

COMUNE DI BEMA

SERVIZI TECNICI DI PROGETTAZIONE DEFINITIVA, ESECUTIVA, COORDINAMENTO DELLA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE E DI SERVIZI DI GEOLOGIA INERENTI LAVORI DI «COMPLETAMENTO DEI LAVORI CONCERNENTI LA FRANA DI BEMA SUL TORRENTE BITTO - REALIZZAZIONE ED ADEGUAMENTO DEL COLLEGAMENTO VIARIO COL FONDOVALLE»

PROGETTO DEFINITIVO

STRALCIO FUNZIONALE DALLA PK 0+000 ALLA PK 0+958.79

REV.	DATA	DESCRIZIONE	
1	APRILE 2022	EMISSIONE	
2			
3			
4			
RTI		TITOLO:	CODICE ELABORATO
SOIL ENGINEE Dott. Ing. Luigi Dott. Geol. Fat OB2 INGEGNE Dott. Ing. Andr BRINGSOL SR Dott. Ing. Giac	ERING SRL: Albert pio Staffini ERIA SRL: ea Orio RL: omo Bertolini	GEOLOGIA-GEOMECCANICA RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	GE-RE-001
			Scala: -
			Nome file: BEM-GE-RE-001-01.dwg

R.T.I. Mandataria	anti DEB 2 DE BringSol
RESPONSABILE INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE:	IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO:
Dott. Ing. Luigi Albert	Marco Sutti
A NORMA DELLE VIGENTI LEGGI SUI DIRITTI D'AUTORE IL PRESENTE DOCUMENTO NON PUÒ ESSERE RIPRODOTTO NÉ DIVULO	TO A TERZI SENZA IL NOSTRO CONSENSO - TRIBUNALE COMPETENTE MILANO



	Data	Aprile	2022
RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	Rev.	01	Pag. 1/60

INDICE

1	PREI	MESSA	2
2	DOC	UMENTI DI RIFERIMENTO	3
	2.1	Normativa e raccomandazioni	3
	2.2	Documenti progettuali	3
	2.3	Bibliografia	3
3	INQ	JADRAMENTO GEOLOGICO	5
	3.1	Geologia e stratigrafia	5
	3.2	Assetto tettonico	6
	3.3	Geomorfologia	9
		3.3.1 Inquadramento	9
		3.3.2 La frana di Bema	9
	3.4	Assetto idrogeologico	12
	3.5	Sismicità	12
		3.5.1 Inquadramento macrosismico	12
		3.5.2 Criteri di progetto	14
4	IND	AGINI GEOGNOSTICHE	15
	4.1	Indagini disponibili	15
	4.2	Campagna indagini 1988	15
	4.3	Campagna indagini 2006	16
	4.4	Campagna indagini 2021	21
	4.5	Campagna indagini 2022	27
5	RILIE	EVI GEOMECCANICI E STRUTTURALI	31
	5.1	Rilievi disponibili	31
	5.2	Condizioni geomeccaniche e strutturali locali	31
		5.2.1 Rilievi geomeccanici 2006	31
		5.2.2 Rilievi geomeccanici 2021	32
		5.2.3 Rilievi geomeccanici 2022	37
6	MOI	DELLO GEOLOGICO E CARATTERIZZAZIONE DELL'AMMASSO ROCCIOSO	40
	6.1	Frana di Bema	40
		6.1.1 Modello geologico	40
		6.1.2 Monitoraggi	41
	6.1	Modello geologico di tracciato	42
		6.1.1 Rock Mass Rating (RMR)	43
		6.1.2 Geological Strength Index (GSI) 6.1.3 Classificazione di Barton: O-system	44 45
	62	Caratterizzazione dell'ammasso roccioso	45
	0.2	6.2.1 Volume roccioso unitario	46
		6.2.2 Volume di progetto dei blocchi	49
		6.2.3 Caratterizzazione geomeccanica dei giunti	50
7	моі	DELLO IDROGEOLOGICO	56
	7.1	Stima della conducibilità idraulica e del carico idraulico	56



	Data	Aprile	2022
RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	Rev.	01	Pag. 2/60

1 PREMESSA

La presente relazione, in osservanza a quanto disposto ai punt1 6.2.1 e 6.2.2 delle vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni (Rif. [1]), illustra le caratteristiche geologiche e geomeccaniche delle aree interessate dagli interventi di completamento dei lavori che interessano la frana di Bema, con specifico riguardo all'esecuzione di una galleria naturale per il collegamento tra il ponte sul torrente Bitto di Albaredo e la strada SP8dir.A, in destra idrografica del torrente Bitto di Gerola.

Nel quadro delle opere in progetto, nel seguito sono esposti:

- le caratteristiche geologiche e stratigrafiche generali dell'area d'intervento;
- i lineamenti geomorfologici del territorio;
- le caratteristiche idrogeologiche a scala di bacino;
- le caratteristiche macrosismiche;
- i risultati delle indagini geognostiche disponibili;
- il modello geologico e idrogeologico dei siti interessati dai nuovi interventi.



RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA

Aprile 2022 Data Rev.

01 Pag.3/60

2 **DOCUMENTI DI RIFERIMENTO**

2.1 Normativa e raccomandazioni

- D.M. 17 gennaio 2018. "Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni»" (G.U. n. 42 [1] del 20 febbraio 2018).
- [2] Circolare 21 gennaio 2019, n. 7 "Istruzioni per l'applicazione dell'aggiornamento delle norme tecniche per le costruzioni di cui al D.M. 17 Gennaio 2018".

2.2 Documenti progettuali

- Geol. T. Tuia (2002). Piano per la difesa del suolo e il riassetto idrogeologico della Valtellina e [3] delle zone adiacenti, delle provincie di Bergamo, Brescia e Como (L.102/90). Frana di Berna, completamento delle opere idrauliche, consolidamento dei versanti e realizzazione delle infrastrutture necessarie all'accesso diretto al torrente Bitto dalla strada statale 405. Studio geologico - geotecnico – idraulico: Parte prima: Relazione geologica-idrogeologica.
- [4] Ing. P. Bongio (2002). Piano per la difesa del suolo e il riassetto idrogeologico della Valtellina e delle zone adiacenti, delle provincie di Bergamo, Brescia e Como (L.102/90). Frana di Bema, completamento delle opere idrauliche, consolidamento dei versanti e realizzazione delle infrastrutture necessarie all'accesso diretto al torrente Bitto dalla strada statale 405. Studio geologico - geotecnico - idraulico. Parte seconda: Relazione geotecnica.
- [5] Prof. Ing. S. Franzetti (2002). Piano per la difesa del suolo e il riassetto idrogeologico della Valtellina e delle zone adiacenti, delle provincie di Bergamo, Brescia e Como (L.102/90). Frana di Bema, completamento delle opere idrauliche, consolidamento dei versanti e realizzazione delle infrastrutture necessarie all'accesso diretto al torrente Bitto dalla strada statale 405. Studio geologico - geotecnico - idraulico. Parte seconda: Relazione tecnica ed elaborati grafici.
- [6] Geol. De Poli C. e Geol. Adamoli C. (2007). Lavori concernenti la frana sul T. Bitto, consolidamento dei versanti, realizzazione delle infrastrutture varie per il collegamento dell'abitato di Bema con il fondovalle, Lotto A. Progetto definitivo (2007): Studio della componente geologica.
- [7] Studio Griffini Srl (2017). Lavori concernenti la frana del torrente Bitto, consolidamento dei versanti, realizzazione infrastrutture varie per il collegamento dell'abitato di Bema con il fondo valle. Consulenza geologica e geomeccanica per la valutazione della fattibilità del progetto.
- Studio Calvi Srl e Geodata Engineering Spa (2020). "Completamento dei lavori concernenti la [8] frana di bema sul torrente Bitto, realizzazione ed adeguamento del collegamento viario col fondovalle". Progetto di fattibilità tecnica ed economica: relazioni ed elaborati grafici.
- [9] Areaquattro Srl (2021). Completamento dei lavori concernenti la frana di Bema sul torrente Bitto, realizzazione e adeguamento del collegamento viario col fondovalle. Report piano delle indagini – Doc. 20_119_R1_Rev0_Report Indagini.
- [10] Geol. F. Bigiolli (2022) Completamento dei lavori concernenti la Frana di Bema sul torrente Bitto, realizzazione e adeguamento del collegamento viario col fondovalle- Rapporto indagini di sismica a rifrazione e sondaggi a carotaggio con prove SPT.

2.3 Bibliografia

- [11] Cosi M. (1989). "La frana in Roccia di Bema (Valtellina-Italia)". Biblioteca del Dipartimento di geologia e paleontologia e geofisica. Università di Padova. Pub. N. 47.
- [12] P.G.T. del Comune di Morbegno (2002). Componente geologica nella pianificazione comunale



 RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA
 Rev.

Data Aprile 2022

01 Pag.4/60

L.R. 41/97. Relazione geologica (Elaborato 1).

- [13] P.G.T. del Comune di Bema (2012). Aggiornamento della componente geologica, idrogeologica e sismica del piano di governo del territorio. Relazione Geologica.
- [14] P.G.T. del Comune di Bema (2012). Carta degli elementi geologici (Tavola1 Geo) scala 1:10.000.
- [15] P.G.T. del Comune di Bema (2012). Carta degli elementi geomorfologici, strutturali e della dinamica geomorfologica (Tavola3 Geo) scala 1: 10.000.
- [16] P.G.T. del Comune di Bema (2012). Carta degli elementi idrogeologici (Tavola4 Geo) scala 1:10.000.
- [17] Piano stralcio per l'Assetto Idrogeologico (PAI). Interventi sulla rete idrografica e sui versanti geologici comunali (2021).
- [18] ISPRA e Sistema nazionale per la protezione dell'ambiente (2021). IdroGEO Piattaforma italiana sul dissesto idrogeologico. Pericolosità e rischio. Inventario Frane IFFI.
- [19] Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100.000. Foglio 7-18: Pizzo Bernina-Sondrio e Note Illustrative (1971). Servizio Geologico d'Italia.
- [20] ARPA (2021). Monitoraggio geologico: rete di monitoraggio di Bema.
- [21] Gruppo di lavoro CPTI (2004). "Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani". INGV, Bologna. http://emidius.mi.ingv.it/CPTI04.
- [22] ITHACA Working Group (2019). ITHACA (Italy hazard from capable faulting), A database of active capable faults of the Italian territory. Version December 2019. ISPRA Geological Survey of Italy. Web Portal http://sgi2.isprambiente.it/ithacaweb/Mappatura.aspx.
- [23] Palmstrom A. (1996). "RMi—A System for Characterizing Rock Mass Strength for Use in Rock" Engineering. Journal of Rock Mechanics and Tunneling Technology, 1, 69-108.
- [24] Hoek E. and Brown E.T. (2019). "The Hoek-Brown failure criterion and GSI 2018 edition".
 J. Rock Mech. Geotech. Eng. 11, 445–463.
- [25] Hoek E. and Brown E.T. (1997). "Practical estimates of rock mass strength". Int. J. Rock Mech. & Geomechanics Abstracts, 1165-1186.
- [26] Cai M., Kaiser P. K., Uno H., Tasaka Y. And Minami M. (2004). "Estimation of rock mass strength and deformation modulus of jointed hard rock masses using the GSI system". Int. J. RockMech. Min. Sci. 41(1), 3–19.
- [27] Deere D.U. and Miller R.P. (1966). "Engineering classification and index properties for intact rock". Illinois Univ At Urbana Dept of Civil Engineering.
- [28] Barton N. and Choubey V. (1977). "The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice. Rock Mechanics". 10, 1-65. Rock Mechanics, vol. 10 (1977), pp. 1-54.
- [29] Maleki M.R. (2018). "Groundwater Seepage Rate (GSR); a new method for prediction of groundwater inflow into jointed rock tunnel". Tunnelling and Underground Space Technology 71: 505-517.
- [30] Farhadian H., Katibeh H. and Huggenberger P. (2016). "Empirical model for estimating groundwater flow into tunnel in discontinuous rock masses". Environmental Earth Sciences 75.6: 1-16.
- [31] Frenelus W., Peng H. and Zhang J. (2021). "Evaluation methods for groundwater inflows into rock tunnels: a state of the art review". Int. J. Hydro 5.4: 152-168.
- [32] Scesi L. and Gattinoni P. (2007). "Roughness control on hydraulic conductivity in fractured rocks". Hydrogeology Journal. 15. 201-211. 10.1007/s10040-006-0076-6.



	Data	Aprile	2022
RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	Rev.	01	Pag. 5/60

3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO

3.1 Geologia e stratigrafia

L'area interessata dalle opere in progetto si trova al piede di una stretta dorsale morfologico strutturale che si estende in direzione SSE-NNO sul versante meridionale della Bassa Valtellina, delimitata a ovest dalla valle del torrente Bitto di Gerola e a est da quella del torrente Bitto di Albaredo (**Figura 3-1**).



Figura 3-1 – Vista aerea verso sud del bacino del torrente Bitto, rami di Albaredo e di Gerola

Sotto il profilo litologico, nel territorio affiorano diffusamente rocce metamorfiche con prevalente tessitura gneissica e filladica, riferibili alla Formazione degli Gneiss di Morbegno e alla Formazione delle Filladi di Ambria.

Dove la pendenza dei versanti diminuisce, le rocce substrato risultano coperte da depositi residuali, depositi eluvio-colluviali, falde detritiche, accumuli di frana e, limitatamente agli alvei dei torrenti, depositi alluvionali. Nel territorio si rinvengono anche depositi glaciali ben definiti, di prevalente genesi morenica o fluvioglaciale.

In sintesi, per l'area d'interesse si evidenziano (Figura 3-2):

<u>Formazione degli Gneiss di Morbegno</u>: costituita da paragneiss biotitici a grana media, ricchi di noduli di albite, localmente arricchiti in granato. In letteratura vengono segnalati rari e locali passaggi a micascisti muscovitici, talora a due miche, granatiferi, con transizioni a micascisti quarzitici e filladici, individuati, nella maggior parte dei casi, dal diverso grado di scistosità e fratturazione.

<u>Depositi glaciali</u>: costituiti essenzialmente da depositi di fondo e depositi fluvioglaciali, soprattutto wurmiani, ricoprono in maniera pressoché continua il substrato a partire da un'altitudine di circa 500 metri. Sono caratterizzati da un'abbondante matrice fine limoso argillosa, talora in banchi, con marcata uniformità granulometrica (sabbie fini e limi argillosi), a cui si intercalano sparsi ma diffusi ciottoli ben arrotondati, massi e trovanti.



Aprile 2022 Data **RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA** Rev.

01 Pag.6/60

Depositi alluvionali recenti e attuali: i primi sono costituiti da depositi alluvionali stabilizzati che si rinvengono nelle aree in fregio agli alvei torrentizi, in genere colonizzati da vegetazione arbustiva. Si tratta di depositi grossolani, formati da ciottoli arrotondati e ghiaie in matrice sabbiosa, debolmente limosa. Il secondo tipo di depositi occupa gli alvei attuali dei corsi d'acqua ed è caratterizzato da depositi molto grossolani di alveo mobile, formati da blocchi, anche pluridecimetrici, in abbondante matrice ghiaioso sabbiosa.

Depositi eluvio-colluviali: formati prevalentemente da limi debolmente argillosi, poco plastici, in accumuli normalmente modesti sebbene localmente, in corrispondenza di superfici prative o di piccole incisioni, possono esprimere spessori nell'ordine di qualche metro.

Accumuli di frana e detriti di falda: i primi si rinvengono al piede di aree in frana, in genere di tipo complesso, tipicamente costituiti da ammassi caotici di blocchi lapidei di grandi dimensioni in matrice detritica eterometrica, localmente stabilizzati da vegetazione arborea e arbustiva. I secondi si rinvengono al piede di settori di versante acclive, con affioramenti diffusi del substrato roccioso, e risultano formati da detriti eterometrici, con blocchi a spigoli vivi e irregolari.

3.2 Assetto tettonico

L'assetto tettonico del territorio valtellinese in esame esprime il complesso risultato delle molteplici fasi deformative che hanno coinvolto l'odierno edificio alpino nel corso di due distinti processi orogenetici.

Come illustrato in Figura 3-3, il comune di Bema si trova a sud della cosiddetta Linea Insubrica, un articolato sistema di faglie con giacitura subverticale, ad andamento E-O nella valle del fiume Adda, che separa il dominio delle Alpi stricto sensu a nord da quello delle Alpi meridionali o Sudalpino a sud.

L'assetto strutturale dell'area di studio è schematizzato in Figura 3-4, dagli studi di cui al Rif. [3] e Rif. [11], dalla quale risulta che il territorio di Bema è interessato da numerosi piani di faglia con direzione prevalente NO-SE, NE-SO e circa E-O.

In dettaglio per quanto d'interesse, si evidenzia che, in corrispondenza del versante sinistro del torrente Bitto di Albaredo, sono segnalate due faglie con direzione NE-SO, entrambe nelle vicinanze del ponte di Bema, mentre sul versante in destra del torrente Bitto di Gerola si ipotizza un numero maggiore di faglie, che esprimono una direzione preferenziale NO-SE e E-O.

In bibliografia risulta, in effetti, consolidato che la zona di frana sia controllata da lineamenti tettonici subverticali, con direzione NO-SE, di cui si riconosce un cinematismo trascorrente (Figura 3-4). Lungo tali zone si concentrano fasce milonitiche in corrispondenza delle quali la roccia presenta caratteristiche meccaniche decisamente più scadenti.

In questo contesto, emerge che il tracciato della galleria in progetto interferisce con almeno tre fasce tettonizzate (Rif. [3]), due delle quali delimitano il fianco destro della zona di distacco più interna della frana di Bema e un terzo il suo fianco sinistro. Un quarto lineamento, sempre con andamento NO-SE e collocato più a nord rispetto al tracciato della galleria e delimita il bordo della zona ipotizzata quale potenziale estensione del fenomeno gravitativo.



RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA

Aprile 2022 Data

01 Pag.7/60 Rev.



DEPOSITI SUPERFICIALI

T NICCHIA DI FRANA (POSSIBILE EVOLUZIONE)

ORLI MORFOLOGICI

DEPOSITI SUPERFICIALI	INDAGINI ESISTENTI
CONOIDE	SONDAGGI 2022
DEPOSITO DI FRANA BLOCCHI E MASSI A SPIGOLI VIVI E IRREGOLARI IN DETRITO ETEROMETRICO	SONDAGGI 2021 PZ = PIEZOMETERO
DEPOSITO ALLUVIONALE CIOTTOLI E GHIAIE IN MATRICE SABBIOSA DEBOLMENTE LIMOSA	SONDAGGI 2007
DEPOSITO ELUVIALE LIMO DEBOLMENTE ARGILLOSO	SONDAGGI 1988
DEPOSITO MORENICO CIOTTOLI, MASSI E TROVANTI IN MATRICE LIMOSA E ARGILLOSA	RILIEVI GEOMECCANICI 2022
SUBSTRATO ROCCIOSO	RILIEVI GEOMECCANICI 2007
GNEISS DI MORBEGNO PARAGNEISS BIOTITICI A GRANA MEDIA RICCHI DI NODULI DI FELDSPATO	RILIEVI GEOMECCANICI 2002
ELEMENTI STRUTTURALI E GEOMORFOLOGICI	TOMOGRAFIA 2022
FAGLIA	TOMOGRAFIA 2021
NICCHIA DI FRANA CERTA	TRACCIA SEZIONE GEOLOGICA





	Data	Aprile 2	2022
RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	Rev.	01	Pag. 8/60



Figura 3-3 – Schema geologico-strutturale della bassa Valtellina e sezione geologica N-S L.O.: Linea Orobica; L.T.: Linea del Tonale; FA: aree delle falde pennidiche Austroalpine; AM: Alpi Meridionali; 1: principali lineamenti tettonici; 2: massa intrusiva terziaria; 3: masse intrusive erciniche; 4: copertura sedimentaria del bacino del Collio (permiano); 5: ofioliti alpine; 6: basamento cristallino delle Alpi Meridionali



Figura 3-4 – Discontinuità tettoniche osservate nell'area della frana di Bema e schema del campo degli sforzi



	Data	Aprile	2022
RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	Rev.	01	Pag. 9/60

3.3 Geomorfologia

3.3.1 Inquadramento

Come già osservato, la valle del torrente Bitto è impostata, per la quasi totalità della sua estensione, su rocce metamorfiche scistose, localmente profondamente tettonizzate e alterate.

L'assetto strutturale del substrato lapideo ha favorito, in risposta all'azione degli agenti morfogenetici esogeni, la formazione dei ripidi versanti, che raccordano i fondivalle dei due rami del torrente Bitto con la sommità della dorsale che si estende dall'abitato di Bema fino al Passo San Marco (Monte Verrobbio).

Gli studi eseguiti sul territorio sono coerenti nel rilevare una marcata suscettibilità dei versanti alla manifestazione di fenomeni di dissesto gravitativo. In particolare, i versanti che interessano le opere in progetto sono storicamente interessati da fenomeni di crollo e ribaltamento, arealmente diffusi, interrotti da fenomeni di scivolamento rotazionale o traslativo, da fenomeni di frana complessi e, in minor misura, da fenomeni di colamento rapido e da frane lineari (**Figura 3-5**). Il tracciato delle opere in progetto ricade in un settore interessato da tutte le tipologie di fenomeni sopra riportate, con particolare riferimento ai fenomeni di crollo e ribaltamento che interessano, di fatto, le intere tratte in esterno.

Da un punto di vista idrologico e idraulico, l'alveo del torrente Bitto di Gerola è qualificato da un'elevata pericolosità di esondazione (non perimetrata, **Figura 3-6**) cui si associano fenomeni di trasporto solido in alveo mobile con elevato potenziale di erosione spondale.

3.3.2 La frana di Bema

La frana di Bema è un importante dissesto gravitativo del versante orobico della Valtellina, esteso alla scala del versante e attivo in epoca storica. L'evento principale risale all'anno 1873, nel corso del quale venne movimentato un ingente volume di roccia e detrito, stimato in circa 250.000 metri cubi, che determinò lo sbarramento dell'alveo del torrente Bitto e la formazione di un invaso di circa due chilometri. Successivamente a questa fase parossistica, si registrarono alcune riattivazioni di minore entità, sempre ben correlate con eventi alluvionali intensi.

In tempi recenti, è noto l'evento del 1987, che portò alla mobilizzazione di volumi di roccia stimati tra i 500.000 (Azzola, 1991) e i 2.000.000 metri cubi (Lunardi e Froldi, 1994) con ampliamento del dissesto di circa 350 m verso monte, spinto fino a lambire i terreni di copertura morenica presenti nelle aree sommitali del ripiano di Bema.

L'odierna frana presenta un'altezza massima di 600 m, una larghezza massima di 300 m, sviluppandosi da quota 740 m slm a quota 380 m slm, dove il fronte dell'accumulo lambisce l'alveo del torrente Bitto di Gerola.

In seguito a questi eventi, sono stati definiti interventi di stabilizzazione della frana e di sistemazione dell'alveo del torrente Bitto, la cui erosione al piede ha contribuito allo svilupparsi di fenomeni di rilascio tensionale all'interno del sovrastante ammasso roccioso.

In generale, il materiale distaccato risulta costituito da detrito roccioso angoloso, di pezzatura compresa tra blocchi e ciottoli, frammisto a ghiaia, sabbia e limo proveniente dalla coltre eluviale e dai resti morenici coinvolti nel dissesto. Tale detrito è tuttora soggetto a fenomeni di assestamento che generano localizzate manifestazioni franose superficiali, soprattutto in presenza di detrito con matrice sabbiosa-argillosa.

Attualmente la rete di monitoraggio geologico-tecnico installato non segnalano significative evoluzioni in atto anche se non viene esclusa la possibilità di collasso di volumi rilevanti di ammasso roccioso a medio-lungo termine (Rif. [7]).



RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA

Data Aprile 2022

Pag.10/60

Rev. **01**



Frane IFFI



Figura 3-5 - Carta del censimento dei fenomeni gravitativi IFFI (Rif. [18])



RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA

Data Aprile 2022

Pag.11/60

Rev. 01



Dissesti linear



- ESONDAZIONI: Area a pericolosità elevata non perimetrata (Eb)/Modifiche e integrazioni
- ESONDAZIONI: Area a pericolosità media o moderata non perimetrata (Em)/Modifiche e integrazioni
- VALANGHE: Area a pericolosità molto elevata o elevata non perimetrata (Va)/Modifiche e integrazioni
- VALANGHE: Area a pericolosita media o modesta non perimetrata (Vm)/Modifiche e integrazioni
- Non valutato

Dissesti poligonali

FRANE: Area di frana attiva (Fa)/Modifiche e integrazioni

- FRANE: Area di frana quiescente (Fq)/Modifiche e integrazioni
- FRANE: Area di frana stabilizzata (Fs)/Modifiche e integrazioni
- ESONDAZIONI: Area a pericolosità molto elevata (Ee)/Modifiche e integrazioni
- ESONDAZIONI: Area a pericolosità elevata (Eb)/Modifiche e integrazioni
- ESONDAZIONI: Area a pericolosità media o moderata (Em)/Modifiche e integrazioni
- CONOIDI: Area di conoide attivo non protetta (Ca)/Modifiche e integrazioni

- CONOIDI: Area di conoide attivo parzialmente protetta (Cp)/Modifiche e integrazioni
- CONOIDI: Area di conoide non recentemente attivatosi o completamente protetta (Cn)/Modifiche e integrazioni
- VALANGHE: Area a pericolosità molto elevata o elevata (Va)/Modifiche e integrazioni
- VALANGHE: Area a pericolosità media o modesta (Vm)/Modifiche e integrazioni

Non valutato





	Data	Aprile 2022	
RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	Rev.	01	Pag. 12/60

3.4 Assetto idrogeologico

Dal punto di vista idrogeologico, i litotipi che affiorano nel territorio in esame sono caratterizzati da permeabilità di differente natura: primaria, per porosità, nei terreni e nei depositi sciolti, e secondaria, per fessurazione, negli ammassi rocciosi fratturati e/o stratificati, in genere per scistosità.

Secondo quanto riportato nella Carta degli elementi idrogeologici del P.G.T. (Rif. [16]), la maggiore estensione del territorio comunale è occupata da materiali geologici, costituiti da substrato lapideo e depositi sciolti (depositi glaciali morenici, depositi alluvionali), caratterizzati da una permeabilità da media a ridotta (10^{-6} m/s <K< 10^{-2} m/s) e solo localmente si riscontrano zone da elevata a media permeabilità ($>10^{-2}$ m/s).

In corrispondenza delle opere di progetto, affiora principalmente substrato lapideo gneissico, caratterizzato da permeabilità da elevata a media, con localizzate coperture superficiali costituite da depositi di frana, depositi eluviali alluvioni recenti e detrito colonizzato, anch'essi caratterizzati da permeabilità da elevata a media.

È opportuno evidenziare che i valori di permeabilità attribuiti negli studi a supporto del P.G.T. comunale ai litotipi lapidei riflettono una condizione dei versanti in prossimità della superficie.

3.5 Sismicità

3.5.1 Inquadramento macrosismico

In accordo ai più recenti studi condotti a scala nazionale nel quadro della costruzione di un modello delle sorgenti sismogenetiche (Rif. [21]), l'area di progetto non risulta compresa in alcuna Zona Sismogenetica (ZS) individuata per il nord Italia, come illustrato in (**Figura 3-7**) e non risulta altresì interessata da fenomeni di fagliazione superficiale in grado di deformare e/o dislocare la superficie del terreno (Rif. [22]). Si segnala unicamente la presenza di tre elementi lineari entro una distanza di 10 km dall'area d'intervento, attribuiti al sistema di faglie di Tartano (**Figura 3-8**), ai quali è riconosciuta attività olocenica.

In un raggio di 100 km dal sito di interesse sono individuate sei zone sismogenetiche, con magnitudo momento massime da 5.91 a 6.6 (**Tabella 3-1**); le più prossime sono la Grigioni Valtellina (903) e la Bergamasco (907), rispettivamente a 25 km e a 35 km circa.

Nome ZS	#	Mw _{min}	Mw _{max}	b	ν
SAVOIA	901	4.76	5.91	-1.18	0.11
VALLESE	902	4.76	6.14	-1.26	0.14
GRIGIONI - VALTELLINA	903	4.76	5.91	-1.26	0.14
GARDA - VERONESE	906	4.76	6.60	-1.14	0.11
BERGAMASCO	907	4.76	5.91	-1.71	0.04
TORTONA - BOBBIO	911	4.76	5.68	-1.47	0.05

Tabella 3-1 – Principali parametri adottati per l'elaborazione probabilistica della mappa di pericolosità del territorio italiano: Mw_{min} =magnitudo minima considerata nel catalogo; Mw_{max} =magnitudo massima per la ZS; b=parametro della relazione di Gutenberg-Richter; v=numero di terremoti per anno di magnitudo superiore a Mw_{min}



RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA Rev.

Aprile 2022 Data 01

Pag.13/60



Figura 3-7 - Zone sismogenetiche (Rif. [21])



Figura 3-8 – Zone sismogenetiche lineari prossime all'area di progetto (Rif. [22])



RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA

Data Aprile 2022

Rev. **01** Pag.**14/60**

3.5.2 Criteri di progetto

Per la definizione delle azioni sismiche di progetto, si assumono le seguenti ipotesi:

- vita nominale dell'opera V_N = 50 anni, punto 2.4.1 NTC 2018;
- classe d'uso di "tipo III", punto 2.4.2 NTC 2008;
- periodo di riferimento per l'azione sismica $V_R = V_N \times C_U = 75$ anni, con $C_U = 1$, Tab. 4.II NTC 2018;
- coordinate geografiche medie del sito: LONG. 9.565266; LAT. 46.108892;
- categoria di sottosuolo A, in presenza di substrato roccioso affiorante e/o subaffiorante;
- categoria sottosuolo B, negli altri casi;
- coefficiente di amplificazione topografica S_T= 1.0, per categoria topografica T1;
- coefficiente di amplificazione topografica 1.0<S_T<1.2, per categoria topografica T2 in funzione della posizione del sito rispetto alla base del pendio, Tab. 3.2.VI NTC 2008;



Le azioni di progetto per i differenti stati limite sono definite nelle relazioni di calcolo mediante il programma "Spettri NTCver.1.0.3.xls" disponibile sul sito http://www.cslp.it/cslp.



	Data	Aprile 2022	
RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	Rev.	01	Pag. 15/60

4 INDAGINI GEOGNOSTICHE

4.1 Indagini disponibili

Nell'ambito dello studio della Frana di Bema e degli interventi a essa connessi sono state eseguite le seguenti campagne indagini (Figura 3-2):

- studio Frana di Bema, 1988;
- progetto definitivo/esecutivo vecchio tracciato, 2006;
- progetto definitivo nuovo tracciato, 2021;
- progetto definitivo nuovo tracciato, 2022.

4.2 Campagna indagini 1988

La prima campagna indagini eseguita risale al 1988 ed è stata finalizzata allo studio della frana di Bema, alle sue possibili cause ed evoluzioni. Complessivamente sono stati eseguiti sette sondaggi a carotaggio continuo (S1÷S7) nella zona apicale della frana, con la finalità di studiare la condizione dell'ammasso roccioso nella zona compresa tra il coronamento della frana e l'abitato di Bema.

Sondaggio	Quota testa foro	Tipologia so	gia sondaggio Lunghezza rispetto all verticale		Inclinazione rispetto alla verticale	Orientazione	Quota livello piezometrico	Quota livello piezometrico
	(m s.l.m.)	(-)	(m da p.c.)	(m)	(°)	(°)	(m da p.c.)	(m s.l.m.)
S1	783.35	carotaggio continuo	25.05	25.05	0	-	4.6	778.75
S2	768.29	carotaggio continuo	25.2	25.2	0	-	8.9	759.39
S3	750.33	carotaggio continuo	32.1	32.1	0	-	-	-
S4	754.55	carotaggio continuo	60	60	27	N140°E	-	-
S5	735.065	carotaggio continuo	60	60	25	N138°E	-	-
66	742.90	carotaggio continuo	60	60	24	N139°E	23.0	722.88
30	743.03	carotaggio continuo	00	00	24		21.0	
S7	715.01	carotaggio continuo	60	60	25	N135°E	-	-

Tabella 4-1 – Caratteristiche principali dei sondaggi 1988

I sondaggi S1 e S2 si intestano in una porzione di roccia sana a monte della nicchia di frana, definita di qualità medio-buona. Per converso, i sondaggi S3, S4, S5, S6 e S7 si intestano in una porzione di roccia descritta come estremamente scadente. Tra questi, i sondaggi S3, S4 e S5 sono quelli più prossimi al coronamento della frana e risultano interessati da un'intensa fratturazione. In questi sondaggi non è stata rilevata presenza d'acqua (riscontrata invece in corrispondenza dei sondaggi S1, S2 e S6) e la presenza di circolazione idrica di origine meteorica è ipotizzata dalla presenza di patine di ossidazione sulle superfici di frattura.

Il sondaggio S1 presenta valori di RQD maggiori del 70% (con media 80%), a eccezione dell'intervallo compreso tra i -14 m e i -15m dal p.c., caratterizzato da un valore di RQD pari al 40%. Il livello piezometrico è segnalato a 4.6 m di profondità da p.c. con ulteriori ipotesi di venute d'acqua da porzioni di roccia inferiori a 1 m di spessore, a partire da 12.5 m e 15 m da p.c., e di circa 2.5 m di spessore, a partire da 22 m circa da p.c.

Il sondaggio S2 presenta valori di RQD generalmente superiori al 75% (con media 85%) a eccezione della roccia, piuttosto fratturata (0≤RQD≤20), riscontrata nei primi 2.5 m da p.c. e della roccia, di condizione medio buona (50≤RQD≤75), presente tra i 17 e i 21 m circa di profondità. Il livello piezometrico riscontrato raggiunge gli 8.9 m da p.c. e un'ulteriore evidenza di venuta d'acqua è stata riscontrata in corrispondenza di una porzione di roccia, inferiore al metro di spessore, collocata a partire da 20 m da locale piano campagna.

La roccia riscontrata nel sondaggio S3 presenta valori di RQD che vanno dallo 0% al 95% (con un



 Data
 Aprile 2022

 RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA
 Rev. 01
 Pag.16/60

valore medio pari al 50%), omogeneamente distribuiti con la profondità. Tra i -18 m e i -25 m circa, in cui è stata ipotizzata la presenza di circolazione di acqua meteorica per la presenza di ossidi di Fe.

Il sondaggio S4 presenta valori di RQD molto differenti tra i primi 20÷30 m circa di profondità dal p.c. e il resto del sondaggio: i primi si distribuiscono in un range compreso tra lo 0% e il 100% (raggiungendo un valore medio del 51%) mentre i secondi variano tra l'85% circa e il 100% (con valore medio del 95%). Tra i -11 m e i -21 m circa da p.c. è stata ipotizzata la presenza di circolazione di acqua meteorica sempre per la presenza di ossidi di Fe.

Il sondaggio S5 presenta valori di RQD da 0 al 70%, omogeneamente distribuiti fino a fine sondaggio (60 m da p.c.), tra cui risultano abbondanti i valori inferiori al 30%. In una fascia localizzata tra i 12.5 e i 32 m circa di profondità si riscontrano valori di RQD compresi tra l'80 e il 100%. Tra i 35 m e i 36 m circa e tra i 43 m e i 49 m circa di profondità, è stata riscontrata una fascia milonitica, all'interno della quale è stata ipotizzata abbondante circolazione di acqua.

Il sondaggio S6 presenta valori di RQD caratterizzati da una dispersività molto elevata: nei primi 35 m di profondità i valori variano dallo 0% al 70% e si riscontra una maggior rappresentatività del valore di RQD pari a 0% e del range compreso tra il 30 e il 50%. Dai 35 m ai 60 m di profondità i valori di RQD variano dal 10 % al 100%, con una maggior rappresentatività dei valori compresi tra il 60 e il 100%. Il livello piezometrico misurato varia dai 21 ai 23 m di profondità dal p.c.

Il sondaggio S7 presenta una roccia con valori di RQD caratterizzati da una dispersività molto elevata (0≤RQD≤100)

4.3 Campagna indagini 2006

Per la campagna del 2006, finalizzata alla progettazione della prima ipotesi di tracciato della galleria per il collegamento dell'abitato di Bema con il fondovalle, è stata prevista l'esecuzione di quattro sondaggi a carotaggio continuo (S1÷S4), di cui due collocati al piede della frana.

Sondaggio	Quota testa foro	Tipologia so	ndaggio	Lunghezza	Inclinazione	Orientazione	Quota livello piezometrico	Quota livello piezometrico
	(m s.l.m.)	(-)	(m da p.c.)	(m)	(-)	(°)	(m da p.c.)	(m s.l.m.)
S1	440	carotaggio continuo	50	50	suborizzontale	N84E		-
S2	440	carotaggio continuo	18	18	verticale	-	-	-
S3	441	carotaggio continuo	50	50	suborizzontale	N266O	-	-
S4	435	carotaggio continuo	46	46	verticale	-	-	-

Tabella 4-2 – Caratteristiche principali dei sondaggi 2006

Il sondaggio S1 è stato eseguito all'imbocco ovest della galleria allora in progetto, sul versante destro del T. Bitto di Gerola. La perforazione è avvenuta unicamente in roccia, rappresentata dagli Gneiss di Morbegno, caratterizzata da un moderato grado di alterazione per i primi 40 m. Questa risulta spesso molto fratturata, con valore di RQD medio pari a 50% circa, e con zone cataclastiche aventi valori di RQD=0% (tra 14 m e 15 m, tra 16 m e 17 m (**Figura 4-1**) e tra 39 m e 40 m).



RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	Data	Aprile	2022
	Rev.	01	Pag. 17/60



Da - 10.40 metri, in alto a sinistra, a - 15.80, in basso a destra



Da - 15.80 metri, in alto a sinistra, a - 21.20 in basso a destra

Figura 4-1 – Foto cassette catalogatrici del sondaggio S1/06 (da 10.4 m a 21.2 m di profondità)

Il sondaggio S2 è stato eseguito a pochi metri dal sondaggio S1, sul versante occidentale del dosso di Bema, all'interno dell'accumulo di frana.

I primi sette metri di sondaggio sono costituiti dai detriti dell'accumulo di frana, riconducibili a originarie coperture glaciali di materiali eterogenei con granulometria molto variabile, mediamente composti da ciottoli e ghiaia immersi in una matrice limoso sabbiosa. A partire da 7 m da p.c. fino a fine sondaggio (18 m), è presente il substrato roccioso, costituito dagli Gneiss di Morbegno, generalmente poco fratturati (RQD medio 78% circa) e moderatamente alterati, a eccezione degli spezzoni da 7 m a 8 m (RQD=32%) (**Figura 4-2**) e da 17 m a 18 m di profondità (RQD=15%).



	Data	Aprile	2022
RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	Rev.	01	Pag. 18/60



Dal piano campagna, in alto a sinistra, a - 7.00 metri in basso a destra



Da - 7.00 metri in alto a sinistra a - 11.70 in basso a destra

Figura 4-2 – Foto cassette catalogatrici del sondaggio S2/06 (da 7 m a 11.7 m di profondità)

Il sondaggio S3 è stato eseguito in prossimità dal Ponte di Bema (circa 20 m a nord) ed è quasi subparallelo all'asse della galleria allora in progettazione.

La perforazione è avvenuta unicamente in roccia, caratterizzata da un grado di alterazione moderato e spesso discretamente fratturata (RQD medio 66% circa) con zone cataclastiche con RQD <25%, come segnalato per gli spezzoni da 34 a 35 m (RQD=20%), da 43 a 45 m (RQD=23%), da 45 a 49 (RQD=0%, ad eccezione dello spezzone tra 46 e 47 m, caratterizzato da RQD=30%) **Figura 4-3**.



RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	Data	Aprile	2022
	Rev.	01	Pag. 19/60



Da 40,60 m in alto a sinistra a 46,10 m in basso a destra



Da 46,10 m in alto a sinistra a 50,00 m in basso a destra

С

Figura 4-3 – Foto cassette catalogatrici sondaggio S3/06 (da 40.6 m a 50 m)

Il sondaggio S4 è stato realizzato nel corpo della frana di Bema, poche decine di metri a valle dai sondaggi S1 e S2.

Il sondaggio ha attraversato uno spesso strato di copertura, costituito per i primi 10 m dai detriti dell'accumulo di frana, caratterizzati da materiali eterogenei con granulometria molto varia, generalmente rappresentati da ciottoli e ghiaia immersi in una matrice limoso-sabbiosa, per i successivi 3 m si riscontrano ciottoli sub-angolosi di dimensione uniforme e assenza di frazione fine (**Figura 4-4**) e fino a 40 m da p.c. sono presenti ghiaie grossolane e medie con clasti arrotondati, immerse in matrice limoso sabbiosa (**Figura 4-5**). I tre metri di substrato intercettato a partire dalla profondità di 43 m si presenta mediamente fratturato con roccia di qualità da scadente a media, con 35%<RQD<55% (**Figura 4-6**).



	Data	Aprile 2022		
RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	Rev.	01	Pag. 20/60	



Da - 6.00 m, in alto a sinistra a -13.50 m, in basso a destra

Figura 4-4 – Foto cassetta catalogatrice sondaggio S4/06 (da 6 m a 13.5 m)



Da –32.00 m, in alto a sinistra a –39.0 m, in basso a destra

Figura 4-5 – Foto cassetta catalogatrice sondaggio S4/06 (da 13.5 m a 20 m)



Da –39.0 m, in alto a sinistra, a – 46.0 m, in basso a destra

Figura 4-6 – Foto cassetta catalogatrice sondaggio S4/06 (da 39 m a 46 m)



	Data	Aprile 2022		
RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	Rev.	01	Pag. 21/60	

4.4 Campagna indagini 2021

A supporto della progettazione definitiva della nuova galleria naturale, sono stati eseguiti quattro sondaggi (S1÷S4), di cui due orizzontali e due verticali, una prova sismica down hole in corrispondenza dei sondaggi S2 e S3 e una prova sismica a rifrazione (TM1).

<u>Sondaggi</u>

Nella campagna indagini prodromica alla fase di assegnazione dell'incarico per la progettazione definitiva ed esecutiva delle opere, sono stati eseguiti quattro sondaggi (S1÷S4), di cui due orizzontali, posizionati rispettivamente all'imbocco ENE (S1) e OSO (S4) della galleria in progetto, e due sondaggi verticali (S2 e S3), eseguit in quota all'interno del corpo di frana in prossimità della verticale sull'asse della galleria.

I sondaggi sono stati eseguiti a carotaggio continuo per l'intera profondità, a eccezione del sondaggio S2 per il quale si è proceduto con una prima perforazione a distruzione di nucleo, fino alla profondità di 90 m da p.c., seguita da una perforazione a carotaggio continuo fino a 111 m dal locale piano campagna.

Sondaggio	Quota testa foro	Tipologia sonda	aggio	Lunghezza	Inclinazione rispetto alla verticale	Orientazione	Quota livello piezometrico	Quota livello piezometrico
	(m s.l.m.)	(-)	(m da p.c.)	(m)	(°)	(°)	(m da p.c.)	(m s.l.m.)
S1	439	carotaggio continuo	100	100	92	N234	-	-
52	500	distruzione di nucleo	90	111	7	N319	51.1	470.9
52	522	carotaggio continuo	27	111				470.9
S3	524	carotaggio continuo	111	111	7	N340	-	-
S4	434	carotaggio continuo	100	100	91.4	N63	-	-

Tabella 4-3 – Caratteristiche principali dei sondaggi 2021

Nel sondaggio S1, i primi 7 m di carotaggio segnalano una roccia molto fratturata (**Figura 4-7**), con patine d'alterazione arancione e valori di RQD molto bassi (0%<RQD<20%), oltre questa profondità la qualità media dell'ammasso roccioso migliora, seppur a tratti la roccia si presenti fratturata e debolmente alterata; i valori di RQD risultano in genere superiori al 50% (**Figura 4-8**), fatta eccezione per alcune porzioni localizzate da uno fino a quattro metri di lunghezza, in cui si registrano valori di RQD compresi tra il 20% e il 40%: tra 15 e 19 m, tra 28 e 29 m, tra 32 e 33 m, tra 36-e 37 m, tra 41 e 42 m, tra 48-e 49 m, tra 52 e 53 m e tra 74 e 75 m (**Figura 4-9**).

Proseguendo lungo il sondaggio la qualità della roccia tende generalmente a crescere e da 78 m fino a fondo foro (100 m) si registrano valori di RQD sempre superiori al 50% (Figura 4-10).

In corrispondenza del sondaggio S1, nel corso della perforazione è stata registrata abbondante fuoriuscita d'acqua a circa 25 m da bocca foro, con flusso continuo che, a fine lavori, è risultato pari a circa 0,3÷0,4 l/sec.

Il sondaggio S2 è stato eseguito a distruzione di nucleo fino alla profondità di 90 m, con evidenza indiretta di elevata fratturazione e alterazione per i primi 46 m; per i successivi 90 m, la perforazione è stata eseguita a carotaggio continuo, permettendo la descrizione dell'ammasso roccioso. In particolare, a partire da questa profondità, la roccia presenta valori di RQD generalmente superiori al 50% (RQD medio pari al 73%), a eccezione delle porzioni comprese tra i 90 e 91 m e tra i 100 e i 102 m da p.c., in cui i valori di RQD risultano molto bassi, compresi tra il 20% e il 40% (**Figura 4-11**).

Il sondaggio S2 è stato attrezzato con un piezometro a tubo aperto (fessurato tra -110 m e -90 m) nel quale la soggiacenza dell'acqua in foro, misurata nei giorni successivi alla conclusione del sondaggio, è risultata pari a -51,10 m (nota: una misura eseguita nell'aprile del 2022 ha confermato il dato).



RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	Data	Aprile	2022
	Rev.	01	Pag. 22/60



Figura 4-7 – Foto cassetta catalogatrice sondaggio S1/21 (da 0 m a 3 m)



Figura 4-8 – Foto cassetta catalogatrice sondaggio S1/21 (da 12 m a 15 m)



Figura 4-9 – Foto cassetta catalogatrice sondaggio S1/21 (da 18 m a 21 m)



	Data	Aprile 2022		
RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	Rev.	01	Pag. 23/60	



Foto 23. Foto cassetta sondaggio S1C23 da 94,00 a 99,00 m.





CONT. CONUME DI BENA (SO) Lac: BENA FRANCICISSIN 2 UN SUBME TO STATE OF STA



Foto 27. Foto cassetta sondaggio S2C3 da 98,80 m a 103,50 m.

Figura 4-11 – Foto cassette catalogatrici sondaggio S2/21 (da 94.6 m a 103.5 m)

	Data	Aprile 2022		
RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	Rev.	01	Pag. 24/60	

Il sondaggio S3 ha investigato una prima parte di detrito di frana non coesivo con trovanti fino alla profondità di 8 m (**Figura 4-12**), per poi continuare, fino a 111 m da p.c., all'interno dell'ammasso roccioso composto prevalentemente da paragneiss con differente grado di fratturazione.

All'interno dell'ammasso roccioso, a partire dalla profondità di 8 m fino a 100 m da p.c., è stata riscontrata un'elevata variabilità dei valori di RQD, compresi tra un minimo dello 0% e un massimo del 100%, mantenendosi intorno a una media del 60% circa (**Figura 4-13**).

Porzioni di roccia con RQD più bassi si riscontrano tra i 19 e i 20 m da p.c. (10%<RQD<20%), tra i 35 e i 38 m (RQD=30%, con una porzione rocciosa più ammalorata con RQD=0%, tra i 36 e i 37m da p.c.), tra i 44 e i 50 m da p.c. (0%<RQD<40%), tra 54 e 55 m e tra 60 e 62 m da p.c. (RQD=40%), tra 71 e 72 m (RQD=30%), %), tra 96 e 97 m (RQD=40%) e tra 97 e 99 m (RQD=0%) (**Figura 4-14**).

A partire dai 100 m da p.c., fino a fine sondaggio, la roccia risulta di ottima qualità e presenta un RQD costante pari al 100%.



Foto 32. Foto cassetta sondaggio S3C3 da 6,00 m a 9,00 m.

Figura 4-12 – Foto cassetta catalogatrice sondaggio S3/21 (da 6 m a 9 m)



Foto 40. Foto cassetta sondaggio S3C11 da 26,50 m a 29,00 m.

Figura 4-13 – Foto cassetta catalogatrice sondaggio S3/21 (da 26.5 m a 29 m)



	Data	Aprile 2022		
RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	Rev.	01	Pag. 25/60	



Foto 44. Foto cassetta sondaggio S3C15 da 36,00 m a 40,90 m.

Figura 4-14 – Foto cassetta catalogatrice sondaggio S3/21 (da 36 m a 40 m)

In corrispondenza del sondaggio S4 è stato riscontrato un ammasso roccioso composto da paragneiss, generalmente fratturato, con patine d'alterazione arancioni/brune e valori di RQD estremamente variabili (10%<RQD<90%) (Figura 4-15; Figura 4-16), in media pari al 43% circa, lungo tutta la porzione indagata.

I paragneiss, di colore grigio chiaro e grigio scuro (per una maggior presenza di minerali melanocrati), talvolta si presentano con una maggiore scistosità e maggiore quantità di vene di quarzo.

Durante la fase di sondaggio, a circa 20 m da testa foro, è stata rinvenuta la presenza di acqua con notevole portata, non più riscontrata dopo aver estratto i rivestimenti utilizzati durante la perforazione.

È stata evidenziata inoltre la presenza di fratture riempite da concrezioni millimetriche di colore bianco, dovute probabilmente alla circolazione di fluidi che hanno provocato la precipitazione di carbonato di calcio, oltre a patine d'ossidazione brune.



Foto 66. Foto cassetta sondaggio S4C6 da 15,00 a 18,00 m.

Figura 4-15 – Foto cassetta catalogatrice sondaggio S4/21 (da16 m a 18 m)



	Data	Aprile	2022
RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	Rev.	01	Pag. 26/60



Foto 71. Foto cassetta sondaggio S4C11 da 34,00 a 39,00 m.



Down hole

Dai profili di velocità delle onde di compressione (Vp) e delle onde di taglio (Vs) delle prove downhole eseguite in corrispondenza dei sondaggi S2 e S3, fino a una profondità di circa 100 m dal p.c., emerge che, in entrambi i casi, le Vs ottenute presentano valori minimi superiori a 800 m/s, caratteristici del materiale roccia.

Tuttavia, in corrispondenza dei due sondaggi, le velocità di propagazione presentano comportamenti leggermente differenti. In particolare, in corrispondenza del sondaggio S2, i valori di Vs presentano valori più contenuti, che variano da un minimo di 894 m/s a 50 m dal p.c., fino a un massimo di 976 m/s a 100 m, e restituisce un profilo di Vs caratterizzato da incrementi di velocità meno regolari, soprattutto per quanto riguarda i primi 10-15 m di sondaggio circa. Il sondaggio S3, al contrario, presenta valori di Vs più elevati, che variano da un minimo di 1816 m/s, a 50 m dal p.c., fino a un massimo di 2075 m/s a 100 m di profondità, e restituisce un profilo di Vs caratterizzato da una pendenza più regolare.

Tale differenza potrebbe essere causata da una maggior variabilità del grado di fratturazione e/o di alterazione dell'ammasso roccioso, in corrispondenza del sondaggio S2, da 50 a 87 m dal p.c.. Tale ipotesi non può essere verificata attraverso confronto con la stratigrafia, dal momento che i primi 90 m di sondaggio sono stati scavati a distruzione di nucleo e non descritti.

Prove sismiche a rifrazione

A supporto della realizzazione del tratto in rilevato con terre rinforzate, durante la campagna indagini 2021 è stata eseguita un' indagine sismica a rifrazione elaborata con tomografia (TM1), di lunghezza complessiva dello stendimento pari a 112 m. Dall'analisi delle velocità delle onde p è emersa la presenza di uno strato superficiale incoerente di copertura (Vp < 1000 m/s), che raggiunge i 5 - 10 m circa, al di sotto del quale è presente uno strato di spessore variabile con velocità comprese tra i 1000 e i 2500 m/s, poggiante sul substrato roccioso fratturato (velocità comprese tra 2500 e 3500 m/s), tra i 20 e i 25 m circa, fino alle profondità di 25-30 m, dove si ipotizza la presenza del substrato roccioso compatto con velocità di propagazione delle onde p > 3500 m/s.



	Data	Aprile 2	2022
RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	Rev.	01	Pag. 27/60

4.5 Campagna indagini 2022

Per la campagna indagini del 2022, finalizzata alla progettazione definitiva delle opere in esterno della nuova strada in progetto, che collega l'imbocco Sud della galleria in progetto alla galleria paramassi, sono stati eseguiti cinque sondaggi verticali (BH1÷BH5) e sei tomografie sismiche (SF1÷SF6).

Sondaggi

Quota testa		Tipologia co	odoggio	Lunghozzo	Indinaziono	Orientazione	Quota livello	Quota livello
Sondaggio	foro	ripologia solidaggio		Lungnezza	Inclinazione	Unentazione	piezometrico	piezometrico
	(m s.l.m.)	(-)	(m da p.c.)	(m)	(-)	(°)	(m da p.c.)	(m s.l.m.)
BH1	441	carotaggio continuo	12	12	verticale	-		-
BH2	445	carotaggio continuo	6.3	6.3	verticale	-		-
BH3	435	carotaggio continuo	15	15	verticale	-		-
BH4	434	carotaggio continuo	17.4	17.4	verticale	-	429	5
BH5	445	carotaggio continuo	15	15	verticale	-		-

 Tabella 4-4 – Caratteristiche principali dei sondaggi 2022

Nella campagna indagini del 2022 sono stati eseguiti cinque sondaggi geognostici verticali a carotaggio continuo (BH1÷BH5), di cui i sondaggi BH1 e BH2 sono stati eseguiti in prossimità del ponte di Bema, in corrispondenza dell'imbocco Nord della galleria, fino a profondità di 12 m e 6.3 m, rispettivamente, mentre i sondaggi BH3, BH4 e BH5, sono stati eseguiti tra l'imbocco Sud della galleria e la galleria artificiale paramassi. Questi ultimi raggiungono profondità comprese tra i 15 e i 17.4 m.

La stratigrafia riscontrata in corrispondenza dei sondaggi BH1 e BH2 è caratterizzata da una copertura antropica costituita da sottofondo stradale, materiale di riporto (BH1-BH2) e calcestruzzo (solo BH1) con spessore rispettivamente pari a 7 m e 0.6 m, cui segue il substrato roccioso, costituito dallo Gneiss di Morbegno, fino a fine sondaggio (rispettivamente -12 m e -6.3 m dal p.c.).

La qualità della roccia rinvenuta in corrispondenza del sondaggio BH1 risulta molto scadente, profondamente alterata e con valori di RQD bassi (**Figura 4-17**); in corrispondenza del sondaggio BH2 la qualità migliora e i valori di RQD in alcuni tratti salgono fino a quasi l'80% (**Figura 4-18**).

La stratigrafia in corrispondenza del sondaggio BH3 differisce da quelle riscontrate nei sondaggi BH1 e BH2 per la presenza di uno spessore di depositi alluvionali costituiti da ciottoli arrotondati in matrice sabbioso -ghiaiosa, che si colloca tra la copertura di materiale di riporto (tra p.c e 5.8 m) e il substrato roccioso, rinvenuto tra 12.7 m da p.c. e fine sondaggio). (**Figura 4-19**)

In corrispondenza dei sondaggi BH4 e BH5 la copertura antropica superficiale viene sostituita da depositi detritici di versante rispettivamente di 3.4 m e 2 m di spessore, a cui seguono i depositi alluvionali fino a profondità di 12.3 m e 12 m fino alla fine dei sondaggi che si collocano a una profondità di 17.4 (BH4) e 15 m (BH5).

La qualità dell'ammasso roccioso rinvenuto in corrispondenza dei due sondaggi risulta da media a discreta per il sondaggio BH4 (**Figura 4-20**), di poco inferiore per il sondaggio BH5 (**Figura 4-21**).



	Data	Aprile	2022
RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	Rev.	01	Pag. 28/60



Figura 4-17 – Foto cassetta catalogatrice sondaggio BH1 (da 5 m a 10 m)



Figura 4-18 – Foto cassetta catalogatrice sondaggio BH2 (da 0 m a 5 m)



Figura 4-19 - Foto cassetta catalogatrice sondaggio BH3 (da 5 m a 15 m)



	Data	Aprile	2022	
RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	Rev.	01	Pag. 29/60	



Figura 4-20 – Foto cassetta catalogatrice sondaggio BH4 (da 10 m a 15 m)



Figura 4-21 – Foto cassetta catalogatrice sondaggio BH5 (da 10 m a 15 m)

Prove sismiche a rifrazione

Nel corso della campagna d'indagini 2022 è stata prevista l'esecuzione di prove sismiche a rifrazione con interpretazione tomografica (SF1÷SF6), realizzate longitudinalmente alla strada esistente, in prossimità della carreggiata e del bordo esterno della valle, nonché in corrispondenza della rampa sterrata, nelle vicinanze del punto di sbocco della galleria in progetto (SF5).

Indagino		Lunghezza		
muagine	inpologia indagine	stendimento		
SF1	sismica a rifrazione	46		
SF2	sismica a rifrazione	69		
SF3	sismica a rifrazione	46		
SF4	sismica a rifrazione	69		
SF5	sismica a rifrazione	46		
SF6	sismica a rifrazione	46		

Tabella 4-5 – Caratteristiche principali degli stendimenti sismici



	Data	Aprile	2022
RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	Rev.	01	Pag. 30/60

Le prove hanno raggiunto una profondità d'investigazione massima di circa 20-22 m.

Dal confronto tra sondaggi e tomografie, il substrato litoide risulta posizionato all'incirca in corrispondenza del limite di velocità delle onde di compressione Vp=2.500(÷3.000) m/s.

Con questa assunzione, gli spessori minimi di copertura sono riscontrati in corrispondenza dello stendimento SF1 e SF6, dove risultano rispettivamente compresi tra 4 m e 6.5 m e tra 6 m e 7 m, mentre gli spessori massimi sono presenti in corrispondenza degli stendimenti SF2, SF3, SF4 e SF5 e sono compresi tra i 12 m e i 16 m.



 Data
 Aprile 2022

 RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA
 Rev. 01
 Pag.31/60

5 RILIEVI GEOMECCANICI E STRUTTURALI

5.1 Rilievi disponibili

Per lo studio delle caratteristiche geomeccaniche degli ammassi rocciosi interessati dalle opere in progetto, sono disponibili i risultati dei rilievi strutturali di dettaglio eseguiti in corrispondenza o in prossimità della galleria naturale e del tratto stradale in progetto, con particolare riferimento a:

- progetto definitivo/esecutivo vecchio tracciato, 2006: N.2 rilievi geomeccanici (RGM1 e RGM4) eseguiti, rispettivamente, in prossimità dell'imbocco nord e dello sperone di roccia collocato poco più a S-E rispetto all'imbocco sud della galleria;
- progetto definitivo nuovo tracciato, 2021: N.2 rilievi strutturali in corrispondenza dei sondaggi S1 e S4, eseguiti con camera ottica, e N.2 rilievi strutturali in corrispondenza dei sondaggi S2 e S3, eseguiti con sonda acustica<,
- progetto definitivo nuovo tracciato, 2022: N.2 rilievi geomeccanici (RG1 e RG2) eseguiti in prossimità dell'imbocco nord e dello sperone roccioso posizionato dopo l'imbocco sud lungo la strada in direzione di Bema.

5.2 Condizioni geomeccaniche e strutturali locali

5.2.1 Rilievi geomeccanici 2006

RGM1

Il rilievo geomeccanico RGM1 è stato eseguito prossimità dell'imbocco nord della galleria naturale, circa 25 m a NE dal Ponte di Bema.

L'affioramento investigato copre una superficie di circa 100 m² ed è costituito da gneiss debolmente foliati, rossi in superficie e grigio-verdi in frattura, che si presentano alterati e decolorati dall'azione dell'acqua e moderatamente fratturati.

Sono stati individuati tre set di discontinuità, di cui uno di foliazione (Sc1) e due di frattura (K1 e K2).

La famiglia Sc1 è caratterizzata da un profilo planare, con una giacitura media 344/42, chiusa, leggermente alterata, caratterizzata da assenza di riempimento e asciutta. Presenta una spaziatura di 0.3 m e una persistenza del 50%.

La famiglia K1 è caratterizzata da un profilo planare con una giacitura media di 330/80, si presenta leggermente alterata, con un'apertura da 1 mm a 5 mm, riempita da materiale coesivo inattivo e con filtrazione assente. Mostra una spaziatura di 0.4 m e una persistenza del 60%.

La famiglia K2, analogamente alla K1, presenta un profilo planare, con giacitura media di 88/85, e un'apertura da 1 mm a 5 mm, riempita di materiale coesivo e inattivo. Risulta inoltre leggermente alterata e asciutta. È caratterizzata da una spaziatura di 0.1 m e da una persistenza del 70%.

Dal rilievo effettuato è stato individuato un volume roccioso unitario (VRU) massimo, medio e minimo, rispettivamente, di: 0.2 m³, 0.005 m³ e 0.0006 m³.

<u>RGM 4</u>

Il rilievo geomeccanico RGM4 è stato effettuato in prossimità dello sperone di roccia, collocato circa 100 m a SO dell'imbocco sud della galleria naturale e a 220 m circa dal lato sinistro della frana di Bema.

L'affioramento presenta una superficie di circa 260 m², nel quale circa il 40% della roccia si mostra decomposta e/o disgregata in materiale coesivo e il restante 60% si mostra mediamente alterata (decolorata).

L'ammasso roccioso è costituito da paragneiss foliati, rossi in superficie e verdi in frattura, con un



	Data	Aprile	2022
RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	Rev.	01	Pag. 32/60

alto grado di fratturazione, individuato dall'intersezione di tre set di discontinuità di cui un set di foliazione (Sc1) e due set di discontinuità (K2 e K3).

La famiglia Sc1 è caratterizzata da un profilo ondulato con giacitura media 336/42. Le discontinuità risultano chiuse e, di conseguenza, non riempite e asciutte. Presenta una spaziatura di 0.15 m e una persistenza del 60%.

La famiglia K2 mostra un profilo ondulato, con giacitura media 82/76, mediamente alterato, chiuso, senza riempimento e asciutto. Viene segnalata l'alta frequenza di fratturazione che si traduce in una spaziatura che mediamente è di circa 5 cm, ma talvolta si riduce a 2-3 cm.

La famiglia K3 presenta un profilo ondulato con giacitura media 205/75, leggermente alterato, con apertura che varia da 1 a 5 mm, riempita da materiale coesivo e inattivo e non interessata da filtrazione. È caratterizzata da una spaziatura di 0.300 m e da una persistenza del 60%.

Dal rilievo effettuato è stato individuato un volume roccioso unitario (VRU) massimo, medio e minimo, rispettivamente, di: 0.2 m³, 0.005 m³ e 0.0006 m³.

5.2.2 Rilievi geomeccanici 2021

Sondaggio S1

Dal rilievo emerge che nel tratto di foro compreso tra 0 e 25 m di profondità si riscontrano due set di discontinuità principali con giacitura media 40/60 e 360/85, oltre a diverse strutture secondarie disseminate (**Figura 5-1**). Nel tratto di foro successivo, compreso tra i 25 e i 100 m è stata riscontrata una famiglia di discontinuità principale, con giacitura media 85/70 immergente ad alto angolo, disseminata da strutture secondarie.



Figura 5-1 – Diagramma di Schmidt proiettato nell'emisfero inferiore con intervallo di profondità 0-25 m a sinistra e 25-50 m a destra, per il sondaggio S1



RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA Rev.

Data Aprile 2022 Rev. 01 Pag.33/60



Figura 5-2 – Immagine della parete del perforo nel sondaggio S1, tra 12 m e 18.40 m, realizzata mediante telecamera ottica

Sondaggio S2

Lungo tutto il tratto di foro, del sondaggio S2 è stata riscontrata la presenza di una famiglia principale di fratture con giacitura 75/75.



	Data	Aprile	2022
RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	Rev.	01	Pag. 34/60



Figura 5-3 – Diagramma di Schmidt proiettato nell'emisfero inferiore per il sondaggio S2

Sondaggio S3

La famiglia di discontinuità principale, riscontrata lungo il sondaggio S3, presenta una giacitura di 75/70. Inoltre, altre strutture secondarie disseminate sono state rinvenute.



Figura 5-4 – Diagramma di Schmidt proiettato nell'emisfero inferiore per il sondaggio S3



	Data	Aprile	2022
RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	Rev.	01	Pag. 35/60

Sondaggio S4

Nel perforo si riscontra una famiglia principale di discontinuità, la cui giacitura varia con la profondità nel seguente modo:

Famiglia 1:

- 075/80 a profondità comprese tra 0 m e 25m;
- 075/85 a profondità comprese tra 25 m e 50 m;
- 090/80 a profondità comprese tra 50 m e 75m;
- 070/75 a profondità comprese tra 75 m e 100m.

Inoltre, vengono identificate: una famiglia con giacitura 70/50 nel primo tratto indagato del sondaggio, dai 0 m ai 25 m di profondità, e ulteriori fratture secondarie, oltre alla famiglia principale, nel tratto compreso tra i 50 e i 100 m.



Figura 5-5 – Diagramma di Schmidt proiettato nell'emisfero inferiore con intervallo di profondità 0-25 m a sinistra e 75-100 m a destra, per il sondaggio S4

Da quanto sopra riportato, si osserva come per i quattro sondaggi si presenti un trend di giaciture medie, comprese tra 75/70 e 80/90, verosimilmente corrispondente al set K2 descritto nei rilievi geomeccanici (§ 5.2.1), che dunque si estende a tutto l'ammasso roccioso.





 Data
 Aprile 2022

 RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA
 Rev.
 01
 Pag.36/60



Figura 5-6 – Immagine della parete del perforo nel sondaggio S4, tra 36.00 m e 43.60 m, realizzata mediante telecamera ottica



	Data	Aprile 2	2022
RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	Rev.	01	Pag. 37/60

5.2.3 Rilievi geomeccanici 2022

Sono state eseguite due stazioni geomeccaniche di dettaglio, la prima (RG01) in corrispondenza dell'imbocco nord della galleria, la seconda (RG02) sullo sperone roccioso poco più a monte dell'imbocco sud, in direzione dell'abitato di Bema.



Figura 5-7 – Stazione di rilievo geomeccanico RG01



Figura 5-8 – Stazione di rilievo geomeccanico RG02



	Data	Aprile	2022
RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	Rev.	01	Pag. 38/60

In **Figura 5-9** sono rappresentate le giaciture medie delle famiglie di discontinuità in corrispondenza della stazione RG01.

Sono identificate quattro famiglie: K1, K2, K3 e K4 rispettivamente immergenti a nord-est (068/85), nord ovest (301/79), sud ovest (222/26) e sud est (154/65). Tutti i set sono inclinati con un angolo superiore a 60° a eccezione della famiglia K3 che risulta suborizzontale.



Figura 5-9 – Diagramma di Schmidt proiettato nell'emisfero inferiore in corrispondenza della stazione RG 01

Set fratture	Immersione	Inclinazione
(-)	(°)	(°)
K1	068	85
К2	301	79
К3	222	26
К4	154	65

 Tabella
 5-1 – Immersione e inclinazione delle discontinuità rilevate alla stazione RG 01

Le caratteristiche di dettaglio delle discontinuità e la loro interpretazione geomeccanica sono discusse nel paragrafo 6.2.



	Data	Aprile	2022
RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	Rev.	01	Pag. 39/60

In **Figura 5-10**sono rappresentate le giaciture medie delle famiglie di discontinuità in corrispondenza della stazione RG02.

Sono state individuate quattro famiglie: il set K1 immerge verso sud est (171/74), K2 verso nord est (079/89), K3 e K4 verso nord ovest rispettivamente con le seguenti giaciture: 346/13 e 317/46.



Figura 5-10 – Fratture che pervadono l'ammasso roccioso in corrispondenza della stazione RG 02.

Set fratture	Immersione	Inclinazione
(-)	(°)	(°)
K1	171	74
K2	079	89
К3	346	13
К4	317	46

Tabella 5-2 – Immersione e inclinazione delle discontinuità rilevate alla stazione RG 02

Le caratteristiche di dettaglio delle discontinuità e la loro interpretazione geomeccanica sono discusse nel paragrafo 6.2.



RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA

Data Aprile 2022 Rev. 01 Pag.40/60

6 MODELLO GEOLOGICO E CARATTERIZZAZIONE DELL'AMMASSO ROCCIOSO

6.1 Frana di Bema

6.1.1 Modello geologico

Gli studi condotti sulla frana di Bema hanno riconosciuto l'origine strutturale del dissesto, connessa sia al profondo grado di fratturazione e alterazione dell'ammasso roccioso in alcuni settori di versante sia alla presenza di fasci di faglie che ne hanno favorito la genesi, con progressivo incremento del disequilibrio gravitativo per evoluzione dell'incisione del torrente Bitto.

Negli anni successivi all'evento del 1987, sono state eseguite indagini geognostiche nella parte sommitale della frana (**Figura 3-2**), da cui è emersa la presenza di due zone sensibilmente differenti. Il substrato roccioso a monte della nicchia principale della frana appare compatto e qualificato da una modesta fratturazione e alterazione, mentre la zona nella quale si sviluppa il dissesto è costituita da rocce intensamente fratturate e alterate, fino a una profondità di circa 35 m, con fenomeni di rilascio tensionale e intensa circolazione idrica.

Nella parte sommitale della frana sono evidenti fenomeni di arretramento del fronte della nicchia di distacco, in cui si verificano progressivi, modesti crolli di materiale lapideo e smottamenti della coltre di copertura.

I sondaggi eseguiti in tempi più recenti al piede della frana, a supporto del progetto definitivo del 2007, rilevano (in particolare S4) uno spessore di circa 40 m di terreni sciolto, di cui i primi 20 m sono formati dal materiale eterogeneo e sub-angoloso dell'accumulo di frana, mentre in profondità si rinvengono ciottoli e ghiaie arrotondata di evidente origine alluvionale.

Per l'attuale fase di progettazione, all'interno del corpo di frana sono stati eseguiti due sondaggi (S2 e S3, descritti al paragrafo 4.4). In particolare, il sondaggio S2 è stato eseguito a distruzione fino a 90 m da p.c. e successivamente a carotaggio continuo fino a una profondità di 110 m. Nel rapporto conclusivo d'indagine di cui a Rif. [9] è segnalato che la parte superficiale, fino a circa -46 m, è costituita da materiale sciolto e substrato roccioso molto alterato. In profondità, nel tratto a carotaggio continuo, tra -90 m e -92 m da p.c. e tra -100 m e -102 m da pc, sono presenti due porzioni in cui l'ammasso roccioso risulta fratturato, con valore di RQD inferiore al 30%. Il sondaggio S3 è stato eseguito a carotaggio continuo fino a 111 m dal locale piano campagna. Lungo la verticale, fino a -8 m, è stato rilevato materiale sciolto eterogeneo e sub-angoloso del deposito superficiale di frana; tra -36 m e -41 m e tra -46 m e -50 m da p.c. sono state rilevate due porzioni di ammasso roccioso molto fratturate, anche in queste porzioni con RQD inferiore a 30%, così come tra -71 m e -73 m e tra -96 m e -100 m.

Sulla base dei sondaggi analizzati e dei dati raccolti, è possibile ipotizzare la presenza di due superfici di scivolamento che caratterizzano il versante in frana. La superficie più superficiale attraversa il sondaggio S2 alla profondità di circa 46m da p.c. e il sondaggio S3 alla quota di circa 8 m da p.c., scollando i depositi sciolti più superficiali dall'ammasso roccioso circostante. L'evidenza morfologica sul terreno di questo piano di scivolamento è la nicchia di frana più interna. La superficie più profonda è stata associata, in corrispondenza del sondaggio S3, nel tratto tra 36 m e 50 m da p.c., dove l'ammasso roccioso risulta più fratturato. Poiché il foro del sondaggio S2 è stato eseguito a distruzione, non si ha evidenza di porzioni fratturate dell'ammasso roccioso a una quota compatibile, pertanto non è possibile definire con certezza l'andamento di questa superficie, ma si possono ipotizzare due scenari di sviluppo: nel primo caso la superficie di scivolamento potrebbe essersi impostata solo sul fianco destro del versante per poi unirsi a quella più superficiale nella porzione centrale, interrompendo così la sua continuità laterale. Nel secondo caso si può ipotizzare che la superficie di frana abbia una maggiore continuità laterale e che si sviluppi alcuni metri più in profondità rispetto al piano di scivolamento superficiale, come rappresentato in **Figura 6-1**.



	Data	a Aprile 2022 /. 01 Pag.43	2022
RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	Rev.	01	Pag. 41/60

Sul terreno l'espressione di questa struttura più profonda è correlabile con le fratture di trazione individuate poco più a valle dell'abitato di Bema e a monte della nicchia di distacco interna. Nella carta geologica e geomorfologica tale struttura è stata rappresenta come una possibile evoluzione del dissesto.



Figura 6-1 – Sezione in asse frana (in retino grigio nei sondaggi tratti con RQD<30%)

Le porzioni di ammasso roccioso fratturato presenti in profondità, oltre i 90 m da p.c., sono correlabili a zone in cui si è verificato un accumulo di sforzi gravitativi che hanno causato locali deformazioni e rotture dell'ammasso roccioso. A questa profondità l'ammasso roccioso risulta meno fratturato rispetto ai settori più superficiali; pertanto, si ritiene che in questa zona non sia evoluta una superficie di scivolamento su cui la frana ha accumulato movimento, ma solo zone di concentrazione e localizzazione degli sforzi gravitativi, con rotazione dei piani principali di sforzo.

6.1.2 Monitoraggi

A partire dall'inizio degli anni Novanta, nella zona di frana è stata installata una rete di monitoraggio. Come riportato nella relazione redatta da Studio Griffini (Rif. 3), la strumentazione è stata attivata per il controllo di una temuta evoluzione meridionale dell'area di frana; tutti gli strumenti sono stati ubicati in zona non significativa rispetto alla frana storica, che si trova più a nord dell'area monitorata, e solo tre mire ottiche (MO 05, MO 08, MO 09) sono state installate in prossimità del margine

meridionale del coronamento della frana.



 Data
 Aprile 2022

 RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA
 Rev. 01
 Pag.42/60

Le misure eseguite tra il 1989 e il 2008 mostrano spostamenti medi annui nell'ordine di alcuni mm sino a 10 mm circa, con un picco massimo di spostamento pari a 34 mm. Le direzioni di spostamento risultano compatibili con la topografia dell'area. I maggiori valori di spostamento sono stati registrati nel 2002, quando in circa 2 mesi sono stati accumulati spostamenti per circa 100 mm. Le misure indicano un lento e progressivo movimento con occasionali accelerazioni dovuti alle forzanti idrologiche connesse a piogge intense e prolungate.

A partire dal 1992 l'area è altresì monitorata mediante interferometria radar da satellite. I dati raccolti tra il 1992 e il 2014 indicano movimenti lungo la LOS (linea di vista satellite/bersaglio) compresi tra 2.5 mm/anno e 10 mm/anno, i valori massimi si riscontrano in alcuni punti all'interno della nicchia della frana storica.

Il sistema di monitoraggio profondo nel periodo tra il 1991 e il 2001 non ha rilevato né movimenti rilevanti né superfici di scivolamento evidenti e i movimenti registrati degli estensimetri profondi raramente sono stati superiori ad 1 mm/anno.

Sulla base dei dati analizzati si ipotizza che, seppur non si siano più verificati eventi franosi dopo il 1987, la frana in oggetto sia soggetta, comunque, a lenti e progressivi spostamenti. Si ipotizza che tale movimento coinvolga la porzione più superficiale del versante, fino a 60 m di profondità, e che sia localizzato lungo le due superficie di scivolamento individuate.

La galleria in progetto, al di sotto della frana, ha una copertura compresa tra i 90 m e 100 m; si esclude quindi che possa essere intersecata dalle superfici di scivolamento che generano i maggiori movimenti del corpo di frana.

6.1 Modello geologico di tracciato

La galleria sarà interamente sviluppata all'interno delle rocce appartenenti alla formazione degli Gneiss di Morbegno.

Dai rilievi strutturali in affioramento e da quelli in perforo si riscontra la presenza di una famiglia di discontinuità predominante corrispondente alla scistosità.

È prevedibile che questo assetto geologico e geomeccanico sia riscontrabile per l'intero sviluppo della galleria; tuttavia, fanno eccezione le aree di imbocco e le fasce tettonizzate, dove sono state rilevate ulteriori famiglie di discontinuità e un maggiore disturbo dell'ammasso roccioso.

All'imbocco nord della galleria, il rilievo geomeccanico di dettaglio ha evidenziato la presenza di quattro famiglie di discontinuità, mentre i rilievi strutturali nei primi 20m del sondaggio S1 mostrano, come riportato in **Figura 5-5**, un'elevata dispersione delle fratture, sintomo di un ammasso roccioso particolarmente fratturato. Più all'interno del versante, la frequenza delle discontinuità diminuisce e la qualità dell'ammasso roccioso migliora, facendo ritenere plausibile l'ipotesi di un miglioramento delle condizioni d'ammasso lungo lo sviluppo della galleria, fino alle fasce tettonizzate note o altre non evidenti dai rilievi di superficie.

All'imbocco sud il sondaggio S4 ha rilevato, nei primi 20 m, un ammasso roccioso molto fratturato, con valori di RQD poco superiori al 30%. Nella successiva parte del sondaggio i valori di RQD tendono ad aumentare ed è, anche in questo caso, plausibile attendersi un miglioramento delle condizioni dell'ammasso roccioso lungo lo sviluppo della galleria, fino alle fasce tettonizzate note o altre non evidenti dai rilievi di superficie.

In corrispondenza delle zone di faglia e delle fasce tettonizzate, è previsto un ammasso roccioso profondamente fratturato e alterato.

Come discusso al paragrafo 3.2, è previsto che lungo il tracciato della galleria siano intercettate due fasce tettonizzate, entrambe con assetto subverticale; la prima, costituita da due faglie affiancate, si



 Data
 Aprile 2022

 RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA
 Rev.
 01
 Pag.43/60

ipotizza sia posta a circa 370 m dall'imbocco nord, con ampiezza della porzione maggiormente fratturata (e, localmente, cataclasata) di circa 50m. La seconda fascia tettonizzata si ipotizza interessata da una singola faglia, intercettata intorno alla pk 650 ca, con un'ampiezza di circa 40 m.

Sotto il profilo geomeccanico, il sondaggio S3 (25 m fuori asse rispetto al tracciato) segnala, poco sotto la base della galleria, un tratto di circa 4 m con valori di RQD molto bassi (< 30%). Per la zona di faglia lato Bema non si dispone di analoghe informazioni ricavate da indagini geognostiche ma si ipotizza un equivalente grado di fratturazione.

Sulla base dei rilievi strutturali di dettaglio e dei sondaggi disponibili, già discussi in dettaglio al paragrafo 5, l'ammasso roccioso è stato suddiviso per tratte omogenee in accordo ai criteri di classificazione: RMR (Beniawski 1974; 1989), GSI (Hoek et al.1995; 2002; 2006) e Q-System; per la caratterizzazione geomeccanica delle discontinuità è adottato il criterio di Barton e Chouby (1977).



Figura 6-2 – Profilo longitudinale interpretativo lungo il tracciato della galleria

6.1.1 Rock Mass Rating (RMR)

L'indice di RMR proposto da Beniawski (in Rif. [25]) viene calcolato attribuendo e sommando un punteggio, crescente con il miglioramento delle condizioni, ai sei parametri sotto riportati:

- 1. A1: resistenza alla compressione monoassiale del litotipo intatto (σ_c);
- 2. A2: recupero percentuale modificato (RQD);
- 3. A3: spaziatura delle discontinuità (Sn);
- 4. A4: condizione delle discontinuità;
- 5. A5: condizioni idrogeologiche;
- 6. B: orientazione delle discontinuità in riferimento all'asse dell'opera in progetto.

Dalla somma dei primi cinque parametri, si ottiene un punteggio compreso da 0 a 100, definito RMR di base (RMR_b), che descrive la qualità dell'ammasso roccioso. Con la somma RMR_b + B, si ottiene il punteggio RMR finale, anch'esso compreso tra 0 e 100, che integra l'informazione relativa alla



 Data
 Aprile 2022

 RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA
 Rev. 01
 Pag.44/60

orientazione della giacitura delle discontinuità d'ammasso rispetto all'asse dell'opera.

Nella tabella seguente sono riportati i valori assegnati per tratte progressive omogenee lungo lo sviluppo della galleria.

		A1	A2	A3	A4	A5	В							
da pk a pk		ucs	RQD	Spaziatura	Condizione discontinutià	Acqua sotterranea	Correzione per l'orientazione delle discontinutià	Persistenza	Apertura	Rugosità	Riempimento	Alterazione	RMR _b	RMR
62.83	82.29	4	8	8	17	4	-5	2	1	5	6	3	41	36
82.29	136.14	4	17	10	22	4	-5	4	1	5	6	6	57	52
136.14	434.45	4	17	10	22	7	-5	4	1	5	6	6	60	55
434.45	484.45	4	5	5	19	4	-5	2	1	5	6	5	37	32
484.45	537.52	4	8	8	18	4	-5	1	1	5	6	5	42	37
537.52	557.52	4	5	8	16	4	-5	1	1	5	6	3	37	32
557.52	657.38	4	8	8	18	4	-5	1	1	5	6	5	42	37
657.38	697.38	4	5	5	19	4	-5	2	1	5	6	5	37	32
697.38	750.37	4	13	8	23	7	-5	6	1	5	6	5	55	50
750.37	815.37	4	8	8	20	4	-5	4	4	5	4	3	44	39
815.37	840.98	4	8	8	16	4	-5	1	1	5	6	3	40	35

Tabella 6-1 – Valori di RMR per tratte omogenee in galleria

Per RMR, si ottiene il valore più basso, pari a 31, in corrispondenza delle zone di faglia ipotizzate. Valori di RMR poco superiori, compresi tra 36 e 42, sono stati stimati per le tratte comprese tra le due faglie e per i due settori di imbocco. L'ammasso roccioso in queste tratte rientra in Classe IV, scadente. Nei restanti settori della galleria il valore medio di RMR è pari a 51, corrispondente alla Classe III, discreto.

6.1.2 Geological Strength Index (GSI)

L'indice GSI, proposto da Hoek et al. (Rif. [25]) e Cai (Rif. [26]), viene agevolmente stimato a partire dall'esame qualitativo del grado di fratturazione dell'ammasso roccioso e dalle condizioni di alterazione dei giunti, come riportato in **Figura 6-3**.

Sulla base delle informazioni derivanti dai sondaggi orizzontali eseguiti nei due imbocchi e dei rilievi strutturali di dettaglio disponibili, si ricavano i seguenti valori di GSI per tratte omogenee.

Nelle tratte non investigate, il valore di GSI è stato definito dalla relazione GSI= RMR₈₉ – 5 (in Rif. [24]).

Nella tabella seguente sono riportati i valori assegnati per tratte progressive omogenee lungo lo sviluppo della galleria.

da pk	a pk	RMR _b	RMR	GSI	GSI
62.02				26	20.40
62.83	82.29	41	36	36	30-40
82.29	136.14	57	52	52	45-55
136.14	434.45	60	55	55	40-60
434.45	484.45	37	32	32	25-35
484.45	537.52	42	37	37	35-45
537.52	557.52	37	32	32	25-35
557.52	657.38	42	37	37	35-45
657.38	697.38	37	32	32	25-35
697.38	750.37	55	50	50	40-60
750.37	815.37	44	39	39	35-45
815.37	840.98	40	35	35	30-40

Tabella 6-2 – Valori di RMR e GSI per tratte omogenee



	Data	Aprile	2022
RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	Rev.	01	Pag. 45/60





6.1.3 Classificazione di Barton: Q-system

L'indice di Barton Q è ricavato dalla seguente equazione:

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n}\right) \cdot \left(\frac{J_r}{J_a}\right) \cdot \left(\frac{J_w}{SFR}\right)$$

in cui:

- RQD (Rock Quality Designation), secondo Deer e Miller (Rif. [27]);
- Jn (Joint Set Number), che dipende dal numero di famiglie di discontinuità nell'ammasso roccioso;
- Jr (Joint Roughness Number), che dipende dalla rugosità della famiglia più sfavorevole;



	Data	Aprile	2022
RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	Rev.	01	Pag. 46/60

- J_a (Joint Alteration Number), che dipende dal grado di alterazione delle fratture, dallo spessore e dalla natura del riempimento, ugualmente determinato sulla famiglia più sfavorevole;
- J_w (Joint Water Number), che dipende dalle condizioni idrogeologiche;
- SFR (Stress Reduction Factor), che è funzione dello stato tensionale in rocce massive o dal disturbo tettonico.

Nell'equazione di Q, il primo quoziente (RQD/J_n) è rappresentativo della dimensione dei blocchi isolati del sistema fessurativo, il secondo (J_r/J_a) è rappresentativo delle resistenze attritive disponibili nei blocchi, il terzo (J_w/SRF) tiene conto dell'influenza della circolazione d'acqua nell'ammasso e dello stato tensionale al contorno.

Nella tabella seguente sono riportati i valori assegnati per tratte progressive omogenee lungo lo sviluppo della galleria.

da pk	a pk	RQD	Jn	Jr	Ja	Jw	SFR	Q	Classification
62.83	82.83	40	12	3	1	0.5	7.5	0.7	Very Poor
82.83	136.83	70	4	3	1	0.5	2	13.1	Good
136.83	434.83	70	4	3	1	0.66	2	17.3	Good
434.83	484.83	40	12	3	2	0.5	7.5	0.3	Very Poor
484.83	537.83	50	12	3	2	0.66	7.5	0.6	Very Poor
537.83	557.83	40	12	3	2	0.5	7.5	0.3	Very Poor
557.83	655.83	50	12	3	2	0.66	7.5	0.6	Very Poor
655.83	705.83	40	12	3	2	0.66	7.5	0.4	Very Poor
705.83	742.83	60	4	3	1	0.66	2	14.9	Good
742.83	807.83	40	4	3	1	0.5	2	7.5	Fair
807.83	833.83	30	12	3	1	0.5	7.5	0.5	Very Poor

Tabella 6-3 – Classificazione parametrica di Barton per tratte omogenee

6.2 Caratterizzazione dell'ammasso roccioso

6.2.1 Volume roccioso unitario

L'analisi del comportamento meccanico dell'ammasso roccioso prevede la valutazione del Volume Roccioso Unitario (VRU), inteso quale volume statisticamente rappresentativo del blocco di matrice litoide isolata da discontinuità strutturali completamente persistenti (**Figura 6-4**).



Figura 6-4 – Schematizzazione dei sistemi di discontinuità in un volume unitario di ammasso roccioso



RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA

 Data
 Aprile 2022

 Rev.
 01
 Pag.47/60

Il VRU può essere ricavato in accordo alle seguenti espressioni (Rif. [23]):

$$VRU^{(0)} = S_m^3$$
$$VRU^{(1)} = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot \dots \cdot S_i$$
$$VRU^{(2)} = \frac{S_1 \cdot S_2 \cdot S_3}{sin\gamma_1 \cdot sin\gamma_2 \cdot sin\gamma_3}$$

In cui:

 $S_m = (S_1 + S_2 + S_3)/3$ spaziatura media delle tre discontinuità;

 S_1, S_2, S_3 spaziature medie delle famiglie di discontinuità;

*γ*₁, *γ*₂, *γ*₃, angoli convessi formati reciprocamente dai piani delle discontinuità.

È stato inoltre valutato il Volumetric Joint Count (J_v), definito come il numero di fratture che intersecano un volume pari a 1 m³ (Rif. [23]), attraverso la seguente espressione:

$$J_{v} = \frac{1}{S_{1}} + \frac{1}{S_{2}} + \frac{1}{S_{3}}$$
$$V_{b} = \beta \cdot J_{v}^{-3}$$

Di seguito si riportano i risultati ottenuti per le discontinuità che caratterizzano l'ammasso roccioso in corrispondenza delle stazioni di rilevo strutturale eseguite (§ 5.2.3).

	BEMA - IMBOCCO NORD								
Famiglia discontinuità		Spaziatura							
[-]		[m]							
	K1	K2	K3	K4					
Medio (K1-K2-K3-K4)	0.23	0.13	0.35	0.20					
Minimo (K1-K2-K3-K4)	0.04	0.04	0.06	0.05					
Massimo (K1-K2-K3-K4)	0.53	0.60	0.68	0.50					

Гabella	6-4 - Spaziature,	massime, me	die e minime	dei giunti	rilevate all'imbocco nord
---------	-------------------	-------------	--------------	------------	---------------------------

BEMA - IMBOCCO NORD												
CALCOLO DEL VOLUME ROCCIOSO UNITARIO												
$VRU^{(0)} = S_m^3 \qquad VRU^{(1)} = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot \dots \cdot S_l \qquad VRU^{(2)} = \frac{S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot \dots \cdot S_l}{sin\gamma_1 \cdot sin\gamma_2 \cdot sin\gamma_3 \cdot \dots \cdot sin\gamma_l} \qquad J_\nu = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} \qquad V_b = \beta \cdot J_\nu^{-3}$												
n	r			r			r					
Famiglia							(0)	(1)	(2)			
discontinuità	S	paziatura		Ar	ngolo relati	vo	VRU ⁽⁰⁾	VRU ⁽¹⁾	VRU ⁽²⁾	J _v	b	Vb
		[m]			[°]		[m ³]	[m ³]	[m ³]	[j/m³]	(-)	[m ⁻³]
K1-K2-K3	0.23	0.13	0.35	83	50	71	0.01	0.01	0.01	14.90	50.00	0.02
K1-K2-K4	0.23	0.13	0.20	83	49	83	0.01	0.01	0.01	17.04	50.00	0.01
K1-K3-K4	0.23	0.35	0.20	71	41	83	0.02	0.02	0.03	12.20	50.00	0.03
K2-K3-K4	0.13	0.35	0.20	50	41	49	0.01	0.01	0.02	15.55	50.00	0.01
							0.012	0.010	0.018	14 92		0.017

Tabella 6-5 – Stima del VRU per le diverse famiglie di discontinuità

	Data	Aprile	2022
RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	Rev.	01	Pag. 48/60

Il volume roccioso unitario ottenuto è stato calcolato con i valori medi della spaziatura di ogni famiglia. Il volume unitario calcolato con l'espressione VRU⁽⁰⁾ è compreso tra 0.01÷0.02 m³, con VRU⁽¹⁾ tra 0.01÷0.02 m³ e con VRU⁽²⁾, che tiene conto della correzione degli angoli relativi tra le famiglie, è compreso tra circa 0.01 ÷ 0.03 m³.

Il Volumetric Joint Count (Jv) è compreso tra $12\div17$ J/m³ con valore medio dell'ordine di 13 J/m³, mentre il volume block (V_b) ricavato con un fattore forma (b) pari a 50 è compreso tra 0.01 ÷ 0.03 m³ con un valore medio di 0.02 m³.

Il volume roccioso unitario calcolato a partire dai valori medi di spaziatura risulta piccolo e poco significativo per la verifica di stabilità dei blocchi di roccia; pertanto, a tale scopo è stato considerato il VRU calcolato a partire dalle spaziature massime, pari a 0.3 m³.

Di seguito si riportano i risultati ottenuti per le discontinuità che caratterizzano l'ammasso roccioso in corrispondenza dello sperone di roccia.

BEMA - SPERONE							
Famiglia discontinuità		Spaziatura					
		[m]					
	K1 K2 K3 K4						
Medio (K1-K2-K3-K4)	0.27	0.11	0.28	0.15			
Minimo (K1-K2-K3-K4)	0.05	0.04	0.06	0.05			
Massimo (K1-K2-K3-K4)	0.46	0.25	0.80	0.25			

Tabella 6-6 – Spaziature, massime, medie e minime dei giunti rilevate allo sperone roccioso

	BEMA - SPERONE ROCCIOSO											
	CALCOLO DEL VOLUME ROCCIOSO UNITARIO											
r												
$VRU^{(0)} = S_m^3 \qquad VRU^{(1)} = S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot \dots \cdot S_i \qquad VRU^{(2)} = \frac{S_1 \cdot S_2 \cdot S_3 \cdot \dots \cdot S_i}{sin\gamma_1 \cdot sin\gamma_2 \cdot sin\gamma_3 \cdot \dots \cdot sin\gamma_i} \qquad J_\nu = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} \qquad V_b = \beta \cdot J_\nu^{-3}$												
				-				-				
Famiglia							(0)	(1)	(2)			
discontinuità	S	paziatura		Ar	ngolo relati	vo	VRU ⁽⁰⁾	VRU ⁽¹⁾	VRU ⁽²⁾	Jv	b	Vb
		[m]			[°]		[m ³]	[m ³]	[m ³]	[j/m ³]	(-)	[m ⁻³]
K1-K2-K3	0.27	0.11	0.28	88	89	86	0.01	0.01	0.01	16.37	50.00	0.01
K1-K2-K4	0.27	0.11	0.15	0.15 88 68 67 0.01 0.00 0.01 19.46 50.00 0.01					0.01			
K1-K3-K4	0.27	0.28	0.15	86 35 67 0.01 0.01 0.02 13.94 50.00 0					0.02			
K2-K3-K4	0.11	0.28	0.15	89	35	68	0.01	0.00	0.01	19.33	50.00	0.01
							0.009	0.007	0.011	17.27		0.011

Tabella 6-7 – Stima del VRU per le diverse famiglie di discontinuità

Il volume roccioso unitario ottenuto è stato calcolato con i valori medi della spaziatura di ogni famiglia. Il volume unitario calcolato con l'espressione VRU(0) è pari a 0.01 m³, con VRU(1) compreso tra 0.01 \div 0.02 m³ e con VRU(2), che tiene conto della correzione degli angoli relativi tra le famiglie, è variabile tra circa 0.01 \div 0.02 m³.

Il Volumetric Joint Count (Jv) è compreso tra 13 ÷ 19 J/m³ con valor medio dell'ordine di 17 J/m³, mentre il volume block (V_b) ricavato con un fattore forma (b) pari a 50 è compreso tra 0.01÷0.02 m³ con un valore medio di 0.011 m³.



 Data
 Aprile 2022

 RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA
 Rev.
 01
 Pag.49/60

Il volume roccioso unitario calcolato a partire dai valori medi di spaziatura risulta piccolo; pertanto, ai fini della verifica di stabilità dei cunei è stato considerato il VRU calcolato a partire dalle spaziature massime che risulta pari a 0.128 m³.

6.2.2 Volume di progetto dei blocchi

Al fine di effettuare le analisi traiettografiche di caduta massi, che permettono di determinare il percorso, la distribuzione statistica degli arresti e l'energia cinetica trasmessa da uno o più blocchi di roccia sulle barriere di difesa, è necessario definire il volume di progetto delle porzioni d'ammasso roccioso potenzialmente coinvolti nel fenomeno.

Le discontinuità che separano la matrice litoide nell'ammasso fratturato sono caratterizzate da una persistenza areale variabile, correlata all'estensione dei cosiddetti ponti in roccia.

Al variare della persistenza delle fratture, varia il volume dei blocchi (intesi come porzioni potenzialmente instabili d'ammasso) e, in correlazione inversa, la probabilità che il masso si frammenti nel percorso di caduta e/o rotolamento.

Rispetto al volume roccioso unitario, utilizzato per le verifiche di stabilità degli scivolamenti a cuneo e planari delle pareti di scavo, in cui è considerata una persistenza completa delle fratture, corrispondente alla condizione con maggiore probabilità di distacco, per la stima del volume del blocco di progetto (p95) da utilizzare nelle simulazioni di caduta massi, è stata stimata una persistenza parziale sulla base dei rilievi geomeccanici eseguiti (§ 5.2.3).

Questo approccio considera un maggiore volume del blocco di progetto, seppur caratterizzato da una minore probabilità di evento ma rappresentativo degli eventi estremi nei riguardi dei quali è occorre progettare le opere.

A questo scopo, è stata utilizzata la seguente espressione, in cui p_i rappresenta la persistenza dell'*i*-esima famiglia di giunto (Rif. [26]), indicate in **Tabella 6-8**:

$$V_b = \frac{S_1 \cdot S_2 \cdot S_3}{\sin\gamma_1 \cdot \sin\gamma_2 \cdot \sin\gamma_3 \cdot \sqrt[3]{p_1 \cdot p_2 \cdot p_3}}$$

IMBOCC	O NORD	SPERONE R	OCCIOSO
Discontinuità	Persistenza	Discontinuità	Persistenza
[-]	[%]	[-]	[%]
K1	70	K1	60
К2	60	К2	60
КЗ	20	КЗ	10
K4	20	K4	10

Tabella 6-8 – Valori di persistenza areale stimati per le diverse famiglie di discontinuità

I risultati ottenuti assegnano volumi variabili tra 0.4 m³ e 1.8 m³, con valor medio di circa 1 m³, coerente con alcuni riscontri di massi intercettati e bloccati dalla vegetazione documentati sui versanti in esame.



	Data	Aprile	2022
RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	Rev.	01	Pag. 50/60



Figura 6-5 - Masso intercettato dalla vegetazione

6.2.3 Caratterizzazione geomeccanica dei giunti

La resistenza meccanica dei giunti può essere stimata mediante l'equazione di Barton e Chouby (Rif. [28]), valida per giunti scabri non cementati ed espressa come:

$$\tau_n = \sigma_n tan \left(\varphi_b + JRC \log \frac{JCS}{\sigma_n}\right)$$

in cui:

 σ_n = tensione normale alla superficie di giunto;

 φ_{b} = angolo di attrito di base;

JRC = parametro relativo alla scabrezza dei giunti;

JCS = resistenza a compressione uniassiale sulla superficie del giunto.

Per i litotipi di tessitura gneissica, l'angolo di attrito di base ϕ_b è compreso tra 29° e 35°; in assenza di prove sperimentali è stato assegnato un valore intermedio di 31°.

Per il valore resistenza alla compressione monoassiale del giunto (Joint Compressive Strength - JCS) è stata utilizzato il grafico proposto da Miller (Rif.[27]).

La resistenza alla compressione dei giunti rocciosi JCS, misurata in campo mediante sclerometro, ha fornito, per tutte le famiglie di discontinuità rilevate all'imbocco nord un valore pari a 32 MPa e per quelle in corrispondenza dello sperone roccioso un valore di 24 MPa.

Tenuto altresì conto che le misure sperimentali investigano una parte limitata della estensione dei giunti di discontinuità (L_0), i risultati di JSC₀ e JRC₀ devono essere corretti per la lunghezza reale (L_n) di persistenza dei giunti di discontinuità, JRC_n e JCS_n, secondo le seguenti espressioni:

$$JRC_{n} = JRC_{0} \left(\frac{L_{n}}{L_{0}}\right)^{-0.02 JRC_{0}}$$
$$JCS_{n} = JCS_{0} \left(\frac{L_{n}}{L_{0}}\right)^{-0.03 JRC_{0}}$$



	Data	Aprile 2022		
RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	Rev.	01	Pag.5	

01 Pag.**51/60**

Per l'imbocco nord è stato assunto $L_0 = 10$ cm e $L_n = 20$ m, pari alla lunghezza dello stendimento. Per lo sperone roccioso è stato assunto $L_0 = 10$ cm e $L_n = 15$ m.

I valori considerati nelle verifiche all'equilibrio limite dei cunei sono:

- per l'imbocco nord, JCS pari a 17 MPa e JRC pari a 3;
- per lo sperone roccioso, JCS pari a 13 MPa e JRC pari a 3.

Volendo correlare il criterio di rottura Barton-Choubey al criterio di rottura lineare Mohr-Coulomb, devono essere ricercati i valori di φ_i e c_i (angolo di resistenza al taglio e coesione intercetta del giunto) che meglio approssimino l'andamento della curva di resistenza curvilinea. I valori di φ_i e c_i, validi localmente in funzione dell'intervallo di variazione della tensione normale alla superficie di giunto σ_n , possono essere ottenuti per differenziazione dell'espressione del criterio Barton-Choubey:

$$\frac{\partial \tau_{s}}{\partial \sigma_{n}} = \tan \left[JRC_{n} \log \left(\frac{JCS_{n}}{\sigma_{n}} \right) + \varphi_{b} \right] - \frac{JRC_{n}}{\ln 10} \left\{ 1 + \tan^{2} \left[RC_{n} \log \left(\frac{JCS_{n}}{\sigma_{n}} \right) + \varphi_{b} \right] \right\}$$
$$\varphi_{j} = \arctan \left(\frac{\partial \tau_{s}}{\partial \sigma_{n}} \right)$$
$$c_{j} = \tau_{s} - \sigma_{n} \tan \varphi_{j}$$

Occorre, dunque, fissare l'intervallo di variazione della tensione normale alla superficie di giunto, σ_n . Considerato che il fenomeno del distacco di blocchi da una parete rocciosa interessa gli strati più superficiali dell'ammasso, per la valutazione del valore della tensione normale al giunto si è assunta una profondità di 3.5 m corrispondente al seguente valore di σ_n :

$$\sigma_n$$
 = 26·3.5=91.0 kPa \cong 0.10 MPa

In questo intervallo della tensione normale σ_n , , si ricavano i valori di angolo di resistenza al taglio e di coesione lungo il giunto di discontinuità:

 \checkmark Imbocco nord

 \checkmark

c_i = 0.003 MPa = 3 kPa

Sperone roccioso

c_i = 0.003 MPa = 3 kPa

Poiché la linearizzazione di Mohr-Coulomb risulta analoga per le discontinuità rilevate in entrambe le aree, si è deciso di considerare per le verifiche delle opere gli stessi parametri cautelativi sia per l'imbocco nord sia per lo sperone roccioso.

Di seguito si riportano i valori utilizzati.

 $\varphi_i = 35^\circ$ c_i = 0.003 MPa = 3 kPa

I calcoli effettuati sono sintetizzati nelle seguenti tabelle.



RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA

 Data
 Aprile 2022

 Rev.
 01
 Pag.52/60

BEMA - IMBOCCO NORD

RESISTENZA A TAGLIO DEI GIUNTI

Criterio di resistenza di Barton Choubey (1977)

Dati di input

$$\tau_n = \sigma_n \tan\left(\varphi_r + JRC \cdot \log\frac{JCS}{\sigma_n}\right)$$

angolo di attrito di base	φ _b	31.0	[°]
restistenza a compressione del giunto misurata	JCS ₀	32.0	[MPa]
rugosità del giunto misurata	JRC ₀	4.0	[-]
lunghezza giunto	L ₀	10	[cm]
lunghezza stendimento	Ln	20	[m]
restistenza a compressione del giunto corretta	JCS _n	17	[MPa]
rugosità del giunto corretta	JRC _n	3	[-]

Tabella 6-9 - Dati di input per criterio di resistenza di Barton e Choubey (1977) – Imbocco nord

BEMA - SPERONE ROCCIOSO RESISTENZA A TAGLIO DEI GIUNTI Criterio di resistenza di Barton Choubey (1977) Dati di input $\tau_n = \sigma_n \tan\left(\varphi_r + JRC \cdot \log\frac{JCS}{\sigma_n}\right)$ 31.0 angolo di attrito di base [°] φb restistenza a compressione del giunto misurata JCS₀ 24.0 [MPa] rugosità del giunto misurata JRC₀ 4.0 [-] lunghezza giunto L_0 10 [cm] lunghezza stendimento 15 Ln [m]

Tabella 6-10 - Dati di input per criterio di resistenza di Barton e Choubey (1977) – Sperone roccioso

JCS_n

JRC_n

13

3

[MPa]

[-]

restistenza a compressione del giunto corretta

rugosità del giunto corretta



RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA

Data Aprile 2022 01 Rev.

Pag.53/60

BEMA - IMBOCCO NORD RESISTENZA A TAGLIO DEI GIUNTI Criterio di resistenza di Barton Choubey (1977) Criterio di resistenza δτ $\phi_i = \arctan$ $\delta\sigma_n$

$$\frac{\delta \tau}{\delta \sigma_n} = tan \left(JRC \log_{10} \frac{JCS}{\sigma_n} + \phi_r \right) - \frac{\pi JRC}{180 ln 10} \left[tan^2 \left(JRC \log_{10} \frac{JCS}{\sigma_n} + \phi_r \right) + 1 \right]$$

	BC				MC
ση	τ _n	$\delta \tau_n / \delta \sigma_n$	φi	Ci	τ _n
[MPa]	[MPa]	[-]	[°]	[MPa]	[MPa]
0.00	0.00	2.578	69	0.000	0.00
0.08	0.06	0.724	36	0.003	0.06
0.10	0.07	0.718	35.7	0.003	0.07
0.20	0.15	0.697	35	0.006	0.14
0.30	0.21	0.686	34	0.009	0.21
0.40	0.28	0.677	34	0.012	0.28
0.50	0.35	0.671	34	0.015	0.35
0.60	0.42	0.666	34	0.018	0.42
0.70	0.48	0.661	33	0.021	0.49
0.80	0.55	0.657	33	0.023	0.56
0.90	0.61	0.654	33	0.026	0.63
1.00	0.68	0.651	33	0.029	0.70
1.10	0.75	0.648	33	0.032	0.77
1.20	0.81	0.646	33	0.035	0.84
1.30	0.87	0.644	33	0.037	0.91
1.40	0.94	0.642	33	0.040	0.98
1.50	1.00	0.640	33	0.043	1.05
1.60	1.07	0.638	33	0.046	1.12
1.70	1.13	0.636	32	0.049	1.19
1.80	1.19	0.635	32	0.051	1.26
1.90	1.26	0.633	32	0.054	1.33
2.00	1.32	0.632	32	0.057	1.40

Tabella 6-11 - Criterio di resistenza di Barton e Choubey: linearizzazione di Mohr-Coulomb – Imbocco nord



RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA

Aprile 2022 Data Rev.

Pag.**54/60** 01

BEMA - SPERONE ROCCIOSO				
RESISTENZA A TAGLIO DEI GIUNTI				
Criterio di resistenza di Barton Choubey (1977)				
Criterio di resistenza				
$\phi_i = \arctan\left(\frac{\delta\tau}{\delta\sigma_n}\right)$				
$\frac{\delta \tau}{\delta \sigma_n} = tan \left(JRC \log_{10} \frac{JCS}{\sigma_n} + \phi_r \right) - \frac{\pi JRC}{180 ln 10} \left[tan^2 \left(JRC \log_{10} \frac{JCS}{\sigma_n} + \phi_r \right) + 1 \right]$				

	BC				MC
σn	τ_n	$\delta \tau_n / \delta \sigma_n$	φi	Ci	τ _n
[MPa]	[MPa]	[-]	[°]	[MPa]	[MPa]
0.00	0.00	2.574	69	0.000	0.00
0.08	0.06	0.720	36	0.003	0.06
0.10	0.07	0.713	35.5	0.003	0.07
0.20	0.14	0.692	35	0.006	0.14
0.30	0.21	0.680	34	0.009	0.21
0.40	0.28	0.672	34	0.012	0.28
0.50	0.35	0.665	34	0.015	0.35
0.60	0.41	0.660	33	0.018	0.42
0.70	0.48	0.655	33	0.021	0.49
0.80	0.54	0.651	33	0.024	0.56
0.90	0.61	0.648	33	0.027	0.63
1.00	0.67	0.645	33	0.030	0.70
1.10	0.74	0.642	33	0.032	0.77
1.20	0.80	0.640	33	0.035	0.84
1.30	0.87	0.637	33	0.038	0.91
1.40	0.93	0.635	32	0.041	0.98
1.50	0.99	0.633	32	0.044	1.05
1.60	1.06	0.631	32	0.047	1.12
1.70	1.12	0.630	32	0.050	1.19
1.80	1.18	0.628	32	0.052	1.26
1.90	1.25	0.627	32	0.055	1.33
2.00	1.31	0.625	32	0.058	1.40

Tabella 6-12 - Criterio di resistenza di Barton e Choubey: linearizzazione di Mohr-Coulomb – Sperone roccioso



RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA

 Data
 Aprile 2022

 Rev.
 01
 Pag.55/60

BEMA - IMBOCCO NORD E SPERONE ROCCIOSO

RESISTENZA A TAGLIO DEI GIUNTI

Parametri di Mohr Coulomb

Linearizzazione del criterio di resistenza

angolo di attrito MC	φ _i	35.0	[°]
coesione MC	Ci	0.003	[MPa]

Tabella 6-13 – Parametri di Mohr-Coulomb



Tabella 6-14 – Curve di resistenza a taglio del giunto



	Data	Aprile	2022
RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA			
	Rev.	01	Pag. 56/60

. .

7 MODELLO IDROGEOLOGICO

7.1 Stima della conducibilità idraulica e del carico idraulico

Le indagini geognostiche eseguite per la presente fase progettuale non hanno previsto l'esecuzione di prove che misurano la conducibilità idraulica dell'ammasso roccioso; le informazioni relative all'assetto idrogeologico, alla permeabilità dell'ammasso roccioso e all'altezza del battente idraulico sono quelle ricavabili dalle portate misurate alla testa del sondaggio S1 e dalla misurazione della falda nel sondaggio S2.

In letteratura sono descritti molteplici metodi analitici, semi-analitici, empirici e numerici che permettono di quantificare il flusso d'acqua in galleria; al fine di valutare la conducibilità idraulica dell'ammasso roccioso e l'altezza della falda a partire da una portata nota, sono stati applicati due approcci analitici compatibili con i dati di input a disposizione; in particolare, sono stati utilizzati gli approcci di di Maleki et al. (Rif.[29]) e di Farhadian et al. (Rif.[30]).

Atteso che l'ammasso roccioso non è un mezzo idraulicamente isotropo ma caratterizzato da famiglie di fratture variamente interconnesse, questi approcci consentono di considerare gli effetti della fratturazione e del grado di interconnessione delle fratture.



Figura 7-1 – Sistemi di discontinuità con differente grado di interconnessione a) completo, b) parziale, c) nullo (in Rif. [32]).

Criterio analitico di Maleki

L'equazione di flusso di Maleki considera lo scavo di una galleria circolare eseguita in un mezzo discontinuo caratterizzato mediante i seguenti parametri:

- α è l'angolo tra la direzione della famiglia di discontinuità e quella dell'asse galleria;
- N_j identifica il numero di giunti che intersecano la galleria;
- S_j è la spaziatura delle fratture;
- A_j è la superficie di apertura di tutte le fratture in una specifica tratta di lunghezza L.



Figura 7-2 – Schematizzazione di galleria circolare in ammasso roccioso fratturato.



RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	Data	Aprile 2022	
	Rev.	01	Pag. 57/60

Il numero di fratture (N_j) per ogni famiglia di discontinuità $(J_1, J_2, ..., J_n)$ è definito come:

$$N_{j1} = \left[\frac{L \cdot \sin \alpha}{S_{j1}}\right]; \ N_{j2} = \left[\frac{L \cdot \sin \alpha}{S_{j2}}\right]; \dots N_{jn} = \left[\frac{L \cdot \sin \alpha}{S_{jn}}\right]$$

La superficie di apertura (A_j) delle fratture di una famiglia in una specifica tratta di lunghezza L, come riportato di seguito, è espressa in funzione del numero di discontinuità (N_j) e della superficie di apertura dei giunti (a_j).

$$A_{j1} = N_{j1} \cdot a_{j1}; A_{j2} = N_{j2} \cdot a_{j2}; \dots A_{jn} = N_{jn} \cdot a_{jn}$$

La superficie di apertura dei giunti di ciascun set è definita con la seguente espressione:

$$a_{j1} = \left(\frac{a_{F(j1)} \cdot C_{(j1)}}{1000}\right); \ a_{j2} = \left(\frac{a_{F(j2)} \cdot C_{(j2)}}{1000}\right); a_{jn} = \left(\frac{a_{F(jn)} \cdot C_{(jn)}}{1000}\right)$$

in cui:

- a_{Fj}: apertura dei giunti (mm);
- C_j: circonferenza ottenuta della forma dall'intersezione del giunto con l'asse della galleria (m).

$$C = \pi \cdot (a+b) \cdot \left(1 + \frac{3 \cdot \left(\frac{a-b}{a+b}\right)^2}{10 + \sqrt{4 - 3 \cdot \left(\frac{a-b}{a+b}\right)^2}}\right)$$

I parametri *a* e *b* corrispondono rispettivamente a metà del valore dell'asse maggiore e minore dell'ellisse che definisce la forma ottenuta dall'intersezione del giunto con l'asse della galleria. Il parametro *a* può essere definito secondo la seguente equazione, mentre definire il parametro *b* può essere utilizzato il raggio della galleria.

$$a = \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{2r}{\sin\alpha}\right)^2 + 2r^2}$$

in cui r è raggio della galleria.

Sulla base dei suddetti parametri che definiscono la geometria delle fratture che pervadono l'ammasso roccioso, secondo le seguenti equazioni è possibile definire il flusso di acqua in galleria.

$$Q_{u} = \frac{Q_{max}}{L} = A_{J(totale)} \cdot k \cdot \frac{h}{L}$$

$$Q_{max} = \begin{cases} \frac{a_{F(J1)} \cdot C_{(J1)} \cdot sin(\alpha_{J1})}{1000 \cdot S_{(J1)}} + \\ \frac{a_{F(J1)} \cdot C_{(J2)} \cdot sin(\alpha_{J2})}{1000 \cdot S_{(J1)}} + \\ \frac{a_{F(Jn)} \cdot C_{(Jn)} \cdot sin(\alpha_{Jn})}{1000 \cdot S_{(Jn)}} \end{cases} \cdot k \cdot h \cdot L$$

in cui:

- Q_{max}: flusso massimo atteso in una specifica tratta di lunghezza L (m);



Data Aprile 2022 **RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA** Rev.

01 Pag.58/60

- Q_u: flusso per unità di lunghezza della galleria (m³/s);
- k: conducibilità idraulica (m/s);
- h: carico idraulico rispetto al centro della galleria (m);
- L: lunghezza del tratto interessato (m).

Al fine di definire la variazione della conducibilità idraulica e del battente idrico, l'equazione di Maleki è stata esplicitata in termini di altezza idrica (h).

Compatibilmente con l'assetto geologico rilevato, nella fase di calcolo sono state considerate due famiglie di discontinuità prevalente, con differente spaziatura, apertura e inclinazione rispetto all'andamento della galleria.

L'equazione esplicitata in termini di altezza del battente idrico (h) è la seguente:

$$h = \frac{Q}{\left(\frac{\alpha_{F(j_1)} \cdot C_{(j_1)} \cdot \sin(\alpha_{j_1})}{1000 \cdot S_{j_1}} + \frac{\alpha_{F(j_2)} \cdot C_{(j_2)} \cdot \sin(\alpha_{j_1})}{1000 \cdot S_{j_2}}\right) \cdot k \cdot L}$$

Per la famiglia K₁ sono stati usati i parametri:

- $a_{F(j1)} = 1 \text{ mm}$
- S_(j1) = 0.23 m
- $\alpha_{(i1)} = 85^{\circ}$

Per la famiglia K₂ sono stati usati i parametri:

- $-a_{F(i2)} = 0.7 \text{ mm}$
- S_(j2) = 0.13 m
- $\alpha_{(j2)} = 40^{\circ}$

Criterio analitico di Farhadian

L'equazione di flusso di Farhadian è definita a partire dalla classica equazione di Goodman e implementa la parziale continuità idraulica tra i sistemi di discontinuità mediante un fattore di interconnessione (P):

$$Q_{em} = P^n 2\pi k_{sim} \frac{h}{2.3 \log\left(\frac{2h}{r}\right)}$$

in cui:

- Q_{em} è la portata unitaria drenata, per metro lineare di galleria (m³/s);
- k_{sim} è la conducibilità idraulica equivalente dell'ammasso roccioso (m/s), che dipende dalla giacitura dei giunti θ e dalla orientazione del tensore della conducibilità idraulica rispetto al piano orizzontale Φ , secondo le seguenti relazioni:

$$\lambda = \begin{cases} k_{min} \sqrt{\frac{k_{min}}{k_{max}}} \left(1 - \cos\theta_{min} + \cos\frac{\pi}{4}\right) & \Phi_{min} \le \frac{\pi}{4} \\ k_{min} \sqrt{\frac{k_{min}}{k_{max}}} \tan\theta_{min} & \Phi_{min} > \frac{\pi}{4} \end{cases}$$



RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA	Data	Aprile 2022	
	Rev.	01	Pag. 59/60

$$k_{sim} = 0.055 - 1.64 \frac{\lambda}{Ln\lambda} - 0.055 e^{\lambda}$$

- h è la distanza verticale tra il centro della galleria e la tavola d'acqua (m);
- r è il raggio della galleria (m);
- Pⁿ è la probabilità di interconnessione elevata per il coefficiente n, assunto pari a 2.5.

A partire da questa equazione, considerando una probabilità di interconnessione delle fratture pari al 70%, per ciascuna portata misurata sono state ipotizzate diverse altezze piezometriche e sono stati calcolati molteplici valori di conducibilità idraulica.

Le conducibilità calcolate, correlate con le altezze del battente idrico ipotizzate, mostrano una relazione secondo una legge di proporzionalità inversa.

Da questo confronto, per ciascuna portata, è stata valutata la regressione esponenziale che ha fornito le seguenti equazioni.

- Q = 0.16 l/s $h = 0.00000013 \cdot k^{-1.21895822}$
- Q = 0.30 l/s $h = 0.00000028 \cdot k^{-1.21895822}$
- Q = 0.40 l/s $h = 0.00000040 \cdot k^{-1.21895822}$
- Q = 0.60 l/s $h = 0.00000066 \cdot k^{-1.21895822}$

I risultati dei calcoli eseguiti sono sintetizzati in Figura 7-3, in cui l'altezza della tavola d'acqua è espressa in funzione della conducibilità idraulica, per differenti valori del flusso idrico unitario misurato nel sondaggio S1 (2021).

Come si può osservare, per bassi valori di conducibilità idraulica nelle porzioni di roccia mediamente fratturata attese lungo il tracciato (circa 5x10⁻⁷ m/s), con esclusione dei settori di faglia, l'altezza del battente idrico è inferiore a 10 m, anche in presenza di flussi unitari elevati (0.6 l/s).



Figura 7-3 – Curve di correlazione conducibilità idraulica e carico idraulico per differenti valori di portata unitaria misurati nel sondaggio S1 (2021)



 RELAZIONE GEOLOGICA E GEOMECCANICA
 Data
 Aprile 2022

 Rev.
 01
 Pag.60/60

Compatibilmente con la morfologia del versante e con le condizioni idrogeologiche rilevate, nell'ipotesi che si possa formare una falda lateralmente estesa nell'ammasso roccioso, l'altezza del battente idrico stimato è nell'ordine di una decina di metri, sebbene verso il centro della dorsale, lungo lo sviluppo della galleria, si possa prevede un progressivo innalzamento della piezometrica fino ai 25(÷30m) rilevati in calotta in corrispondenza del sondaggio S2.