test secondo lo standard ISRM. La prova consiste nella rottura dei campioni di roccia in una pressa tramite carico progressivo tra 2 punte standard; il rapporto tra il carico massimo e la superficie di rottura è direttamente proporzionale alla resistenza a compressione monoassiale della roccia. Le schede di prova vengono riportate in Allegato 2.

La **Tabella 7** illustra la statistica della resistenza a compressione in funzione della direzione di carico rispetto alla stratificazione dove quest'ultima era riconoscibile nel campione a mano. Per le Marne con Cerroghna risulta una resistenza media di 78.40 MPa per carico perpendicolare e di 49.90 Mpa per carico parallelo; mentre per il Bisciario, in cui non è stato possibile identificare l'andamento della stratificazione, il valore medio di resistenza a compressione è pari a 67.70 Mpa.

Unità	Orientazione rispetto alla stratificazione	Resistenza a compressione monoassiale (MPa)				
		N.	Min	Media	Max	Dev. St
Marne con Cerroghna	Perpendicolare	10	61.6	78.4	95.1	11.5
	Parallelo	7	21.9	49.9	70.6	18.1
Bisciario	-	8	23.6	67.7	105.2	28.3

Tabella 7: Statistica dei risultati delle prove di Point Load.

3.4 Indagini diga di Piaganini

Gli studi elaborati da Cesi per la verifica sismica della diga Piaganini [15][16], includono una serie di prove di laboratorio condotte sul calcestruzzo e sulla roccia di fondazione che è costituita dalla Marne con Cerroghna. I risultati delle indagini si ritengono pertanto rappresentativi per la caratterizzazione geomeccanica della roccia intatta e un utile riferimento per le condizioni generali degli ammassi rocciosi di questa formazione.

I risultati statistici delle prove di laboratorio eseguite su campioni di roccia vengono illustrati nei paragrafi seguenti.

3.4.1 Massa volumica reale/apparente

La massa volumica apparente e reale sono state misurate da campioni cilindrici ottenuti previa operazioni di taglio e rettifica meccanica, secondo la norma ASTM D845/92. I risultati statistici riportati in **Tabella 8** definiscono un valore di massa volumica apparente media di 26.00kN/m³ con variabilità compresa tra 25.28÷26.36kN/m³ e un valore di massa volumica reale paria a 26.56kN/m³ con variabilità compresa tra 26.46÷26.66kN/m³.

Peso di Volume apparente (kN/m ³)					
Litologia	N	Minimo	Media	Massimo	Deviazione Standard
Marne (CRR)	18	25.28	26.00	26.36	0.37
Peso di Volume reale (kN/m ³)					
Litologia	N	Minimo	Media	Massimo	Deviazione Standard
Marne (CRR)	5	26.46	26.56	26.66	0.10

Tabella 8: Risultati statistici delle misure del peso di volume apparente e reale.

3.4.2 Velocità sonica

La velocità di propagazione delle onde elastiche longitudinali è stata misurata attraverso un generatore di impulsi ultrasonici trasmessi a trasduttori piezoelettrici sulle facce del campione. La **Tabella 9** indica valori medi di velocità sonica pre-essiccamento pari a 5284 m/s, con variabilità compresa tra 4590-6480m/s e post essiccamento pari a 4979m/s, con variabilità compresa tra 3010-6410m/s.

Velocità sonica Vp pre-essiccamento (m/s)					
Litologia	N	Minimo	Media	Massimo	Deviazione Standard
Calcarei marnosi (CRR)	18	4590	5284	6480	542
Velocità sonica Vp post essiccamento (m/s)					
Litologia	N	Minimo	Media	Massimo	Deviazione Standard
Calcarei marnosi (CRR)	18	3010	4979	6410	772

Tabella 9: Risultati statistici delle misure delle velocità soniche.

3.4.3 Compressione Monoassiali

La resistenza a compressione monoassiale è stata misurata mediante pressa idraulica con misura delle deformazioni assiali e diametrali. Le prove sono state eseguite in controllo di carico con acquisizione diretta delle deformazioni. I risultati riassunti **Tabella 10** definiscono un valore medio di 101.7 MPa con variabilità compresa tra 60.8-145.1MPa.

Compressione monoassiale (MPa)					
Litologia	N	Minimo	Media	Massimo	Deviazione Standard
Calcarei marnosi (CRR)	6	60.8	101.7	33.6	0.17

Tabella 10: Risultati statistici delle misure della compressione monoassiale.

La misurazione delle deformazioni rilevate mediante “strain gauges” sui campioni testati a compressione monoassiale ha permesso di calcolare il modulo elastico. In **Tabella 11** viene riportata la statistica dei risultati da cui risulta un valore medio di 33.6GPa.

Modulo di elastico (GPa)					
Litologia	N	Minimo	Media	Massimo	Deviazione Standard
Calcarei marnosi (CRR)	6	21.9	33.6	52.0	10.2

Tabella 11: Risultati statistici delle misure del modulo E.

I dati relativi al coefficiente di Poisson vengono riassunti in **Tabella 12** e indicano un valore medio pari a 0.17.

Coefficiente di Poisson (-)					
Litologia	N	Minimo	Media	Massimo	Deviazione Standard
Calcarei marnosi (CRR)	6	0.13	0.17	0.21	0.03

Tabella 12: Risultati statistici delle misure del Coefficiente di Poisson.

3.5 Indagini diga di Polverina

Gli studi elaborati da Ground Engineering [18] per la verifica sismica della diga di Polverina, ubicata circa 70km a nord dell'area in esame, includono una serie di indagini geognostiche e prove di laboratorio condotte sulla medesima unità geologica (formazione Bisciario - BIS) presente in corrispondenza degli scavi delle centrali in caverna di San Giacomo. I risultati delle indagini si ritengono pertanto utili per la caratterizzazione geomeccanica della roccia intatta di BIS.

La **Tabella 13** riporta i valori medi delle prove di laboratorio eseguite sui campioni di roccia della formazione Bisciario. Non viene riportata la statistica dei risultati dato l'esiguo numero di campioni (2) utilizzati per ciascuna tipologia di prova.

	Massa Volumica Reale	Massa Volumica Apparente	Velocità soniche		Comp. Monoax	Modulo Young	Coeff Poisson
	MVA	MVR	Vp	Vs	σ_c	E	ν
Litologia	γ_n	γ_s	m/sec	m/sec	MPa	GPa	-
Calcari marnosi (BIS)	26.00	26.50	3000	1600	50.0	16.3	0.30

Tabella 13: valori medi delle prove eseguite sulla formazione Bisciario.

3.5.1 Massa volumica reale/apparente

La massa volumica apparente e reale sono state misurate da campioni cilindrici ottenuti previa operazioni di taglio e rettifica meccanica, secondo la norma ASTM D845/92. I valori medi ottenuti sono pari a 26.00 kN/m³ per la massa volumica apparente e a 26.50 kN/m³ per la massa volumica reale.

3.5.2 Velocità sonica

La velocità di propagazione delle onde elastiche longitudinali è stata misurata attraverso un generatore di impulsi ultrasonici trasmessi a trasduttori piezoelettrici sulle facce del campione. I valori medi ottenuti sono pari a 3000 m/s per le Vp e a 1600 m/s per le Vs.

3.5.3 Compressione Monoassiali

La resistenza a compressione monoassiale è stata misurata mediante pressa idraulica con misura delle deformazioni assiali e diametrali. Le prove sono state eseguite in controllo di carico con acquisizione diretta delle deformazioni. Il valore medio ottenuto da 2 prove è pari a 50 Mpa.

La misurazione delle deformazioni rilevate mediante “strain gauges” sui campioni testati a compressione monoassiale ha permesso di calcolare il modulo elastico pari a 16.3 GPa.

I dati relativi al coefficiente di Poisson indicano un valore medio pari a 0.30.

4. MODELLO GEOTECNICO

4.1 Centrale in caverna

Il modello geotecnico per il settore di intervento è stato definito a partire dal modello geologico illustrato nella relazione geologica (GRE.EEC.D.99.IT.H.17170.00.007) e tavole allegate. Per la caratterizzazione geotecnica si è fatto riferimento alle informazioni ottenute dai dati costruttivi della centrale S. Giacomo II e ai risultati delle prove di laboratorio condotte su campioni di Bisciara prelevati presso la diga di Polverina.

Si prevede che la porzione superiore e centrale della nuova centrale di San Giacomo III sia collocata all'interno dei calcari marnosi BIS, rimane tuttavia incerta la condizione della sua porzione inferiore in quanto non vi sono indagini o dati costruttivi che possano consentire una interpretazione geologica certa. Non si esclude infatti che nel settore inferiore della caverna si possa attraversare l'unità della Scaglia Cinerea posizionata stratigraficamente al di sotto di BIS.

La resistenza della roccia intatta di BIS è stimata in circa 50 Mpa (classi di resistenza ISRM R3), mentre il grado di alterazione è nullo o molto basso (classe ISRM W1-W2).

In questa fase di caratterizzazione preliminare l'ammasso roccioso noto interessato dallo scavo della centrale viene distinto in 3 unità geotecniche in base al livello di fratturazione indicato nei documenti costruttivi:

- UG1: ammasso roccioso poco fratturato (da discreto a buono),
- UG2: ammasso roccioso mediamente fratturato (mediocre),
- UG3: ammasso roccioso estremamente fratturato e laminato (scadente).

Per la definizione delle caratteristiche di resistenza e deformabilità degli ammassi si è deciso di associare ciascuna unità geotecnica a un campo di valori dell'indice GSI (Geological Strength index) di Hoek [7] [8] definito attraverso lo schema qualitativo proposto da Marinos [11] per ammassi rocciosi stratificati (**Figura 7**).

L'unità UG1 rappresenta ammassi Tipo da I a IV, con preponderanza di strati competenti, livello di fratturazione medio basso e buone condizioni dei giunti a cui corrisponde un valore di GSI variabile tra 45 e 65.

L'unità UG2 si riferisce ad ammassi Tipo VII e VIII, con percentuali di rocce poco e molto competenti in egual misura, deformati da pieghe e con condizioni delle discontinuità generalmente discrete. Tali condizioni corrispondono a valori di GSI compresi tra 30 e 45.

L'unità UG3 si riferisce ad ammassi Tipo X molto deformati e laminati dalle azioni tettoniche e con condizioni scadenti dei giunti. Il campo di variabilità del GSI per questa unità è stimato tra 15 e 30; ad essa si riferisce il rilievo geomeccanico RG-SG01.

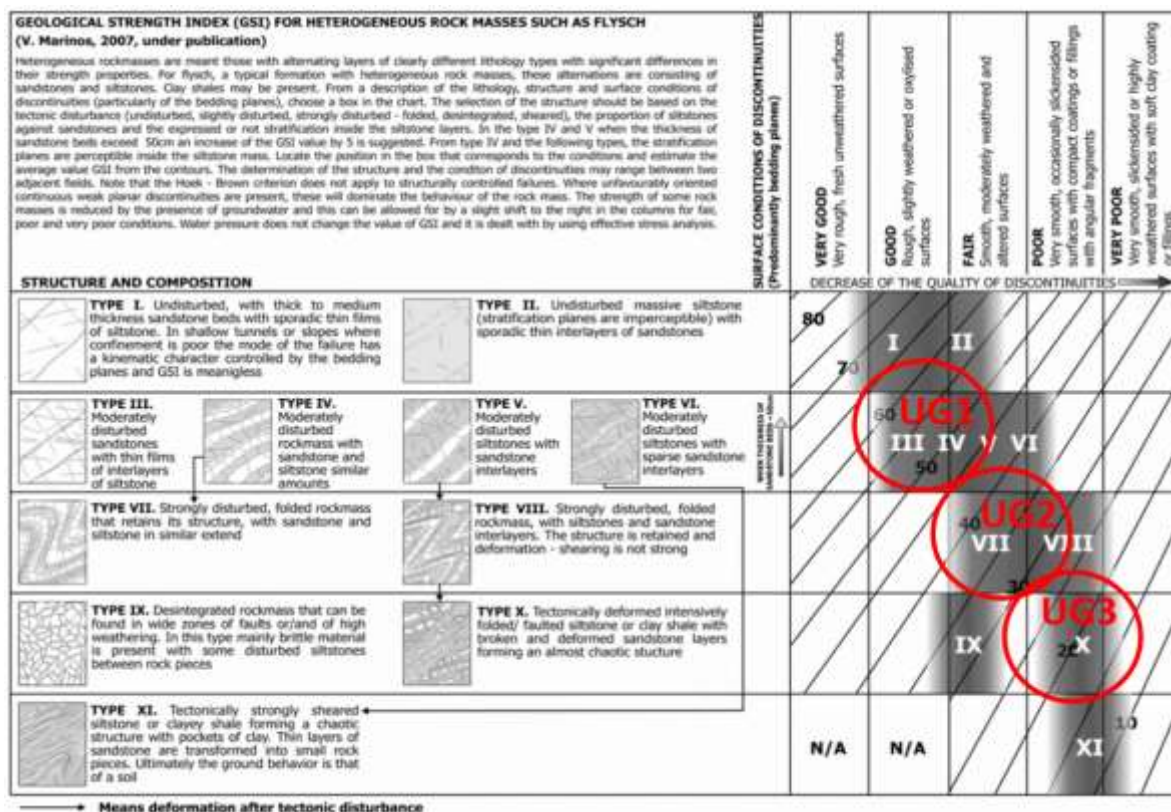


Figura 7: Distribuzione condizioni di riferimento per le unità geotecniche nel grafico GSI di Marinos [11].

4.1.1 Modello geotecnico 3D

In base ai dati disponibili è stato sviluppato tramite il software Leapfrog Works un modello geotecnico tridimensionale di estensione 250m in direzione E-O e 160m in direzione N-S. Il modello 3D può essere ruotato, sezionato, tagliato ed interrogato tramite apposito Viewer.

Il modello che si estende nel volume sotterraneo interessato dalle centrali esistenti e dalla nuova caverna contiene i seguenti elementi:

- Tavole con i rilievi costruttivi drappeggiate sulle pareti della centrale S. Giacomo II [19][20][21];
- Tavole con i rilievi costruttivi drappeggiate sulla parete del pozzo reversibile [22];
- Giaciture dei piani di stratificazione e giunti nei punti di rilievo;
- Giaciture dei piani di stratificazione e giunti estrapolate dai dati costruttivi di S. Giacomo II;
- Volumi rappresentativi le unità geotecniche;
- Opere esistenti;
- Opere in progetto.

Le tavole con i rilievi delle pareti e del pozzo della centrale S. Giacomo II sono state georeferenziate plano-altimetricamente (Figura 8) e utilizzate per definire i contatti tra le differenti unità geotecniche in base ai quali sono stati generati i relativi volumi (Figura 9, Figura 10). Il modello ricostruito copre interamente l'area della centrale S. Giacomo II e parte dell'area in cui verrà scavata la centrale S. Giacomo III.

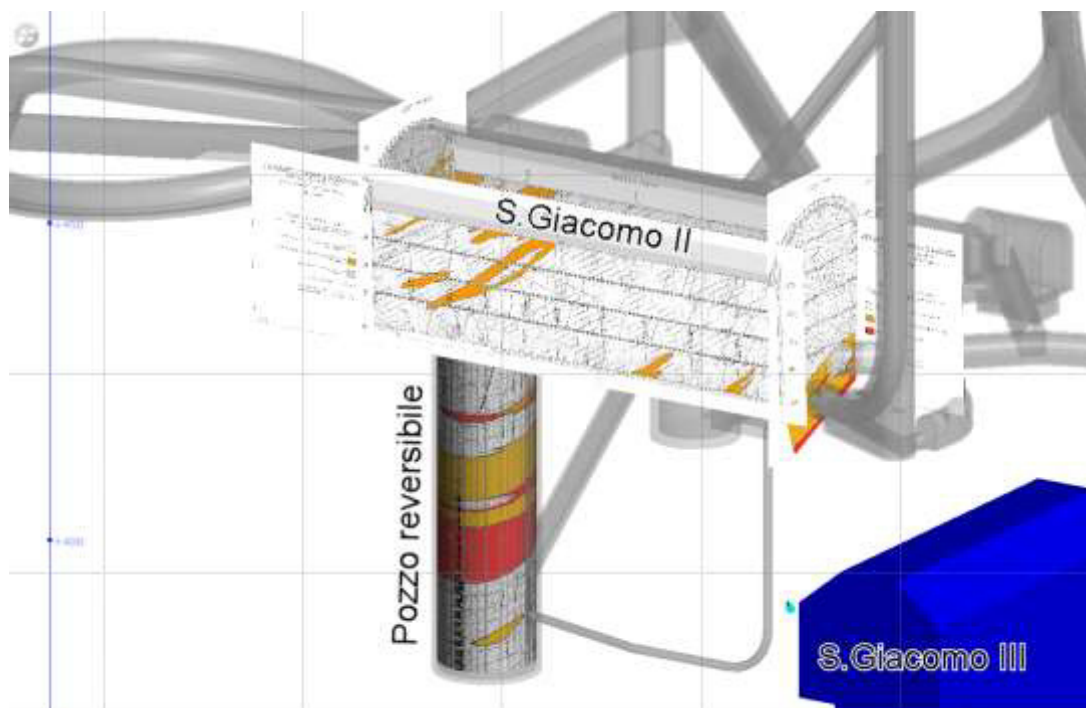


Figura 8: rilievi fronti di scavo georeferenziati in 3d (in blu la centrale S. Giacomo III)

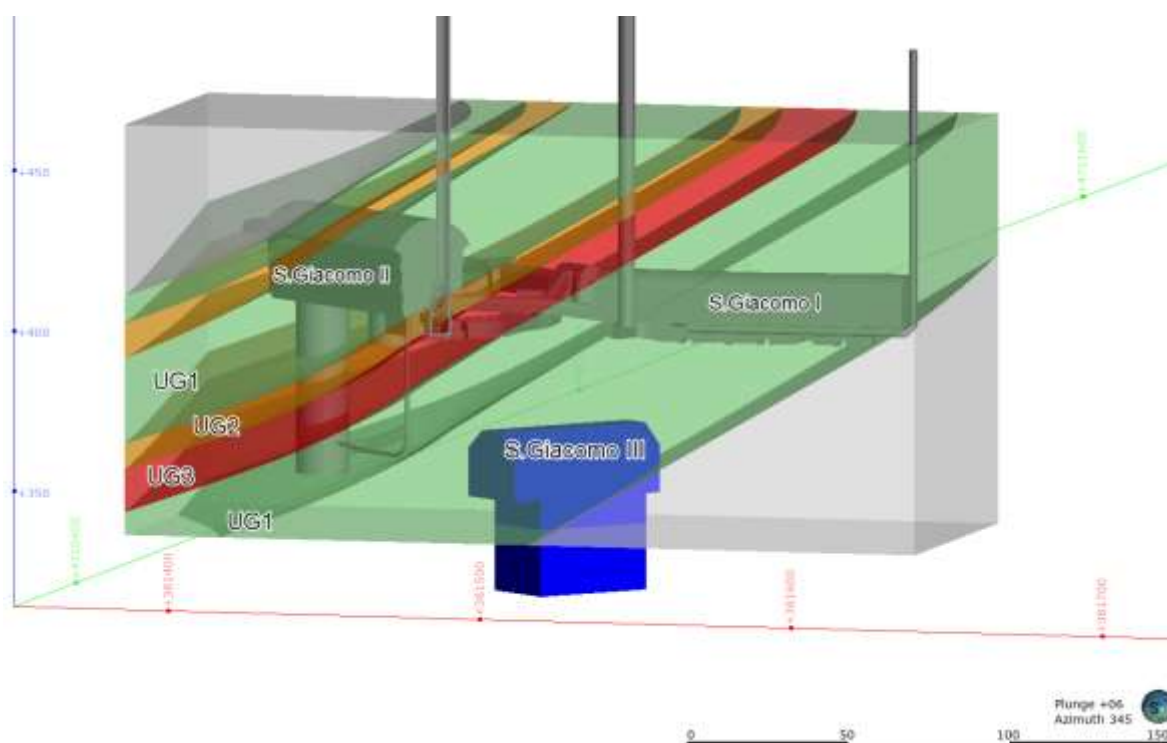


Figura 9: Vista da Sud del modello 3D con volumi delle classi di roccia identificate (in blu la centrale S. Giacomo III)

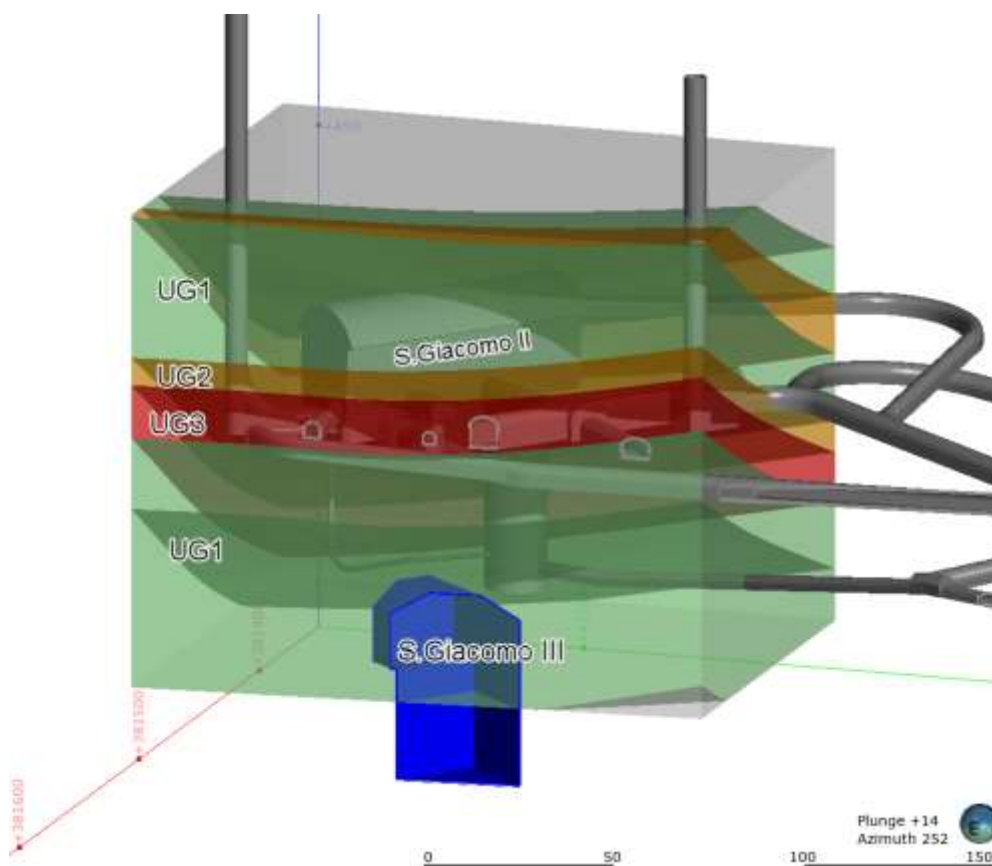


Figura 10: Vista da Est del modello 3D con volumi delle classi di roccia identificate (in blu la centrale S. Giacomo III)

Il modello geotecnico ottenuto viene illustrato per mezzo di sezioni longitudinali e trasversali alla caverna (**Figura 11**) nelle quali vengono anche rappresentate le orientazioni apparenti dei 4 principali sistemi di discontinuità identificati. La zona intensamente fratturata della UG3 viene rappresentata in rosso; essa lambisce lo spigolo sud della centrale S. Giacomo II e attraversa il pozzo reversibile mantenendosi a una distanza minima di 30 m dalla calotta della centrale S. Giacomo III. L'unità UG2 corrispondente ad ammassi mediocri, mediamente fratturati, viene mostrata in colore giallo mentre l'unità UG1 di ammassi da discreti a buoni è raffigurata con colore verde.

In base all'assetto strutturale si nota che l'area interessata dagli scavi della porzione superiore di San Giacomo III corrisponde alla medesima sequenza stratigrafica in cui è stata costruita negli anni 40' la centrale S. Giacomo I. Si ritiene logico ipotizzare che, nonostante non vi siano informazioni relative a quell'epoca, le condizioni di ammasso devono essere state generalmente da discrete a buone corrispondenti alla unità UG1. Per quanto riguarda la porzione inferiore della caverna in progetto non vi sono informazioni che permettano di valutarne le condizioni geotecniche.

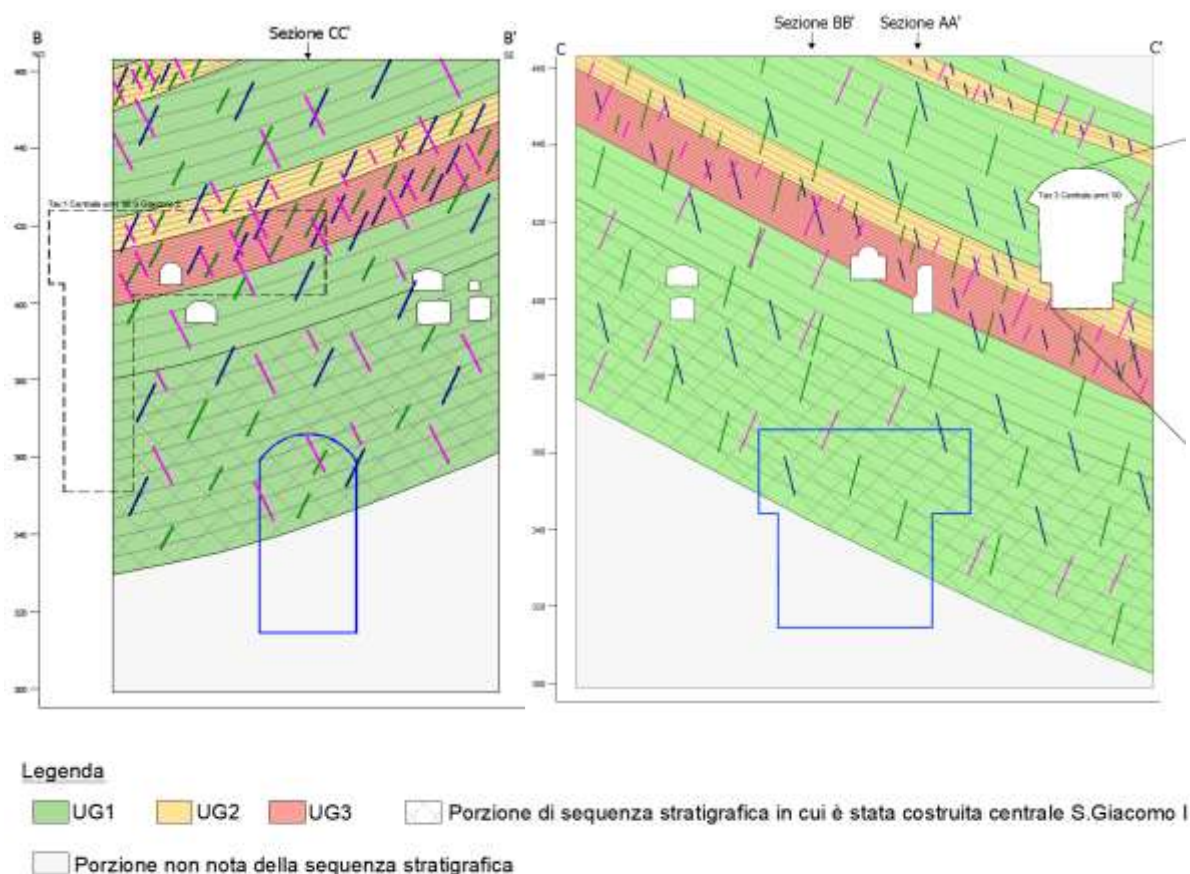


Figura 11: Sezione geologico-geotecnica trasversale e longitudinale

4.1.2 Assetto strutturale

L'assetto strutturale è determinato dalla stratificazione che risulta debolmente ondulata e da 3 famiglie di discontinuità principali (**Figura 12**) le cui caratteristiche sono sintetizzate di seguito e in **Tabella 14**:

- stratificazione: con orientazione media $253/27^\circ$, spaziatura da centimetrica a decimetrica, persistenza plurimetrica e leggermente ondulate.
- K1: orientazione media di $80/72^\circ$, spaziatura decimetrica e persistenza plurimetrica.
- K2: orientazione media di $14/77^\circ$ spaziatura decimetrica e persistenza plurimetrica.
- K3: orientazione media $249/79^\circ$ spaziatura decimetrica e persistenza plurimetrica.

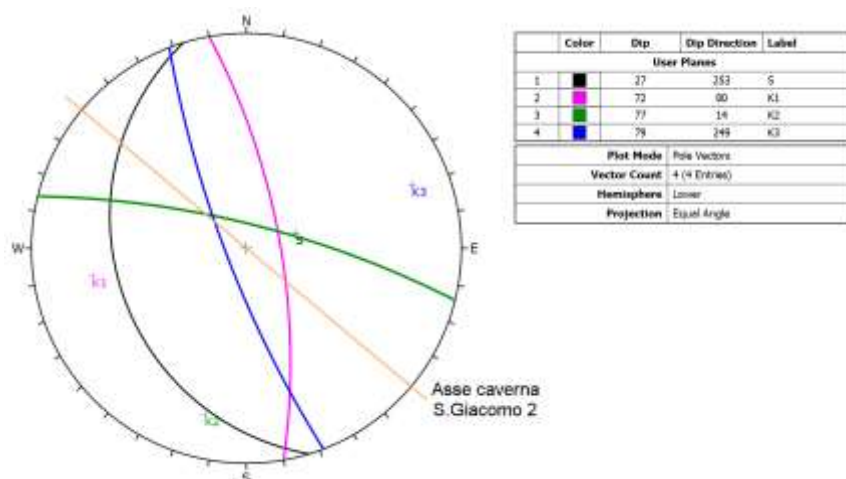


Figura 12: stereoplot delle famiglie di discontinuità della caverna S. Giacomo II ricostruite dai dati costruttivi.

Set	Orientazione		Persistenza	Spaziatura
	Immersione	Inclinazione		
Stratificazione	253	27	>10m	1-50
K1	80	72	1-10	20-150
K2	14	77	1-10	20-150
K3	249	79	1-10	20-150

Tabella 14: Sintesi delle caratteristiche delle principali famiglie di discontinuità incontrate

Le orientazioni medie sono state ricavate dalla ricostruzione tridimensionale dei disegni costruttivi della caverna di S. Giacomo II dove venivano riportate le tracce della stratificazione e dei giunti, inoltre la relazione [17] indicava le direzioni dei sistemi di fratture principali derivate da centinaia di misurazioni di strato e 205 misure di fratture. Il rilievo RG-SG01 (Figura 6) conferma l'assetto strutturale sopra descritto con stratificazione media immergente verso Ovest e tre set di giunti ad alto angolo.

5. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

La valutazione dei parametri di resistenza per le unità geotecniche è stata condotta considerando la legge empirica proposta da Hoek & Brown [8]:

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

dove: m_b , s ed a sono costanti che dipendono dalle caratteristiche dell'ammasso;

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

σ'_1 e σ'_3 sono la minima e massima tensione efficace agente sull'ammasso.

Le costanti sopra indicate possono essere ricavate da correlazioni dirette con il valore del Geological Strength Index [7] [8] e con il parametro m_i derivabile da prove di laboratorio o da correlazioni di letteratura.

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

$$s = \exp\left(\frac{GSI-100}{9-3D}\right)$$

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

Nella formulazione del 2002 [8] l'autore ha inserito un parametro D che dipende dal grado di disturbo, a cui è sottoposto l'ammasso roccioso in fase di scavo. Il fattore varia da 0 per scavi che lasciano l'ammasso in condizioni indisturbate fino a 1 per ammassi estremamente disturbati. Il fattore utilizzato per la determinazione dei parametri è pari a 0.

Il criterio di rottura dell'ammasso di Hoek-Brown si presenta nel piano σ - τ (sforzi normali/sforzi di taglio) come una funzione non lineare. Risulta quindi necessario, per ottenere i parametri c e ϕ secondo il criterio di Mohr-Coulomb, definire un campo tensionale di riferimento per il quale viene calcolata la retta che meglio interpola il tratto di curva analizzato. La centrale è posizionata a una profondità massima di 600 m, pertanto si è considerato a un campo di tensionale compreso tra 0 e 15 MPa.

Per quanto concerne il modulo elastico dell'ammasso (E_m) si è fatto riferimento alla formulazione proposta da Hoek [9]. E' stato calcolato il modulo elastico della roccia intatta (E_i) tramite correlazione con la resistenza compressione monoassiale (σ_{ci}) attraverso la seguente formula:

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

dove coefficiente MR (modulus ratio) viene determinato in funzione della litologia.

Il modulo dell'ammasso roccioso E_{rm} è stato quindi calcolato attraverso la formula:

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

L'analisi è stata effettuata utilizzando il software RocLab di Rocscience.

5.1 Parametri roccia intatta

I parametri di resistenza della roccia intatta derivano dalle prove di laboratorio illustrate nel capitolo 0, la cui sintesi viene riportata nella **Tabella 15**. Il parametro mi della roccia intatta è stato assunto pari a 10, valore intermedio tra quello previsto in letteratura per le marne (7) e i calcari (12).

UG1-2-3	Massa Volumica Apparente	Massa Volumica Reale	Compressione Monoassiale	MR	mi
	γ_{na}	γ_{nr}	σ_c		
	kN/m ³	kN/m ³	MPa		
Valore di riferimento	26	26.5	50	300	10

Tabella 15: Parametri geotecnici di riferimento della roccia intatta.

5.2 Parametri ammasso roccioso UG1

L'ammasso roccioso dell'unità UG1 si presenta da poco a mediamente fratturato; per la definizione dei parametri geotecnici di ammasso si considera un ammasso stratificato tipo III e IV della Classificazione di Marinos (**Figura 7**) corrispondente a un rapporto maggiore di 1 tra strati più competenti (calcari) e meno competenti (marne) e con condizioni dei giunti da discrete a buone. Il GSI di riferimento per la UG1 è pari a 55.

La **Tabella 16** illustra i parametri di resistenza e deformabilità ottenuti dalle correlazioni indicate nel precedente paragrafo, mentre la **Figura 13** illustra il criterio di rottura dell'ammasso nel piano sforzi normali – sforzi tangenziali secondo la formulazione di Hoek-Brown e la corrispondente interpolazione secondo il criterio di Mohr-Coulomb.

UG1	Parametro		U.M.	Parametro di riferimento
Ammasso roccioso	GSI		-	55
	Coesione	c	MPa	1.9
	Angolo di attrito	ϕ	°	36
	Modulo Ammasso	E_{rm}	GPa	6.0
	Coefficiente Poisson	ν	-	0.25
	Resistenza ammasso	σ_{rm}	MPa	4.0

Tabella 16: Parametri di resistenza e deformabilità dell'ammasso roccioso UG1.

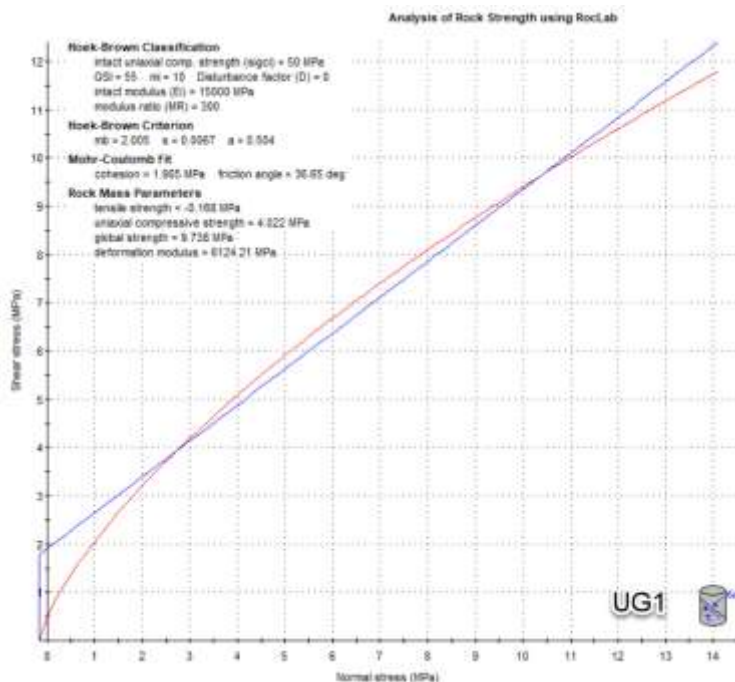


Figura 13: Criteri di rottura secondo Mohr-Coulomb (blu) e Hoek-Brown (rosso) per l'unità geotecnica UG1.

5.3 Parametri ammasso roccioso UG2

L'ammasso roccioso dell'unità UG2 si presenta da mediamente fratturato a molto fratturato; per la definizione dei parametri geotecnici di ammasso si considera un ammasso stratificato tipo VII e VIII della Classificazione di Marinou (Figura 7) corrispondente a un rapporto tra strati più competenti (calcarei) e meno competenti (marne) uguale o minore a 1 e presenza di deformazioni per piegamento. Le condizioni dei giunti sono da scadenti a discrete e il GSI di riferimento risulta pari a 35.

La Tabella 17 illustra i parametri di resistenza e deformabilità ottenuti dalle correlazioni indicate nel precedente paragrafo insieme al loro campo di variabilità, mentre la Figura 14 illustra il criterio di rottura dell'ammasso nel piano sforzi normali – sforzi tangenziali secondo la formulazione di Hoek-Brown e la corrispondente interpolazione secondo il criterio di Mohr-Coulomb.

UG2	Parametro		U.M.	Parametro di riferimento
Ammasso roccioso	GSI		-	35
	Coesione	c	MPa	1.3
	Angolo di attrito	ϕ	$^{\circ}$	31
	Modulo Ammasso	E_{rm}	GPa	1.7
	Coefficiente Poisson	ν	-	0.30
	Resistenza ammasso	σ_{rm}	MPa	1.2

Tabella 17: Parametri di resistenza e deformabilità dell'ammasso roccioso UG2.

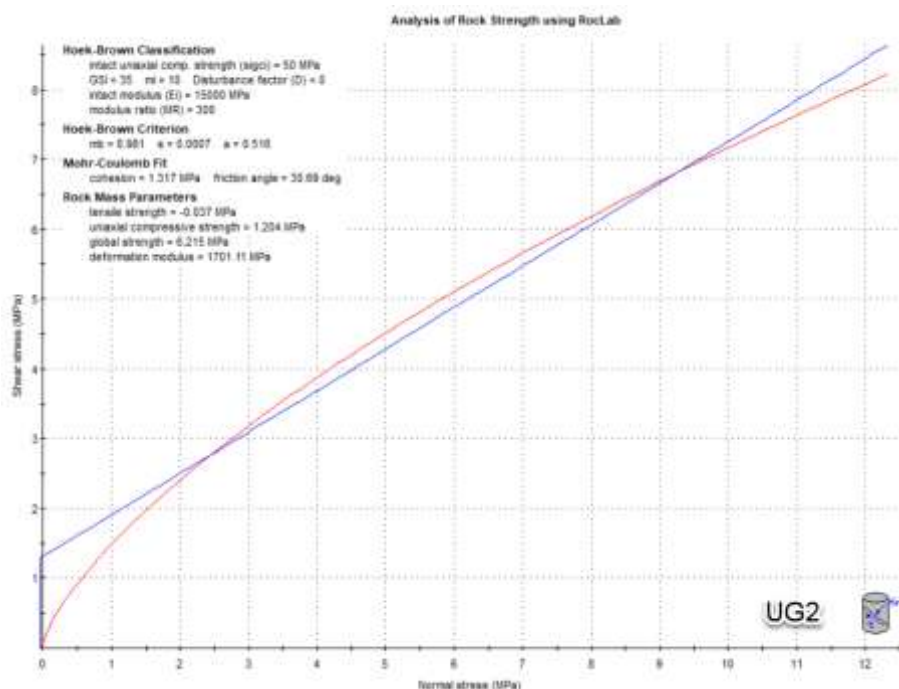


Figura 14: Criteri di rottura secondo Mohr-Coulomb (blu) e Hoek-Brown (rosso) per l'unità geotecnica UG2.

5.4 Parametri ammasso roccioso UG3

L'ammasso roccioso dell'unità UG3 si presenta da estremamente fratturato e laminato; per la definizione dei parametri geotecnici di ammasso si considera un ammasso stratificato tipo X della Classificazione di Marinot (**Figura 7**) corrispondente a intercalazioni caotiche di rocce a diversa competenza, intensamente deformate per azione tettonica. Le condizioni dei giunti sono da scadenti e il GSI di riferimento risulta pari a 20.

La **Tabella 18** illustra i parametri di resistenza e deformabilità ottenuti dalle correlazioni indicate nel precedente paragrafo insieme al loro campo di variabilità, mentre la **Figura 15** illustra il criterio di rottura dell'ammasso nel piano sforzi normali – sforzi tangenziali secondo la formulazione di Hoek-Brown e la corrispondente interpolazione secondo il criterio di Mohr-Coulomb.

UG3	Parametro		U.M.	Parametro di riferimento
Ammasso roccioso	GSI		-	20
	Coesione	c	MPa	0.9
	Angolo di attrito	ϕ	°	25
	Modulo Ammasso	E_{rm}	GPa	0.7
	Coefficiente Poisson	ν	-	0.35
	Resistenza ammasso	σ_{rm}	MPa	0.4

Tabella 18: Parametri di resistenza e deformabilità dell'ammasso roccioso UG3.

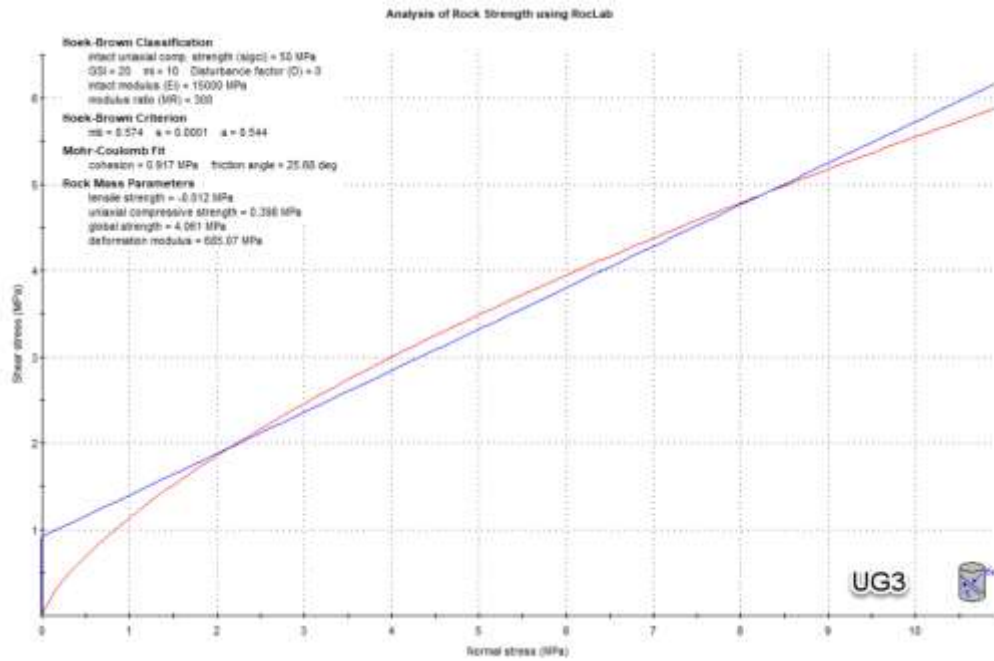


Figura 15: Criteri di rottura secondo Mohr-Coulomb (blu) e Hoek-Brown (rosso) per l'unità geotecnica UG3.

6. CONDIZIONI GEOTECNICHE DELLE OPERE

La porzione superiore e intermedia della centrale di San Giacomo III si svilupperà all'interno della Formazione del Bisciario, non si esclude comunque che nel settore inferiore della caverna si possa attraversare l'unità della Scaglia Cinerea posizionata stratigraficamente al di sotto di BIS.

Dal punto di vista geotecnico si prevede che la caverna venga scavata in gran parte nella unità geotecnica UG1 costituita da una roccia mediamente resistente e poco fratturata. Sebbene l'opera sia stata posizionata ad una distanza di almeno 30m da una zona di faglia estremamente fratturata e laminata (UG2 e UG3) già incontrata nello scavo del pozzo di San Giacomo II, l'incertezza relativa al modello geologico e geotecnico non permette di escludere l'esistenza in profondità di condizioni di roccia più fratturata rispetto alla UG1.

Lo scavo in sotterraneo potrà essere realizzato tramite tecnica convenzionale con esplosivo oppure con martello demolitore, come già fatto per la creazione della caverna di San Giacomo II. Va comunque considerato che la presenza dei cunicoli, caverne e pozzi già realizzati rende quantomai complessa la distribuzione degli stati tensionali naturali nell'area di intervento. Tale condizione comporta l'esistenza di zone di concentrazione delle tensioni che possono avere un impatto sul comportamento meccanico degli ammassi rocciosi e, in ultima analisi, sulla stabilità degli scavi da realizzare al loro interno.

Per quanto concerne le condizioni idrogeologiche, la bassa permeabilità degli ammassi rocciosi osservata durante la costruzione delle caverne esistenti fa prevedere che all'interno dei nuovi scavi le venute d'acqua potranno essere alquanto limitate. Inoltre, l'effetto di drenaggio indotto dalle opere esistenti ha depresso il livello naturale della falda fino a circa la quota minima del pozzo della centrale di San Giacomo II (480m) e pertanto anche le pressioni idrostatiche agenti sui rivestimenti definitivi saranno molto ridotte.

In ogni caso si ritiene fondamentale la realizzazione di una estesa campagna di indagini geognostiche che permetta di risolvere le incertezze tuttora presenti nel modello geologico e geotecnico e di identificare e gestire adeguatamente gli elementi di rischio ad esse connesse.

7. BIBLIOGRAFIA

7.1 Riferimenti tecnico scientifici

- [1] Barton, N (1976). The shear strength of rock and rock joints. *Int. J. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 13 (19), 1-24
- [2] Barton, N, Choubey v. (1976). The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice. *Rock Mechanics* 10, 1—54
- [3] Bernardelli. N, Fantoma. D. (1978) Tunnelers: un caso pratico ed alcune considerazioni teoriche – *Rivista geotecnica italiana*.
- [4] Bieniawski, Z.T. 1989. *Engineering rock mass classifications*. New York: Wiley.
- [5] Cai M., Kaiser P.K., Uno H., Tasaka Y., Minami M. (2004) Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 41 3–19
- [6] Cai M., Kaiser P.K., Uno H., Tasaka Y., Minami M. (2007) Determination of residual strength parameters of jointed rock masses using the GSI system. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 44, 247-265
- [7] Hoek, E., Marinos, P. and Benissi, M. 1998. Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation. *Bull. Engng. Geol. Env.* 57(2), 151-160.
- [8] Hoek E, Carranza-Torres CT, Corkum B. Hoek-Brown failure criterion-2002 edition. In: *Proceedings of the 5 th North American Rock Mechanics Symp., Toronto, Canada, 2002: 1: 267–73.*
- [9] Hoek E, Diederichs M.S.. Empirical estimation of rock mass modulus, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 43 (2006) 203–215
- [10] International Society of Rock Mechanics ISRM: Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses, *Int. J. Rock Mech. & Mm. Sci.*, vol.15, n.1 1978.
- [11] Marinos V. Tunnel behavior and support associated with the weak rock masses of flysch. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering* 6 (2014) 227-239

7.2 Norme tecniche applicabili

- [12] Norme Tecniche per le Costruzioni 2018, D.M. 17 gennaio 2018.

7.3 Documenti storici sull'opera

- [13] ENEL.HYDRO Hydroelectric power Plant San Giacomo sul Vomano - Repowering the existing hydroelectric power plant of the Vomano River. S.U. Engineering and Construction, Torino

- [14] Cassinelli F., Santini A (1993) Utilizzazione idroelettrica del Fiume Vomano. Quarry and Construction maggio 1993

7.4 Documenti forniti dalla Committenza


- [15] CESI (2018) Rapporto Diga di Piaganini - Comune di Fano Adriano (TE). Verifica sismica ai sensi della Nuova Normativa Dighe (DM 26/06/2014) Stato Limite di Danno (SLD)
- [16] ENEL (2007) Diga di Piaganini Indagini sul Calcestruzzo e nella Roccia di Fondazione Stralcio del Rapporto ISMES RAT – UCP – 026 del 23 novembre 1989
- [17] Faitelli G.M. (1995) – Ampliamento dell' Impianto di S.Giacomo. Relazione geologico-strutturale definitiva dopo l'esecuzione dei grandi scavi della centrale in caverna.
- [18] GROUND (2019) Relazione sulle indagini e prove geotecniche- Diga di Polverina sul fiume Chienti.
- [19] Impianto di S.Giacomo (ampliamento). Rilievo geologico strutturale scala 1:100. Tavola 1 Parete lato accesso.
- [20] Impianto di S.Giacomo (ampliamento). Rilievo geologico strutturale scala 1:100. Tavola 2 Parete fronte accesso.
- [21] Impianto di S.Giacomo (ampliamento). Rilievo geologico strutturale scala 1:100. Tavola 3 Parete Sud-Est e Parete Nord-Ovest.
- [22] Impianto di S.Giacomo (ampliamento). Scavi pozzo reversibile Rilievo geologico Strutturale. Tavola 4.

7.5 Documenti di progetto

- [23] GRE.EEC.D.99.IT.H.17170.00.007.00 Relazione Geologica
- [24] GRE.EEC.D.99.IT.H.17170.00.009.00 Carta geologico-geomorfologica generale
- [25] GRE.EEC.D.99.IT.H.17170.00.010.00 Sezioni geologiche trasversali della centrale
- [26] GRE.EEC.D.99.IT.H.17170.00.011.00 Sezione geologica longitudinale della centrale


ALLEGATO 1

Rilievi geomeccanici

	IMPIANTO Impianto di San Giacomo	CODICE CKS GRE.EEC.R.29.IT.H.51386.00.106.00
	TITOLO Progetto DILA	CODICE INTERNO 2021.0047.009-GT-PSP-RET-007
	<i>Relazione Geotecnica (Definitivo)</i>	Data 15/06/2022
	Allegato 1- Rilievi geomeccanici	Pagina 1 di 7

INDICE

1.	INTRODUZIONE	2
2.	BIBLIOGRAFIA	3
3.	RILIEVO GEOSTRUTTURALE	4
	3.1 Litologia	4
	3.2 Tipo di giunto e orientazione	4
4.	CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA	5

	IMPIANTO Impianto di San Giacomo	CODICE CKS GRE.EEC.R.29.IT.H.51386.00.106.00
	TITOLO Progetto DILA	CODICE INTERNO 2021.0047.009-GT-PSP-RET-007
	<i>Relazione Geotecnica (Definitivo)</i>	Data 15/06/2022
	Allegato 1- Rilievi geomeccanici	Pagina 2 di 7

1. INTRODUZIONE

Il presente allegato illustra il metodo di esecuzione dei rilievi geomeccanici realizzati nel mese di Gennaio 2022 nell'area di rilievo dell' impianto di San Giacomo.


I dati misurati sono stati processati per definire le caratteristiche delle famiglie di discontinuità e classificare i massicci rocciosi.

La strumentazione utilizzata nei rilievi è rappresentata da:

- Bussola da rilievo geostrutturale Cocla Breithaupt;
- Tablet GPS Active Tab2 Samsung;
- Materiali e schede da rilevamento geologico;
- Fotocamera digitale ad alta risoluzione Canon 6D Mark II (27Mpx).

Il procedimento di lavoro adottato consiste in:

- misurazioni in campo dei parametri geostrutturali (Capitolo 3);
- elaborazione statistica dei risultati e classificazioni geomeccanica dell'ammasso;
- compilazione delle schede di rilievo e dei documenti allegati.


	IMPIANTO Impianto di San Giacomo	CODICE CKS GRE.EEC.R.29.IT.H.51386.00.106.00
	TITOLO Progetto DILA	CODICE INTERNO 2021.0047.009-GT-PSP-RET-007
	<i>Relazione Geotecnica (Definitivo)</i>	Data 15/06/2022
	Allegato 1- Rilievi geomeccanici	Pagina 3 di 7

2. BIBLIOGRAFIA

Lo studio è stato condotto in base ai criteri generali stabiliti dalle norme e dai lavori pubblicati.

Gli standard e le normative di riferimento considerate sono le seguenti:

- [1] Barton N. (2011). Müller Lecture "From empiricism, through theory, to problem solving in rock engineering". 12th Congress of the ISRM. Beijing, China.
- [2] BIENIAWSKY Z. T., 1989. Engineering Rock Mass Classifications. New York: John Wiley and sons.
- [3] CAI M. et al, 2004. Estimation of rock mass deformation modulus and strength of jointed hard rock masses using the GSI system. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 41 3-19.
- [4] CAI M. et al, 2007. Determination of residual strength parameters of jointed rock masses using the GSI system. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 44 (2), 247-265.
- [5] HOEK E., Rock Engineering course notes. Public on www.rockscience.com, 1998-2012.
- [6] HOEK E., CARRANZA TORRES C. y CORKUM B., 2002. Hoek-Brown failure criterion – 2002 Edition. Proc. NARMS-TAC Conference, Toronto, 2002, 1, 267-273.
- [7] ISRM, 1978. Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses, Int. J. Rock Mech. & Mm. Sci., vol.15.
- [8] ISRM: Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses, Int. J. Rock Mech. & Mm. Sci., vol.15, n.l 1978.
- [9] ISRM: Basic Geotechnical Description of Rock Masses. Int. J. Rock Mech. & Mm. Sci., vol.18, n.l, 1981.
- [10] PALMSTROM A., Measurements of and correlations between block size and RQD. Tunnels and underground Space Technology, 2005.

	IMPIANTO Impianto di San Giacomo	CODICE CKS GRE.EEC.R.29.IT.H.51386.00.106.00
	TITOLO Progetto DILA	CODICE INTERNO 2021.0047.009-GT-PSP-RET-007
	<i>Relazione Geotecnica (Definitivo)</i>	Data 15/06/2022
	Allegato 1- Rilievi geomeccanici	Pagina 4 di 7

3. RILIEVO GEOSTRUTTURALE

Nei paragrafi seguenti vengono descritti in dettaglio tutti i parametri geostrukturali misurati in campo.

3.1 Litologia


I massicci rocciosi analizzati sono rappresentati da marne e calcareniti delle marne con Cerroigna (CRR) e da calcari marnosi e marne calcaree della formazione del Bisciario (BIS).

3.2 Tipo di giunto e orientazione

I valori di orientazione sono stati misurati per ciascun piano di discontinuità, mediante la bussola geostrukturale e app per tablet. I piani sono stati classificati in stratificazione (S) e giunti (K). La registrazione dei valori è stata condotta secondo lo standard Dip direction/Dip.



Figura 1: Esempio di misura delle discontinuità con app per tablet.

	IMPIANTO Impianto di San Giacomo	CODICE CKS GRE.EEC.R.29.IT.H.51386.00.106.00	
	TITOLO Progetto DILA	CODICE INTERNO 2021.0047.009-GT-PSP-RET-007	
	<i>Relazione Geotecnica (Definitivo)</i>	Data 15/06/2022	
	Allegato 1- Rilievi geomeccanici	Pagina 5 di 7	

4. CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA

Gli ammassi rocciosi rilevati sono stati classificati secondo l'indice GSI (Geological Strength Index) proposto da Hoek et al. [5] attraverso l'approccio elaborato da Cai et al. [4] che prevede una valutazione quantitativa dell'indice a partire dai seguenti parametri:

- V_b : si riferisce al volume dei blocchi espresso in cm^3 e rappresenta l'espressione diretta delle spaziature delle discontinuità sull'ammasso. Un valore minimo, uno massimo e una media geometrica sono stati valutati per ogni rilievo
- J_c : rappresenta il "Joint Condition Factor" che Cai [4] definisce attraverso la seguente formula:

$$J_c = \frac{J_w J_s}{J_A}$$

dove J_w è la rugosità alla grande scala, J_s la rugosità alla piccola scala e J_A la alterazione dei giunti per i quali è stato considerato un valore rappresentativo dell'interno ammasso.


Il valore dell'indice GSI viene calcolato in base alla seguente espressione:

$$GSI(V_b, J_c) = \frac{26.5 + 8.79 \ln J_c + 0.9 \ln V_b}{1 + 0.0151 \ln J_c - 0.0253 \ln V_b}$$

I risultati statistici sono riassunti nella **Tabella 1** mentre in **Figura 2** vengono illustrati sul grafico di riferimento proposto dall'autore. In allegato vengono elencate le schede dei dati.

Stazione	Lito	V_b medio (cm^3)	J_c	GSI
RG-SG01	BIS	22	0.5	25
RG-SG02	CRR	3000	1.5	45

Tabella 1: Risultati di classificazione geomeccanica.

	IMPIANTO Impianto di San Giacomo	CODICE CKS GRE.EEC.R.29.IT.H.51386.00.106.00
	TITOLO Progetto DILA	CODICE INTERNO 2021.0047.009-GT-PSP-RET-007
	<i>Relazione Geotecnica (Definitivo)</i>	Data 15/06/2022
	Allegato 1- Rilievi geomeccanici	Pagina 6 di 7

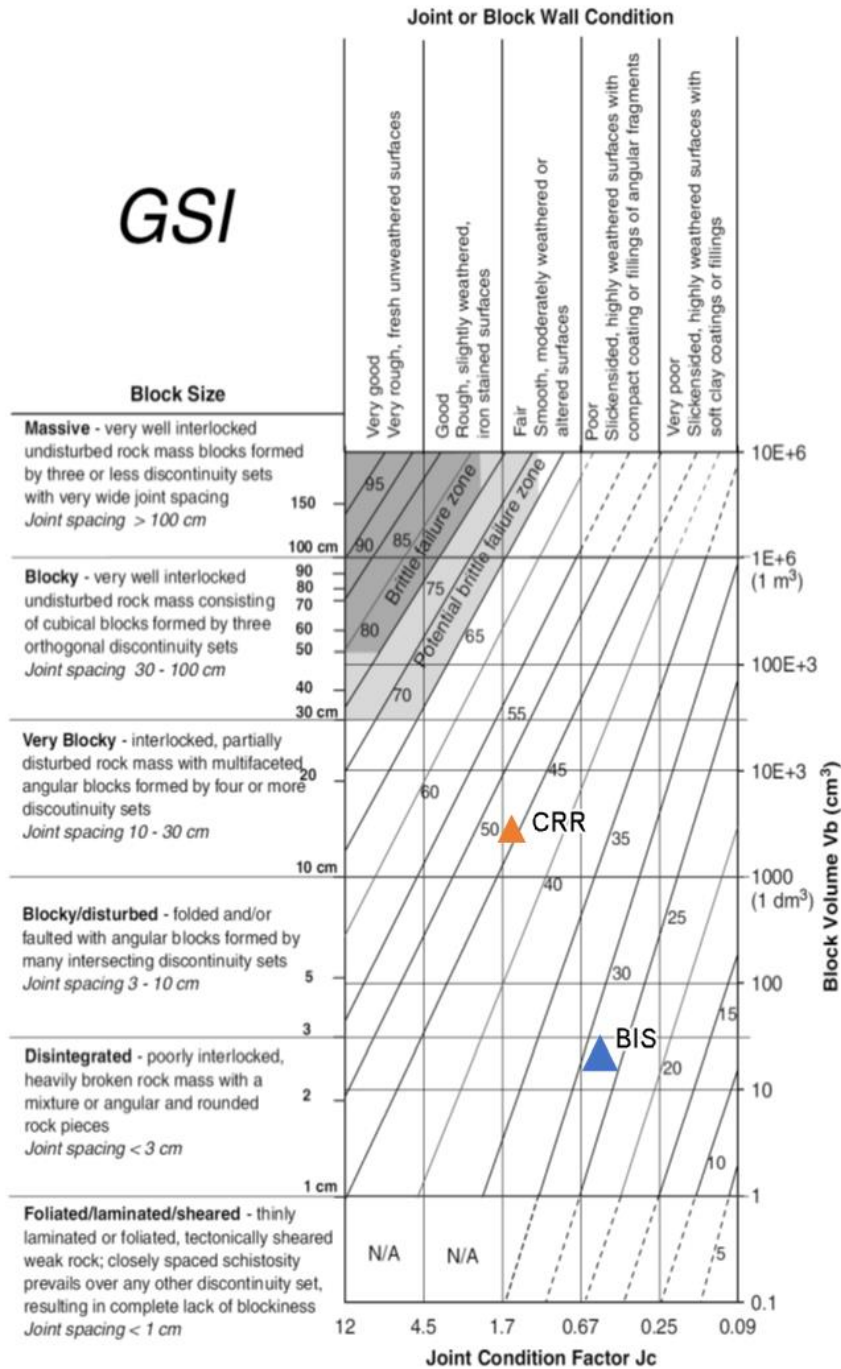



Figura 2: Grafico di GSI da Cai [4] con rappresentazione delle stazioni di rilievo geomeccanico condotte.

	IMPIANTO Impianto di San Giacomo	CODICE CKS GRE.EEC.R.29.IT.H.51386.00.106.00
	TITOLO Progetto DILA	CODICE INTERNO 2021.0047.009-GT-PSP-RET-007
	<i>Relazione Geotecnica (Definitivo)</i>	Data 15/06/2022
	Allegato 1- Rilievi geomeccanici	Pagina 7 di 7

DATI DI RILIEVO

RILIEVO GEOMECCANICO N°RG-SG01

Ubicazione area di rilievo

Committente	ENEL			
Commessa	co02-22			
Località	Impianto idroelettrico San Giacomo al Vomano			
Coordinate	UTM-WGS84	X: 381410	Y: 4710473	Quota: 420 m slm
Data	28/01/2022			
Area di rilievo geomeccanico	Timpano esterno centrale nuova dell'impianto idroelettrico San Giacomo			

Stralcio planimetrico



RILIEVO GEOMECCANICO N°RG-SG01
Scheda di sintesi

Committente	ENEL			
Commessa	co02-22			
Località	Impianto idroelettrico San Giacomo al Vomano			
Coordinate	UTM-WGS84	x: 381410	Y: 4710473	Quota: 420 m slm
Data	28/01/2022			
Area di rilievo geomeccanico	Timpano esterno centrale nuova dell'impianto idroelettrico San Giacomo			

Condizioni generali dell'ammasso roccioso					
Giacitura del fronte di misura	[°/°]			000/70°	
Giacitura generale del pendio	[°/°]			000/40°	
Dimensioni dell'area di rilievo geomeccanico	[m x m]			10x3	
Volume roccioso unitario medio	[minimo]	[cm x cm x cm]		2x1x1	
	[massimo]	[cm x cm x cm]		4x8x8	
	[forma]	[-]		parallelepipedo	
Numero di discontinuità per metro cubo d'ammasso - J_v	[n°/m ³]			15-30	
Grado di alterazione dell'ammasso (ISRM, 1978)	non alterato	debolm. alterato	moder. alterato	molto alterato	decomposto
	x	x			
Condizioni di umidità dell'ammasso	asciutto	umido	bagnato	stillicidio	flusso
	x				

Classificazione geomeccanica											
Struttura in ammassi complessi	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
										x	
Condizioni delle discontinuità				VG	G	F	P	VP			
							x			GSI	25

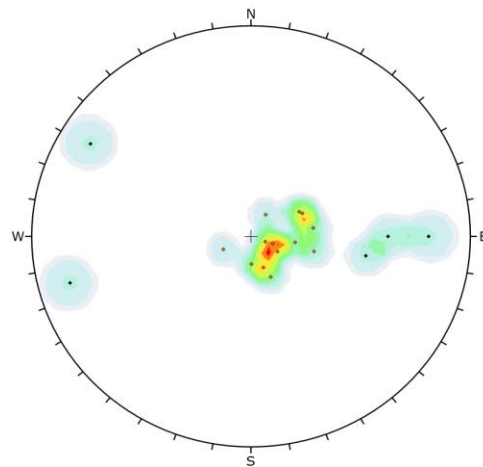


Litologia e descrizione geologica generale

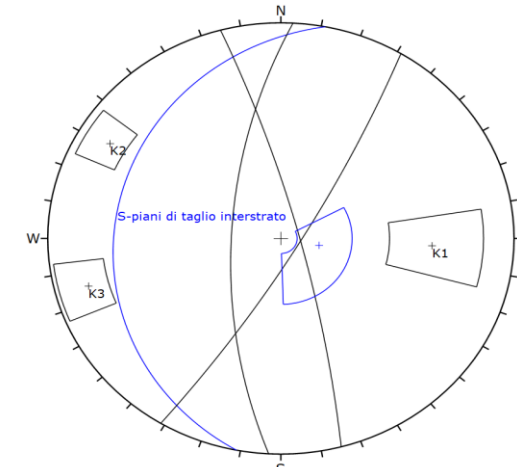
Marne e argilliti verdastre, sottilmente laminate e deformate, visibili strutture da shear intrastrato e specchi di faglia con gradini in calcite.
 Resistenza dell'ammasso ISRM = R2.
 Alterazione ISRM = W1.
 A livello strutturale si identificano 4 set di discontinuità, i giunti si presentano da leggermente a moderatamente alterati, lisci, levigati e planari.

Famiglie di giunti

set	giacitura [°/°]
S-piani di taglio	281/19
K1	273/66
K2	121/81
K3	75/81



Symbol	TIPO	Quantity
•	K	5
*	Piani di taglio interstrato	13
Plot Mode Pole Vectors		
Vector Count 18 (18 Entries)		
Hemisphere Lower		
Projection Equal Angle		



Color	Dip	Dip Direction	Label
Mean Set Planes			
1m	19	281	S-piani di taglio ir
2m	66	273	K1
3m	81	121	K2
4m	81	75	K3
Plot Mode Pole Vectors			
Vector Count 18 (18 Entries)			
Hemisphere Lower			
Projection Equal Angle			

RILIEVO GEOMECCANICO N°RG-SG02

Ubicazione area di rilievo

Committente	ENEL
Commessa	co02-22
Località	Impianto idroelettrico San Giacomo al Vomano
Coordinate	UTM-WGS84 X: 381488 Y: 4712149 Quota: 398 m slm
Data	27/01/2022
Area di rilievo geomeccanico	In sinistra idrografica del torrente San Giacomo, nei pressi dell'imbocco della galleria di scarico a pelo libero della nuova centrale di S. Giacomo.

Stralcio planimetrico



RILIEVO GEOMECCANICO N°RG-SG02
Scheda di sintesi

Committente	ENEL		
Commessa	co02-22		
Località	Impianto idroelettrico San Giacomo al Vomano		
Coordinate	UTM-WGS84	x: 381488	Y: 4712149 Quota: 398 m slm
Data	27/01/2022		
Area di rilievo geomeccanico	In sinistra idrografica del torrente San Giacomo, nei pressi dell'imbocco della galleria di scarico a pelo libero della nuova centrale di S. Giacomo.		

Condizioni generali dell'ammasso roccioso				
Giacitura del fronte di misura	[°/°]			000/70°
Giacitura generale del pendio	[°/°]			000/40°
Dimensioni dell'area di rilievo geomeccanico	[m x m]			10x3
Volume roccioso unitario medio	[minimo]	[cm x cm x cm]		3x6x6
	[massimo]	[cm x cm x cm]		30x50x50
	[forma]	[-]		parallelepipedo
Numero di discontinuità per metro cubo d'ammasso - J_v		[n°/m ³]		5-15
Grado di alterazione dell'ammasso (ISRM, 1978)	non alterato	debolm. alterato	moder. alterato	molto alterato
	x	x		
Condizioni di umidità dell'ammasso	asciutto	umido	bagnato	stillicidio
	x			

Classificazione geomeccanica											
Struttura in ammassi complessi	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI
			x								
Condizioni delle discontinuità				VG	G	F	P	VP			
						x			GS1		45

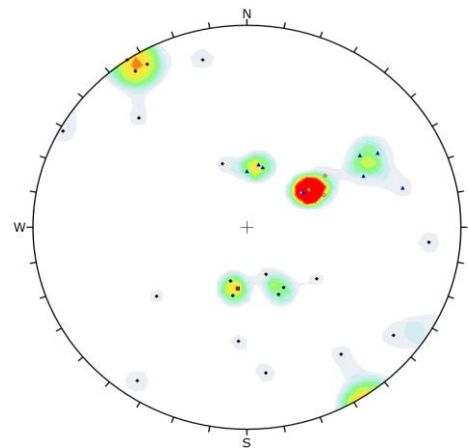


Litologia e descrizione geologica generale

Alternanza di livelli calcarei con spessore variabile tra i 30 e i 100 cm e livelli marnoso argillosi con spessore variabile tra 5 e 30 cm, in rapporto 4:1.
 Resistenza dell'ammasso ISRM calcari = R3 marne/argilliti = R2
 Alterazione ISRM = W1.
 A livello strutturale si identifica una piega con piano assiale immergente a basso angolo verso sud, S1 e S2 rappresentano i due fianchi della piega.
 All'interno dei livelli fini sono visibili piani di taglio intrestrato.
 Le discontinuità si presentano leggermente alterate, lisce, levigate e planari.
 E' stata inoltre identificata una faglia immergente a basso angolo verso Nord.

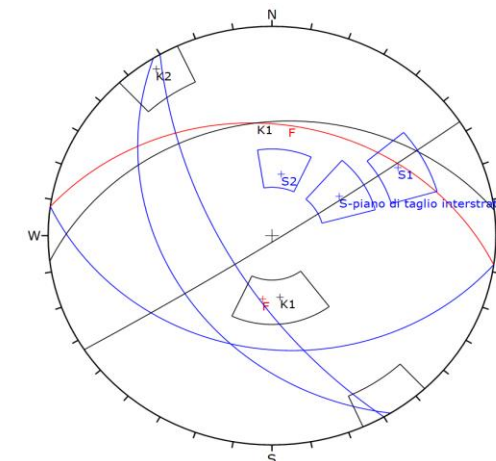
Famiglie di giunti

set	giacitura [°/°]
S	240/66
S	188/33
K1	353/33
K2	147/87



Symbol	TIPO	Quantity
•	F	1
•	K	20
•	Plani di taglio intrestrato	5
•	S	8

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	34 (34 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle




Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
1	34	8	F
Mean Set Planes			
1m	66	240	S1
2m	33	188	S2
3m	39	238	S-piano di taglio i
4m	33	353	K1
5m	87	147	K2

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	34 (34 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle


ALLEGATO 2

Point Load Test

	IMPIANTO Impianto di San Giacomo	CODICE CKS GRE.EEC.R.29.IT.H.51386.00.106.00
	TITOLO Progetto DILA	CODICE INTERNO 2021.0047.00-GT-PSP-RET-007
	<i>Relazione Geotecnica (Definitivo)</i>	Data 16/05/2022
	Allegato 2-Point Load Test	Pagina 1 di 7

INDICE

1. INTRODUZIONE	2
2. BIBLIOGRAFIA	3
3. PROCEDURA DI ESECUZIONE	4
4. RISULTATI	6

	IMPIANTO Impianto di San Giacomo	CODICE CKS GRE.EEC.R.29.IT.H.51386.00.106.00
	TITOLO Progetto DILA	CODICE INTERNO 2021.0047.00-GT-PSP-RET-007
	<i>Relazione Geotecnica (Definitivo)</i>	Data 16/05/2022
	Allegato 2-Point Load Test	Pagina 2 di 7


1. INTRODUZIONE

Il presente allegato illustra il metodo di esecuzione delle prove di carico puntuali (Point load test) realizzate per la caratterizzazione geotecnica della Centrale San Giacomo nel Comune di Pietracamela (TE).

Le prove sono state effettuate su campioni di roccia irregolari prelevati da due stazioni geomeccaniche nell'area di studio al fine di determinare il valore di resistenza della roccia intatta.




Figura 1: esempio di esecuzione di una prova mediante apparato di Point-Load.

	IMPIANTO Impianto di San Giacomo	CODICE CKS GRE.EEC.R.29.IT.H.51386.00.106.00
	TITOLO Progetto DILA	CODICE INTERNO 2021.0047.00-GT-PSP-RET-007
	<i>Relazione Geotecnica (Definitivo)</i>	Data 16/05/2022
	Allegato 2-Point Load Test	Pagina 3 di 7

2. BIBLIOGRAFIA

Le prove sono state condotte secondo i criteri generali stabiliti dalle norme per i lavori pubblicati, in particolare dai seguenti sta standard di riferimento:

- [1] International Journal Rock Mechanics and Mining Science: Suggested methods for determining Point Load Strength; 1985, Vol. 22, N.2 pp51-60.
- [2] The Point Load Test, E. Broch and J. A. Franklin (International Journal Rock Mech. and Mining Science Vol. 9, pp 669-697, 1972).

	IMPIANTO Impianto di San Giacomo	CODICE CKS GRE.EEC.R.29.IT.H.51386.00.106.00
	TITOLO Progetto DILA	CODICE INTERNO 2021.0047.00-GT-PSP-RET-007
	<i>Relazione Geotecnica (Definitivo)</i>	Data 16/05/2022
	Allegato 2-Point Load Test	Pagina 4 di 7

3. PROCEDURA DI ESECUZIONE

Le prove di carico puntuale sono state effettuate per determinare le caratteristiche di resistenza alla compressione della roccia intatta.

Il lavoro è stato eseguito utilizzando una macchina di carico puntuale, modello 45-D0550/D prodotto da Controls S.r.l., calibrato nel laboratorio Controls di Milano (Italia) nel Marzo 2022. **Errore. L'origine r iferimento non è stata trovata..**

I campioni di roccia sono stati prelevati dagli affioramenti dei rilievi geostrutturali RG-VC01 e RG-VC02, per un totale di 21 test su rocce di forma e dimensioni il più possibile regolari.

Ogni campione è stato posto tra le punte di carico dell'apparecchiatura e caricato gradualmente fino alla rottura per la quale sono stati misurati la forza massima applicata alla rottura (P), la distanza delle punte alla rottura (D) e la larghezza media della superficie di rottura (W).

Le dimensioni a rottura sono state utilizzate anche per accertare la validità della prova secondo le specifiche tecniche indicate dai seguenti rapporti:

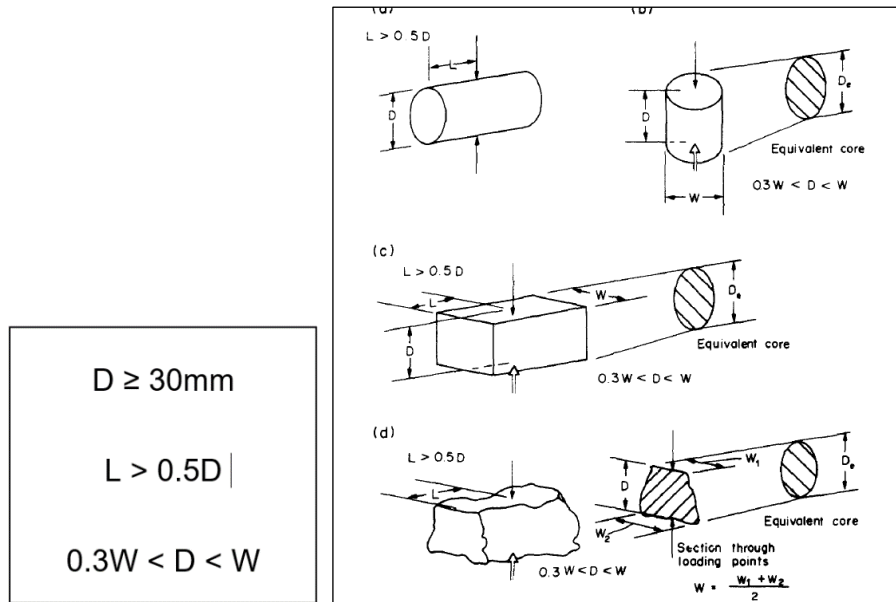



Figura 2: Vincoli geometrici per i campioni da sottoporre a prove di Point Load [1].

	IMPIANTO Impianto di San Giacomo	CODICE CKS GRE.EEC.R.29.IT.H.51386.00.106.00
	TITOLO Progetto DILA	CODICE INTERNO 2021.0047.00-GT-PSP-RET-007
	<i>Relazione Geotecnica (Definitivo)</i>	Data 16/05/2022
	Allegato 2-Point Load Test	Pagina 5 di 7

Per l'elaborazione dei dati, è stato utilizzato un foglio di calcolo appositamente predisposto per determinare automaticamente il Point Load Index I_{s50} e la compressione monoassiale UCS.

La procedura di calcolo adottata è la seguente: dai valori di D e W misurati sul campione dopo la rottura è stato calcolato il diametro equivalente D_e mediante la formula:

$$D_e = \sqrt{\frac{4 \cdot D \cdot W}{\pi}} \quad (\text{mm}) \text{ per blocchi irregolari}$$

L'indice di point load non corretto è stato definito tramite la formula:

$$I_s = 1000 \cdot \frac{P}{D_e^2} \quad (\text{MPa})$$

Mentre l'indice corretto di point load riferito ad un diametro standard di 50mm è determinato tramite la formula:


$$I_{s(50)} = I_s \cdot \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0.45} \quad (\text{MPa})$$

Il valore di resistenza a compressione monoassiale (σ_c) viene infine definito dalla relazione proposta da Franklin (1972)[2]:

$$UCS = I_{s(50)} \cdot 24 \quad (\text{MPa})$$

Inoltre, come da norma ISRM [1], sono state eseguite prove sia con carico parallelo che con carico perpendicolare alla discontinuità principale rappresentata dai piani di stratificazione S e calcolato l'indice di anisotropia (I_a) come di seguito:

$$I_a = \frac{I_{s(50)perpendicolare}}{I_{s(50)parallelo}}$$

	IMPIANTO Impianto di San Giacomo	CODICE CKS GRE.EEC.R.29.IT.H.51386.00.106.00
	TITOLO Progetto DILA	CODICE INTERNO 2021.0047.00-GT-PSP-RET-007
	<i>Relazione Geotecnica (Definitivo)</i>	Data 16/05/2022
	Allegato 2-Point Load Test	Pagina 6 di 7

4. RISULTATI


Per ciascun senso di applicazione del carico è stato condotto un calcolo statistico completo del valore di compressione semplice UCS (minimo, medio, massimo e deviazione standard), avendo cura di escludere i due valori minimi e due massimi come indicato dallo standard ISRM 1985 [1].

La seguente tabella riporta i risultati statistici calcolati :

Rilievo	Orientazione test	N.	UCS (MPa)			
			Min	Media	Max	Dev. St
RG-SG01	-	8	23.60	67.70	105.17	28.27
RG-SG02	Perpendicolare	10	61.64	78.4	95.10	11.51
	Parallelo	7	21.92	49.90	70.61	18.14

Tabella 1: Risultati statistici delle prove di Point Load. Come da normativa ISRM, i due valori minori e maggiori per ciascun dataset non sono stati considerati.

A continuazione si riporta la scheda completa di tutti i risultati.

	IMPIANTO Impianto di San Giacomo	CODICE CKS GRE.EEC.R.29.IT.H.51386.00.106.00
	TITOLO Progetto DILA	CODICE INTERNO 2021.0047.00-GT-PSP-RET-007
	<i>Relazione Geotecnica (Definitivo)</i>	Data 16/05/2022
	Allegato 2-Point Load Test	Pagina 7 di 7

SCHEDE DI PROVA

RG-SG01
PROVA DI COMPRESSIONE MONOASSIALE A CARICO PUNTIFORME
POINT-LOAD STRENGTH TEST

(ISRM, 1985)

Committente	ENEL
Commessa	co03-22
Località	Impianto idroelettrico San Giacomo al Vomano
Data	28/01/2022
Area di prelievo	Timpano esterno centrale nuova dell'impianto idroelettrico San Giacomo
Campioni	Blocco
Litologia	Marne

Test non determinabili

Tipo di test		D	W	P	I_{s(50)}	
diametrale	assiale o irregolare	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]	
	x	39.02	77	1.6	0.46	(*)
	x	37	46	2.2	0.98	
	x	23	38.8	2.6	1.92	
	x	17.3	45	3.6	2.95	
	x	15.7	31.9	3.8	4.38	
	x	19.6	40	4.2	3.42	
	x	20.6	42	4.3	3.25	
	x	15.8	43.4	6.3	5.69	(*)

Risultati della prova - Valori medi

Test non determinabili

I_{s(50)}	[MPa]	2.82
C_o	[MPa]	67.60

Valutazione statistica sui valori di I_{s(50)}

Test non determinabili

Deviazione standard	[MPa]	1.20
Coefficiente di variazione	[%]	43

RG-SG02
PROVA DI COMPRESSIONE MONOASSIALE A CARICO PUNTIFORME
POINT-LOAD STRENGTH TEST

(ISRM, 1985)

Committente	ENEL
Commessa	co03-22
Località	Impianto idroelettrico San Giacomo al Vomano
Data	27/01/2022
Area di prelievo	Imbocco scarico della nuova centrale di S. Giacomo - Sponda sinistra
Campioni	Blocco
Litologia	Siltiti

Test perpendicolari

Tipo di test		D	W	P	$I_{s(50)}$
diametrale	assiale o irregolare	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
	x	41	100	5	1.10 (*)
	x	58	87	13	2.57
	x	55	142	19.40	2.65
	x	43	120	17	3.18
	x	40	103	14	3.21
	x	49	124	20.2	3.37
	x	44.7	131	20.4	3.50
	x	41	103	16.6	3.70
	x	42	110	19.3	3.96
	x	19	49	10.50	7.57 (*)

Test paralleli

Tipo di test		D	W	P	$I_{s(50)}$
diametrale	assiale o irregolare	[mm]	[mm]	[kN]	[MPa]
	x	56	104	4	0.76 (*)
	x	49	113	5	0.91
	x	60	117	13	1.88
	x	46	107	11.40	2.26
	x	42	104	11	2.41
	x	40	131	16	2.94
	x	35	41	9.7	4.96 (*)

Risultati della prova - Valori medi

Test perpendicolari		Test paralleli	
$I_{s(50)}$ [MPa]	3.27	$I_{s(50)}$ [MPa]	2.08
C_o [MPa]	78.40	C_o [MPa]	49.90
Indice di anisotropia	1a [-]		1.57

Valutazione statistica sui valori di $I_{s(50)}$

Test perpendicolari	
Deviazione standard [MPa]	0.48
Coefficiente di variazione [%]	15

Test paralleli	
Deviazione standard [MPa]	0.76
Coefficiente di variazione [%]	36