



PROVINCIA DI AREZZO

Settore Viabilità Lavori Pubblici



PROGETTO DEFINITIVO

Prog 22-V103: Lavori di messa in sicurezza rete paramassi lungo la S.R. 71 Umbro Casentinese dal km 189+700 al km 198+950 in Comune di Bibbiena e Poppi - 1° e 2° stralcio

CUP I37H22002900001

RELAZIONE GEOTECNICA GEOMECCANICA

Codice: S22234-PD-RE-0003-0

REV.	DATA	REDATTO	CONTROLLATO
0	29/02/2024	P. Giacomini	F. Moruzzi
1			
2			

APPROVATO
A. Mastrangelo



ENSER SRL

C.F./P.IVA/Registro Imprese RA 02058800398 N. REA RA-167939 - Cap. Sociale € 105 000,00 i.v.

SEDE LEGALE
Viale A. Baccarini, 29/2
48018 Faenza (RA)
Tel. (+39) 0546 663423

SEDE DI BOLOGNA - Via E. Zacconi, 16 - 40127 Bologna (BO)
SEDE DI SANTARCANGELO - Via A. Costa, 115 - 47822 Santarcangelo di Romagna (RN)
SEDE DI FIRENZE - Viale S. Lavagnini, 42 - 50129 Firenze (FI)
SUCCURSALE DI PARIGI - 1 Rue de Stockholm, 75008 Paris (France)

www.enser.it
www.enser.fr
ingegneria@enser.it
ensersrl-ra@legalmail.it



INDICE

1.	PREMESSA	5
2.	DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO	9
2.1.	NORMATIVA.....	9
2.2.	DOCUMENTAZIONE TECNICA	9
2.3.	SOFTWARE E PROGRAMMI DI CALCOLO UTILIZZATI.....	10
2.4.	ELENCO ELABORATI.....	11
3.	SCOPO E CONTENUTI DEL DOCUMENTO.....	12
4.	METODOLOGIA E TIPI DI CLASSIFICAZIONE	13
4.1.	CLASSIFICAZIONE DELL'AMMASSO ROCCIOSO	18
4.1.1.	Rock Mass Rating (RMR)	18
4.1.2.	Q-System	23
4.1.3.	Geological Strenght Index (GSI)	31
4.2.	IL CRITERIO DI ROTTURA DI HOEK & BROWN	32
5.	RILEVAMENTO GEOMECCANICO IN SITO	33
5.1.	STAZIONE GEOMECCANICA SG1 (PK 191+300)	37
5.2.	STAZIONE GEOMECCANICA SG2 (PK 191+500)	44
6.	RISULTATI DEL RILIEVO GEOMECCANICO	52
6.1.	GEOMECCANICA DI DETTAGLIO (SG1)	52
6.2.	GEOMECCANICA SPEDITIVA (SG2)	53
6.3.	STAZIONI GEOMECCANICHE SPEDITIVE	54
7.	ANALISI CINEMATICHE	64
7.1.	PRODOTTI DELLE ANALISI CINEMATICHE.....	64
7.1.1.	Planar sliding	64
7.1.2.	Wedge sliding	66
7.1.3.	Flexural toppling	67
7.1.4.	Direct toppling	67
7.2.	RISULTATI DELLE ANALISI CINEMATICHE	69
7.2.1.	Stazione geomeccanica SG1	69
7.2.2.	Stazione geomeccanica SG2	73
8.	CLASSIFICAZIONE DELL'AMMASSO ROCCIOSO	77
9.	PARAMETRI GEOMECCANICI DI PROGETTO	80

FIGURE



FIGURA 1-1. PLANIMETRIA DELL'AREA INTERESSATA DALL'INTERVENTO PRELIMINARE (IN ROSSO). CERCHIATA IN GIALLO L'AREA NEI PRESSI DELL'INTERVENTO OGGETTO DI PROGETTAZIONE, DENOMINATO Po.025. NON IN SCALA.	5
FIGURA 1-2. UBICAZIONE PLANIMETRICA DELL'AREA INTERESSATA DALL'INTERVENTO Po.025. SCALA GRAFICA	6
FIGURA 1-3. INDIVIDUAZIONE IN PIANTA DEI DUE STRALCI IN CUI SI SONO SUDDIVISI GLI INTERVENTI DI PROGETTO.	7
FIGURA 9-1. GRAFICO DI BUSTAMANTE-DOIX PER GESSI E MARNE, CON IDENTIFICAZIONE DELLA TENSIONE DI ADERENZA ADOTTATA AI FINI DELLE VERIFICHE	80

TABELLE

TABELLA 4-1: MODELLO DELLA SCHEDA DI RILIEVO GEOMECCANICO.....	17
TABELLA 4-2. CLASSIFICAZIONE RMR, PUNTEGGI RELATIVI ALLE CONDIZIONI DEI GIUNTI (DA BIENIAWSKI, 1989).	21
TABELLA 4-3. PARAMETRI DELLA CLASSIFICAZIONE RMR E LORO COEFFICIENTI NUMERICI.....	22
TABELLA 4-4. COMPENSAZIONE DEI COEFFICIENTI NUMERICI IN BASE ALL'ORIENTAMENTO DEI GIUNTI	23
TABELLA 4-5. CLASSI DI ROCCIA DETERMINATE IN BASE ALLA SOMMA DEI COEFFICIENTI NUMERICI	23
TABELLA 4-6. VALORI DI JR.	25
TABELLA 4-7. VALORI DI JA	27
TABELLA 4-8. VALORI DI JW	28
TABELLA 4-9. VALORI DI SRF	29
TABELLA 5-1. SCHEDA DI RILIEVO GEOMECCANICO RELATIVA ALLA STAZIONE GEOMECCANICA SG1	39
TABELLA 5-2. MISURE DELLA COMPRESSIONE UNIASSIALE CON MARTELLO DI SCHMIDT PRESSO LA STAZIONE GEOMECCANICA SG1. 40	
TABELLA 5-3. PROFILI DI RUGOSITÀ MISURATI PRESSO LA STAZIONE GEOMECCANICA SG1.	42
TABELLA 5-4. SCHEDA DI RILIEVO GEOMECCANICO RELATIVA ALLA STAZIONE GEOMECCANICA SG2	46
TABELLA 5-5. MISURE DELLA COMPRESSIONE UNIASSIALE CON MARTELLO DI SCHMIDT PRESSO LA STAZIONE GEOMECCANICA SG2. 47	
TABELLA 5-6. PROFILI DI RUGOSITÀ MISURATI PRESSO LA STAZIONE GEOMECCANICA SG2.	50
TABELLA 6-1. GIACITURA MEDIA DELLE 4 FAMIGLIE DI DISCONTINUITÀ INDIVIDUATE NELLA STAZIONE SG1.....	52
TABELLA 6-2. GIACITURA MEDIA DELLE 4 FAMIGLIE DI DISCONTINUITÀ INDIVIDUATE NELLA STAZIONE SG2.....	53
TABELLA 8-1. CLASSIFICAZIONE DELL'AMMASSO ROCCIOSO RMR E Q.....	78

1. PREMESSA

Il presente documento fa parte del Progetto Definitivo del **1° e 2° stralcio di interventi di mitigazione del rischio idrogeologico** nell'ambito dell'incarico di redazione del Progetto Definitivo e coordinamento della sicurezza in fase di progettazione per "Lavori di messa in sicurezza rete paramassi lungo la S.R. 71 Umbro Casentinese dal km 189+700 al km 198+950 in Comune di Bibbiena e Poppi - 1° stralcio e 2° stralcio CUP I37H22002900001".

Il presente Progetto Definitivo dà seguito allo Studio Preliminare ai fini della valutazione della pericolosità da caduta massi (Rif. [24], Rif. [25] e Rif. [26]) lungo la tratta stradale di interesse, consegnato nel febbraio 2024 da ENSER srl alla committente Provincia di Arezzo - Settore Viabilità Lavori Pubblici.

La tratta stradale, nonché l'area a monte della stessa, indagata ai fini della valutazione della pericolosità da caduta massi è individuabile in Figura 1-1.



Figura 1-1. Planimetria dell'area interessata dallo Studio Preliminare (in rosso). Cerchiata in giallo l'area nei pressi dell'intervento oggetto di progettazione, denominato Po.025. Non in scala.

Tale studio individua, lungo tutta la tratta di interesse le aree di potenziale distacco di blocchi e gli interventi di mitigazione esistenti e definisce una proposta di interventi areali (consolidamenti, rafforzamenti corticali, rivestimenti in rete semplice, abbattimenti e disaggi) e lineari (barriere paramassi) volti alla completa messa in sicurezza della viabilità nei confronti della caduta massi. Agli oltre 120 interventi proposti, è stato attribuito un grado di priorità variabile da 1 (priorità massima) a 5 (priorità minima). Tra gli interventi in priorità massima, il gestore dell'infrastruttura ha individuato l'intervento denominato Po.025 come quello per il quale procedere alla redazione del Progetto di Fattibilità Tecnico-Economica e del Progetto Definitivo. Trattasi di un intervento di rafforzamento corticale lungo la scarpata stradale in roccia affiorante.

L'area interessata dall'intervento Po.025 si colloca lungo una scarpata stradale alta 15-20 m, a monte della tratta compresa tra le Pk 191+300 e 191+500 circa, nel Comune di Bibbiena (AR). L'ubicazione planimetrica di dettaglio è visibile in Figura 1-2.

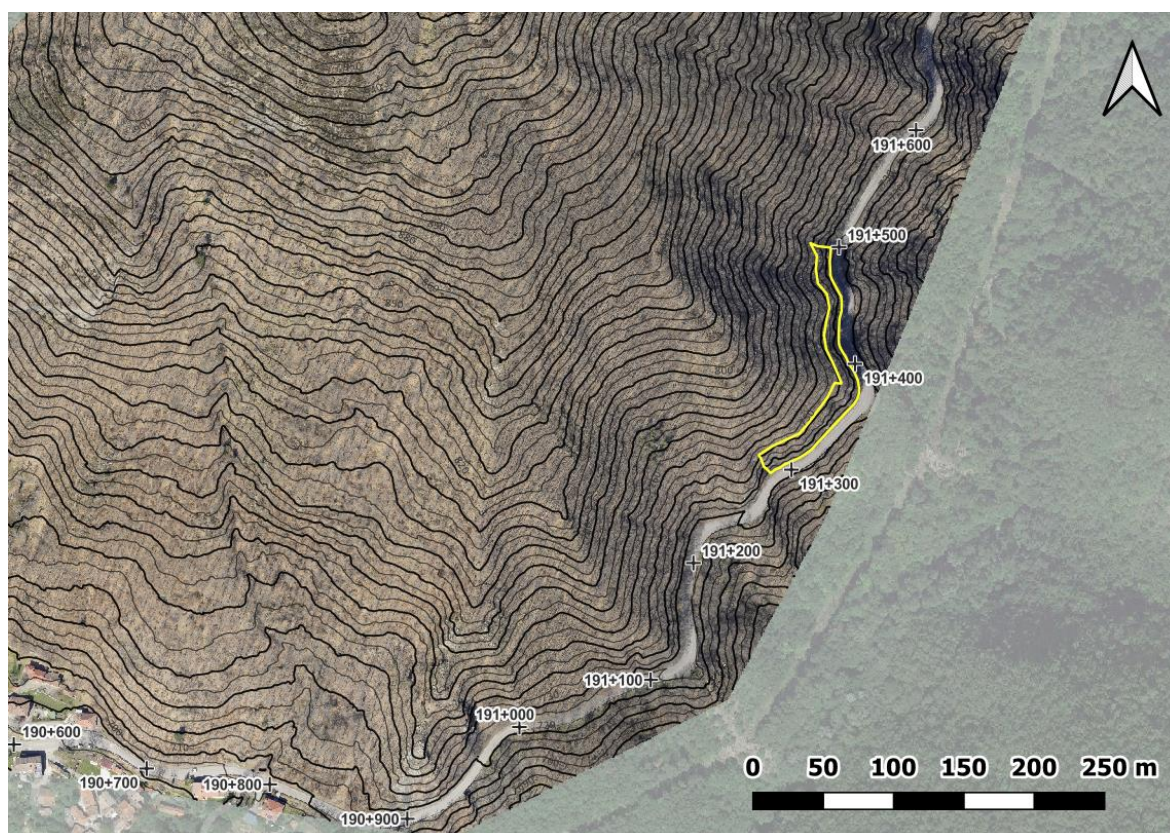


Figura 1-2. Ubicazione planimetrica dell'area interessata dall'intervento Po.025. Scala grafica

Come riportato nella "Relazione per affidamento" allegata alla Determina Dirigenziale n. 583 del 21/04/2023 emessa dal Settore Viabilità LL.PP. il progetto dei lavori dovrà essere modulato su due annualità che dovranno essere affidate con due procedure di gara separate, pertanto lo stesso sarà caratterizzato da due stralci funzionali.

Gli interventi di progetto sono quindi stati suddivisi in I° e II° stralcio (Figura 1-3), sulla base dei costi stimati degli interventi e degli importi lavori fissati nella Determinazione Dirigenziale di cui sopra.

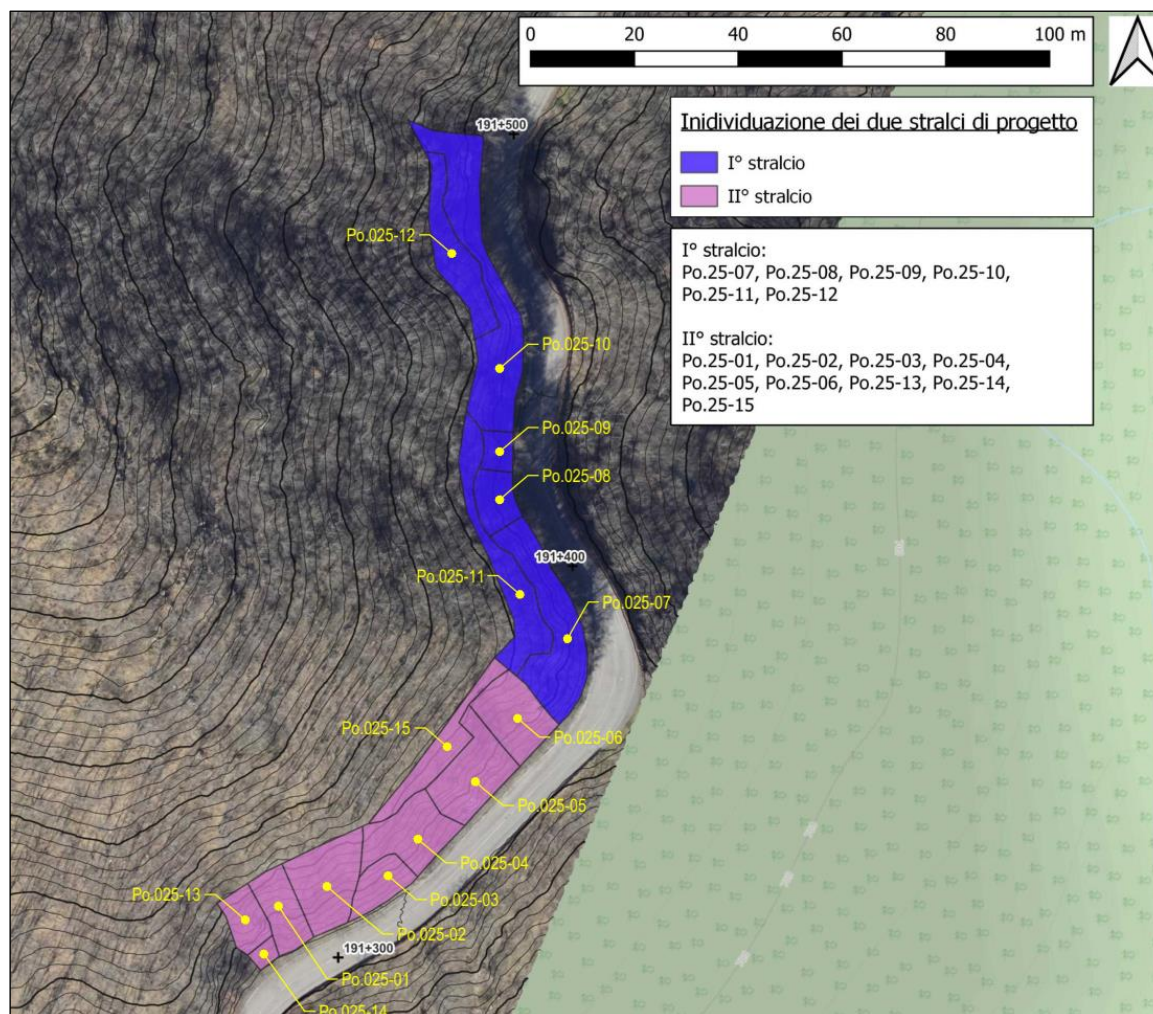


Figura 1-3. Individuazione in pianta dei due stralci in cui si sono suddivisi gli interventi di progetto.

L'intervento prevede le seguenti lavorazioni:

- Pulizia della scarpata dalla vegetazione arbustiva e arborea (diametri inferiori ai 10 cm);
- Rimozione della rete semplice a doppia torsione che attualmente riveste la scarpata (opera esistente identificata nello studio preliminare col codice PoE.21);
- Disgaggio e rimozione dei blocchi maggiormente instabili, anche con demolizione meccanica, e trasporto della stessa a discarica autorizzata;
- Installazione di rafforzamenti corticali formati da un geocomposito metallico in rete a doppia torsione (tipo Steelgrid MO 300), armata con funi e ancoraggi in barre a costituire una maglia quadrata o rettangolare.

La progettazione è stata svolta ai sensi della vigente normativa, in particolare le Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC) di cui al DM 14/01/2018 e la UNI 11211-4:2018: "Opere di difesa dalla caduta massi. Parte4: Progetto Definitivo ed esecutivo".

La progettazione è stata sviluppata secondo i seguenti passi:

- rilievi topografici e fotogrammetrici dell'area mediante droni;
- rilevamenti ed ispezioni dirette in sito eseguite da geologi ed ingegneri;

- selezione delle tipologie di intervento per lo specifico sito in oggetto e per le specifiche problematiche di dissesti rilevati;
- definizione dei criteri di calcolo e dimensionamento di massima delle opere;
- produzione degli elaborati.

Il presente Progetto Definitivo fornisce il dimensionamento e la quantificazione dei costi degli interventi necessari per la mitigazione del rischio da caduta massi che insiste sulla tratta stradale oggetto di studio, tra la Pk 191+300 e la Pk 191+500.

Nel presente documento si riportano:

- I parametri di progetto: le azioni di progetto, i materiali da impiegare, il riepilogo della caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso roccioso e i parametri geotecnici utilizzati per le verifiche;
- La definizione dei criteri applicati nell'ambito delle verifiche strutturali e geotecniche;
- La sintesi delle verifiche strutturali e geotecniche.

2. DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO

2.1. NORMATIVA

- Rif. [1] Decreto Ministero delle Infrastrutture e Trasporti 17/01/2018, Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”;
- Rif. [2] C.S.LL.PP., Circolare n°7 del 21/01/2019, Istruzioni per l’applicazione dell’Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni” di cui al DM 14/01/2018”.
- Rif. [3] UNI EN 1997-1 - Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali
- Rif. [4] UNI EN 1997-2 - Eurocodice 7 – Progettazione geotecnica – Parte 2: Indagini e prove nel sottosuolo;
- Rif. [5] UNI 11211-4:2018 – Opere di difesa dalla caduta massi - Parte 4: Progetto definitivo ed esecutivo”

2.2. DOCUMENTAZIONE TECNICA

- Rif. [6] AFTES (2003). Guidelines for characterization of rock masses useful for the design and the construction of underground structures.
- Rif. [7] Barton N. (2011). Near-surface rock engineering and fractured reservoirs rock mechanics, each linked by geophysics – Short Course – Centro di GeoTecnologie Università degli Studi di Siena.
- Rif. [8] Barton N., Bieniawski, Z.T. (2008). RMR and Q – Setting records. Tunnels & Tunnelling International, February.
- Rif. [9] Barton N., Lien R. & Lunde J. (1974). Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support. Rock Mechanics, 6 (4).
- Rif. [10] Bieniawski, Z.T. (1989). Engineering Rock Mass Classifications – John Wiley & Sons.
- Rif. [11] Bruschi A. (2004). Meccanica delle rocce nella pratica geologica ed ingegneristica, Dario Flaccovio Editore.
- Rif. [12] Duncan C. Wyllie, Christopher W. Mah (1981). Rock slope engineering. Spon Press.
- Rif. [13] Goodman R. E. (1980). Introduction to rock mechanics, John Wiley, Toronto.
- Rif. [14] Hoek & Marinos (2000). GSI, a geologically friendly tool for rock mass strength estimation. Proc. GeoEng2000 Conference, Melbourne. 1422-1442.
- Rif. [15] Hoek E., Brown E. T. (2019). The Hoek-Brown failure criterion and GSI– 2018 Edition, Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, Elsevier.
- Rif. [16] Hoek E., Kaiser P.K. and Bawden W.F. (1995): Support of Underground Excavations in Hard Rock. Balkema, Rotterdam, 215pp.
- Rif. [17] Hoek. E., Diederichs M.S. (2005). Empirical estimation of rock mass modulus, Int. J. Of Rock Mechanics and Mining Sciences, Elsevier.

- Rif. [18] Hudson J. A., Harrison J. P. (1997). Engineering rock mechanics. Pergamon Press.
- Rif. [19] ISRM (1978). Suggested methods for the description of discontinuities in rock masses.
- Rif. [20] Marinos P. and Hoek E. (2001). Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch. Bull. Eng. Geol. Env., vol. 60, 85-92.
- Rif. [21] NGI (2013). Using the Q-system. Rock mass classification and support design. Handbook.
- Rif. [22] Ribacchi R. Meccanica delle Rocce: Teoria e applicazioni nell'ingegneria. Helvius Edizioni (2018)
- Rif. [23] R. Lancellotta Geotecnica, seconda edizione. Zanichelli (1993)
- Rif. [24] S22234-CT-RE-001-O_Relazione Tecnica Illustrativa, redatta dalla scrivente Enser srl nell'ambito dello "Studio preliminare ai fini della valutazione della pericolosità da caduta massi" – CUP I37H22002900001 – CIG 97057638FF
- Rif. [25] S22234-CT-TV-002-O_AO_Stato di Fatto_TAV02, redatta dalla scrivente Enser srl nell'ambito dello "Studio preliminare ai fini della valutazione della pericolosità da caduta massi" – CUP I37H22002900001 – CIG 97057638FF
- Rif. [26] S22234-CT-TV-010-O_AO_Stato di Progetto_TAV02, redatta dalla scrivente Enser srl nell'ambito dello "Studio preliminare ai fini della valutazione della pericolosità da caduta massi" – CUP I37H22002900001 – CIG 97057638FF

2.3. SOFTWARE E PROGRAMMI DI CALCOLO UTILIZZATI

- Rif. [27] Rocscience (feb. 2020). DIPS 8.0. User manual.

2.4. ELENCO ELABORATI

Sono parte integrante del presente progetto i seguenti elaborati:

Nome file	Titolo
Relazioni	
S22234-PD-RE-0001-0	Relazione generale di progetto
S22234-PD-RE-0002-0	Relazione geologica, geomorfologica e sismica
S22234-PD-RE-0003-0	Relazione geotecnica geomeccanica
S22234-PD-RE-0004-0	Relazione paesaggistica
S22234-PD-RE-0005-0	Relazione di calcolo degli interventi
S22234-PD-RE-0006-0	Elenco prezzi unitari
S22234-PD-RE-0007-0	Computo metrico estimativo
S22234-PD-RE-0008-0	Quadro economico
S22234-PD-RE-0009-0	Cronoprogramma
S22234-PD-RE-0010-0	Capitolato speciale d'appalto
S22234-PD-RE-0011-0	Aggiornamento delle prime indicazioni per la stesura dei piani di sicurezza
Tavole	
S22234-PD-TV-0001-0	Corografia e planimetrie di inquadramento
S22234-PD-TV-0002-0	Carta geologica e geomorfologica - Sezioni geologiche
S22234-PD-TV-0003-0	Planimetria degli interventi
S22234-PD-TV-0004-0	Intervento di rafforzamento corticale - Dettagli costruttivi

3. SCOPO E CONTENUTI DEL DOCUMENTO

Il presente documento illustra i risultati del rilievo geomeccanico di dettaglio eseguito presso le stazioni geomeccaniche di dettaglio “SG1” e “SG2”, e le stazioni speditive “GSI1÷GSI5”, illustrate in Figura 3-1. Questi dati, opportunamente integrati con le informazioni bibliografiche e le nozioni di carattere esperienziale, consentono di definire le caratteristiche geomeccaniche dell’ammasso roccioso.

L’obiettivo del documento è fornire i parametri geomeccanici necessari al dimensionamento degli interventi di protezione dalla caduta massi della viabilità stradale lungo la S.R. 71 Umbro Casentinese, in Comune di Bibbiena e Poppi, nel tratto compreso tra il km 191+300 e il km 191+500.

L’inquadramento planimetrico dell’area di intervento e l’ubicazione delle stazioni geomeccaniche eseguite è mostrato in Figura 3-1.

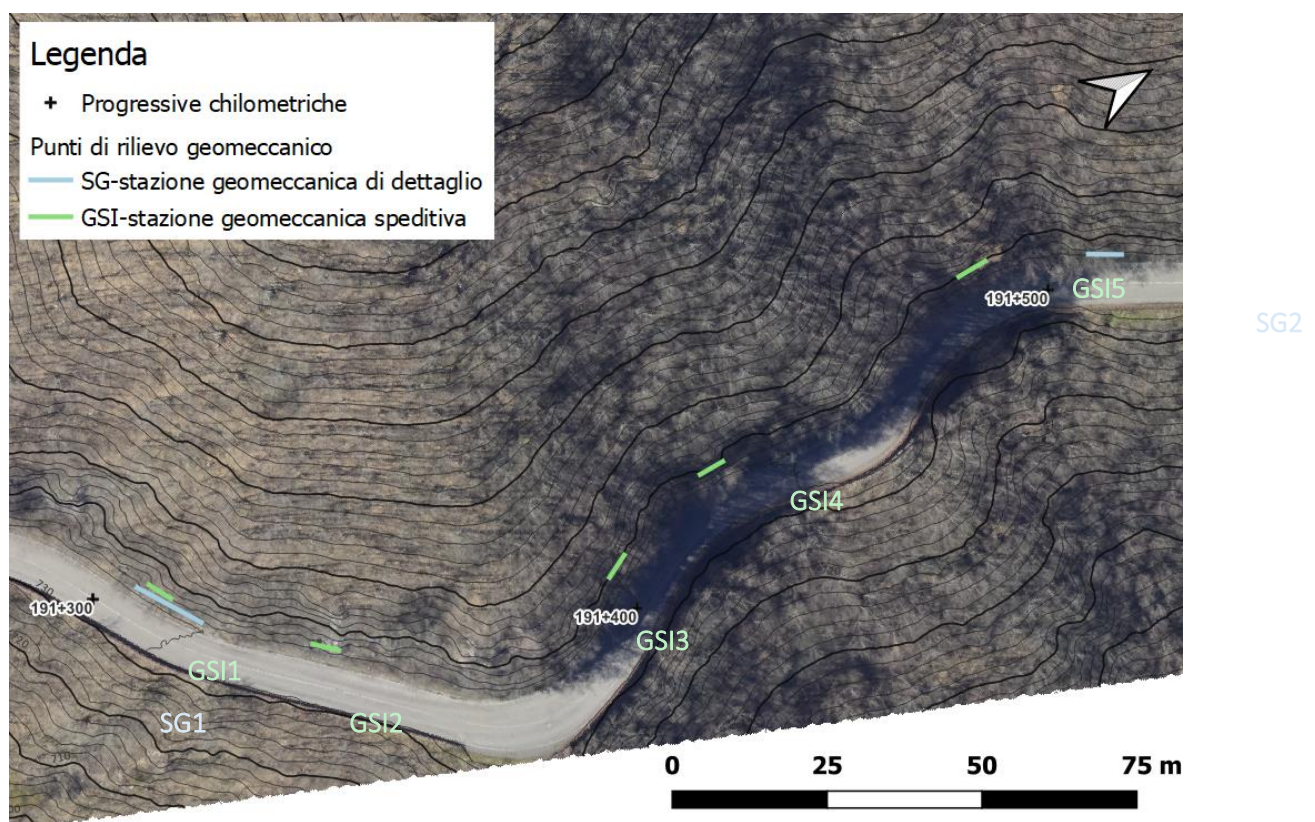


Figura 3-1 Ubicazione delle stazioni geomeccaniche di dettaglio (SG1 e SG2) e speditive (GSI1, GSI2, GSI3, GSI4 e GSI5). Immagine Google Earth Pro con scala grafica.

4. METODOLOGIA E TIPI DI CLASSIFICAZIONE

La finalità del rilievo geomeccanico è quella di riuscire a definire la classe di qualità di un ammasso roccioso (insieme della massa rocciosa intatta e delle fratture, o discontinuità, che la pervadono, Figura 4-1) consentendone una ricostruzione spaziale. Generalmente il rilievo geomeccanico viene condotto lungo affioramenti significativi per l'opera in progetto.

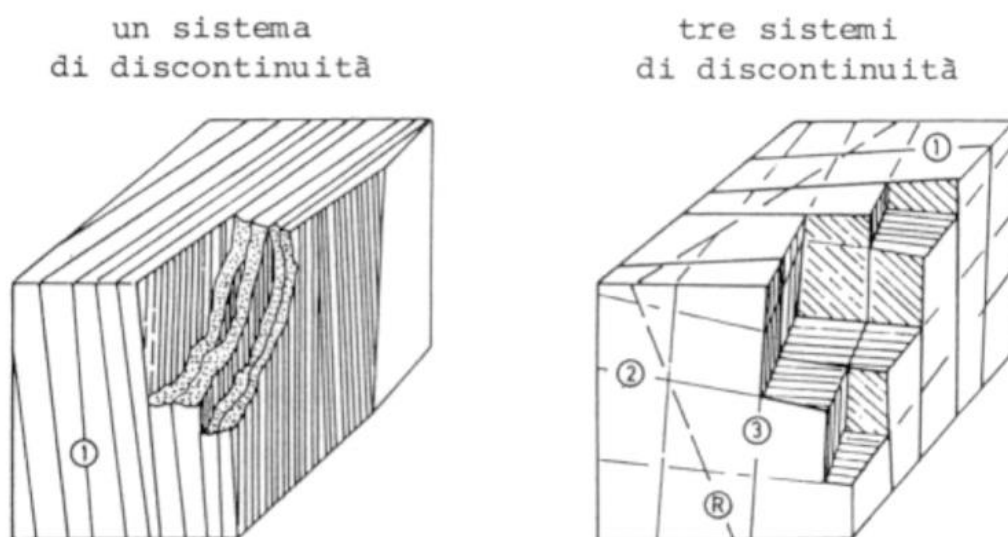


Figura 4-1. Schema esemplificativo delle discontinuità

Il rilievo geomeccanico consiste nel raccogliere, in corrispondenza di una linea di scansione (scanline), i dati relativi allo stato di fratturazione dell'ammasso roccioso. La linea di scansione è definita tramite la posa di una cordella metrica lungo l'affioramento roccioso. Una volta determinata la lunghezza della linea di scansione, si definisce il verso di rilievo individuando il punto di partenza della stessa, che viene in questo modo a costituire lo zero iniziale.

Lungo la linea di scansione si individuano le discontinuità dell'ammasso (piani di strato, giunti, faglie, ecc.), rilevandone l'assetto e la distanza dallo 0 iniziale. Le discontinuità vengono poi riunite in famiglie e codificate con un codice di riconoscimento (S, K1, K2, ecc.). Viene rilevata la distanza tra le discontinuità appartenenti alla medesima famiglia definendo così la spaziatura (Figura 4-2).

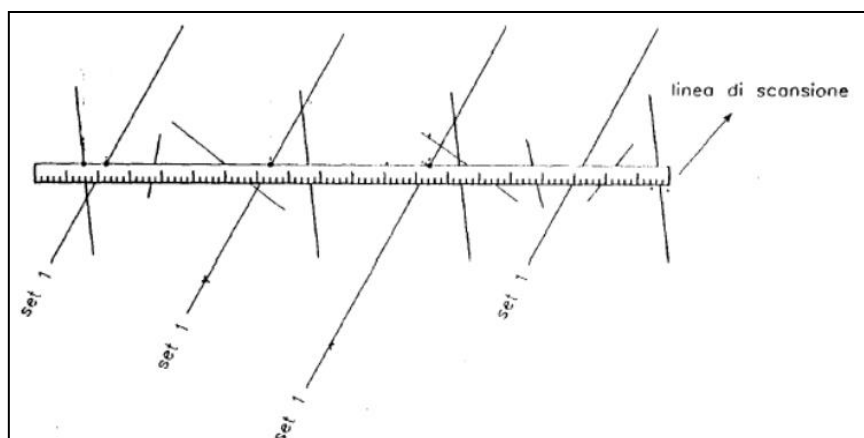


Figura 4-2. Linea di scansione – schema.

Per ogni famiglia di discontinuità vengono misurati:

- direzione di immersione delle discontinuità e inclinazione delle discontinuità, con bussola da geologo analogamente alla misura dei piani di strato;
- spaziatura delle diverse discontinuità (lungo la linea di scansione);
- persistenza delle discontinuità (lungo la linea di scansione) e tipo di terminazione;
- misura del rimbalzo del martello di Schmidt (sclerometro da roccia);
- tracciamento del profilo delle discontinuità con pettine di Barton;
- viene condotta una valutazione dello stato di alterazione e della presenza o meno di acqua nelle fratture;
- viene valutata l'eventuale presenza di materiale di riempimento delle fratture.

In Figura 4-3 è riportata un'immagine della strumentazione utilizzata per il rilievo delle caratteristiche delle discontinuità.



Figura 4-3. Da destra: profilometro (pettine di Barton), sclerometro da roccia e bussola da geologo.

I dati di cui sopra sono stati raccolti in campagna utilizzando un apposito modulo (Tabella 4-1) e successivamente elaborati tramite software dedicati (ad esempio Rocscience DIPS).

Per ogni stazione geomeccanica sono stati riportati:

- scheda di rilievo geomeccanico contenente i dati rilevati lungo la linea di scansione (distanza della frattura dallo zero del nastro, tipo di terminazione, giacitura, apertura, ondulazione, persistenza, alterazione, tipo di giunto, ecc.) secondo ISRM (1978);
- dati ottenuti da battute sclerometriche con martello di Schmidt (JCS; Joint Coefficient Strength);
- spaziature delle discontinuità;

- profili di rugosità dai quali si ricava il parametro JRC (Joint Roughness Coefficient);
- stereonet equiangolari sull'emisfero inferiore dei poli dei piani, della densità e della giacitura delle famiglie principali;

documentazione fotografica.

Il parametro JRC è stimato confrontando i profili rilevati in sito con i profili standard di Burton, facendo riferimento alla tabella in Figura 4-4.

Il parametro JCS è stato calcolato utilizzando l'equazione di Miller secondo cui:

$$\text{Log}(JCS) = 0,00088 * \gamma * R + 1,01$$






dove:

JCS: coefficiente di resistenza del giunto;

γ : peso di volume della roccia;

R: indice di rimbalzo del martello di Schmidt su giunto liscio.

I risultati ottenuti sono riportati in apposite tabelle in cui sono individuati (Tabella 5-2):

- ID: numero identificativo della misura;
 - Famiglia: la famiglia di appartenenza della misura;
 - Indice di rimbalzo: misurato con martello di Schmidt;
 - Indice di rimbalzo normalizzato: indice di rimbalzo corretto in funzione dell'orientazione del martello in fase di misura, secondo la convenzione per cui
- | | | | | | | | | | |
|----------------------|---|----------------------|---|---------------------|---|---------------------|---|--------------------|--|
| $\alpha = -90^\circ$ |  | $\alpha = -45^\circ$ |  | $\alpha = 90^\circ$ |  | $\alpha = 45^\circ$ |  | $\alpha = 0^\circ$ |  |
|----------------------|---|----------------------|---|---------------------|---|---------------------|---|--------------------|--|
- JCS per misura: riporta il valore di JCS calcolato per ogni misura effettuata;
 - UCS medio: calcolato escludendo le prime 5 misure e mediando le rimanenti secondo quanto riportato in ISRM (1978).

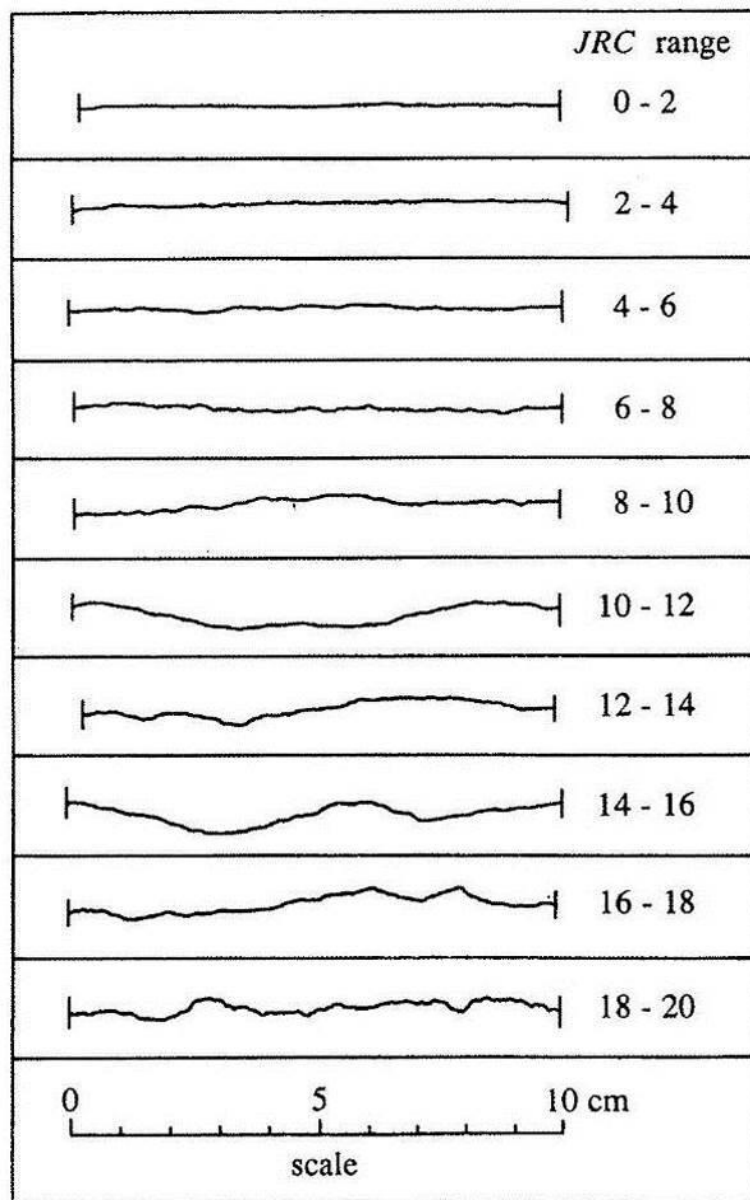


Figura 4-4. Profili standard di Burton.



CALATA:		Data:		Operatore/i:										
Località:		Orientamento parete (°)		Formazione / Litotipo										
		imm.	incl.											
SCHEDA DI RILIEVO GEOMECCANICO														
LUNGHEZZA SCAN-LINE (m):														
ID	D	IMM	INCL	T	L	A	R	O	Ru	P	SH	SP	ALT.	TIPO DI GIUNTO
1														
2														
3														
4														
5														
6														
7														
8														
9														
10														
11														
12														
13														
14														
15														
16														
17														
18														
19														
20														
21														
22														
23														
24														
25														
26														
27														
28														
29														
30														
31														
32														
33														
34														
<p>D: distanza dello stop di misura lungo la fune dal ciglio della scarpata (m) T: tipo di terminazione A: contro un'altra discontinuità, I: nella matrice rocciosa, O: non visibile o estesa oltre l'estremità dell'affioramento L (RMR): lunghezza (m) A (RMR): apertura della discontinuità (mm) R (RMR): riempimento C: cataclastico M: milonitico XX: minerali Cc Coesivo Gr Granulare T terrigeno O: ondulazione (cm) Ru (RMR): rugosità P: persistenza SH: Schmidt Hammer ALT (RMR): alterazione Sp: spaziatura (cm) Tipo di giunto: strati (St), scissosità (Sc), giunti - fratture (k), faglie (F) Note:</p>														

Tabella 4-1: Modello della scheda di rilievo geomeccanico.

4.1. CLASSIFICAZIONE DELL'AMMASSO ROCCIOSO

I dati raccolti durante i rilievi hanno permesso di caratterizzare e di classificare gli ammassi rocciosi secondo le metodologie riportate nei seguenti paragrafi.

- Rock Mass Rating (RMR) di Bieniawski.
- Sistema Q di Barton.

4.1.1. ROCK MASS RATING (RMR)

Il sistema RMR (Rock Mass Rating) venne sviluppato da Bieniawski a partire dal 1973 per la classificazione degli ammassi rocciosi, finalizzata alla progettazione di gallerie in rocce competenti fratturate. Nella versione del 1989 la classificazione dell'ammasso roccioso secondo il sistema RMR si basa sui seguenti sei parametri:

- A1: Resistenza a compressione monoassiale del materiale intatto
- A2: Rock Quality Designation (RQD)
- A3: Spaziatura delle discontinuità
- A4: Tipo e condizioni delle discontinuità
- A5: Condizioni idrauliche
- A6: Orientazione delle discontinuità

Bieniawski propone che ciascun parametro non debba necessariamente dare un ugual contributo al comportamento dell'ammasso roccioso. Esso applica pertanto a tali parametri una serie di intervalli di importanza: a punteggio più alto corrispondono condizioni dell'ammasso migliori. Per ogni famiglia delle discontinuità vengono valutate condizioni medie e i punteggi vengono interpolati utilizzando 5 tabelle di riferimento (charts A – E) (Figura 4-5, Figura 4-6, Figura 4-7, Figura 4-8 e Tabella 4-2).

La chart D viene utilizzata se il parametro RQD, o il parametro che individua la spaziatura delle discontinuità, è mancante; l'interpolazione è basata sui dati di correlazione elaborati da Priest e Hudson (1976).

Si perviene al valore globale per l'ammasso, sommando i punteggi relativi ai primi cinque parametri (RMRbase); la classificazione viene ulteriormente affinata tenendo conto del sesto parametro (A6) che considera la compensazione dei coefficienti numerici in base all'orientamento dei giunti (RMRcorretto) rispetto allo scavo; nel caso in esame questo passaggio non è stato effettuato: è stato calcolato RMRbase in quanto trattasi di opere all'aperto.

Il coefficiente RMR varia tra 0 e 100 e può essere suddiviso in 5 intervalli ($0 \div 20$, $21 \div 40$, $41 \div 60$, $61 \div 80$, $81 \div 100$) all'interno dei quali l'ammasso roccioso presenta diversi valori delle caratteristiche di resistenza, tempo medio di autoportanza e lunghezza massima di scavo stabile.

Nelle Tabella 4-3, Tabella 4-4, Tabella 4-5 sono riportati i parametri su cui si basa la Classificazione Geomeccanica RMR di Bieniawski.

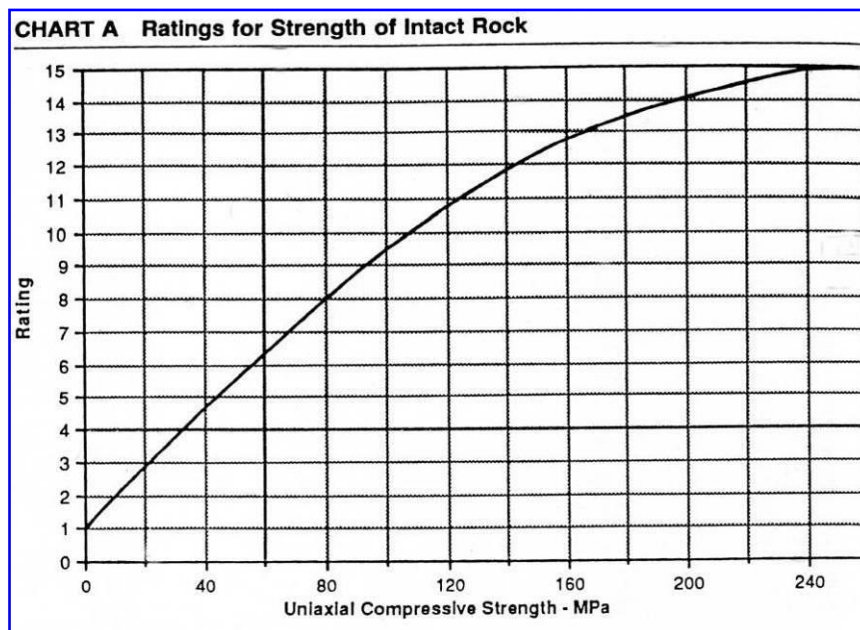


Figura 4-5. Classificazione RMR, punteggi relativi alla resistenza della roccia intatta (da BIENIAWSKI, 1989).

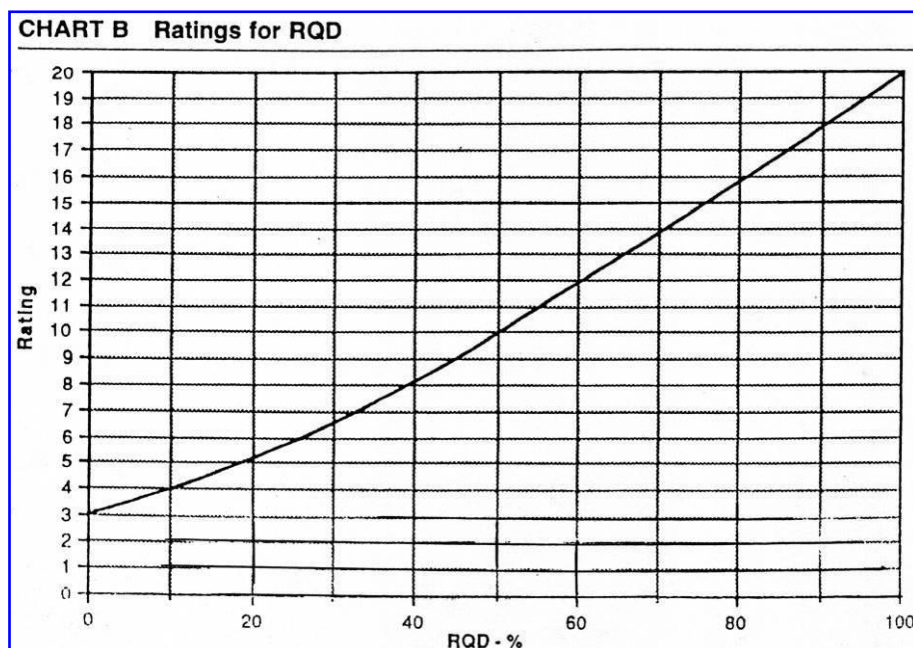


Figura 4-6. Classificazione RMR, punteggi relativi ad RQD (da BIENIAWSKI, 1989).

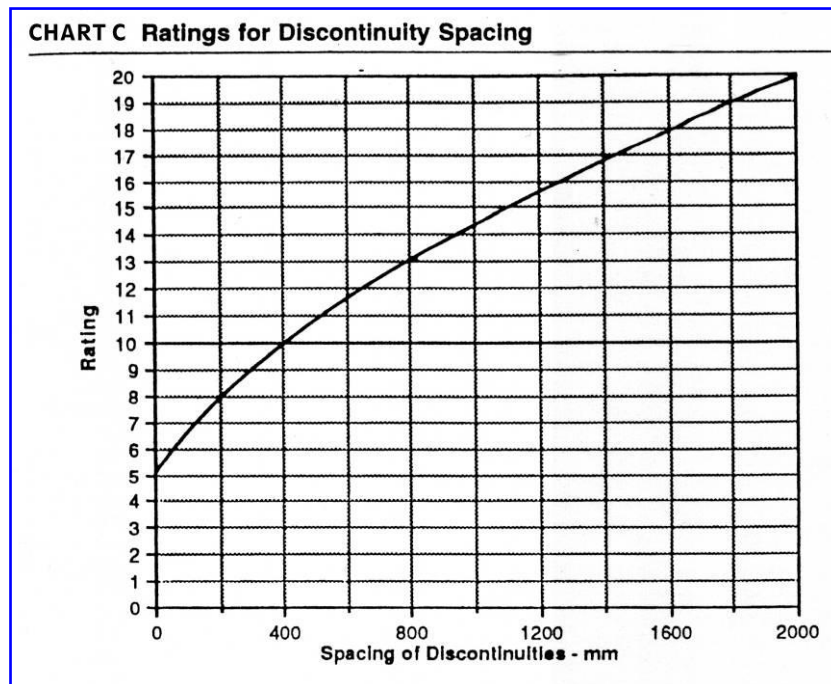


Figura 4-7. Classificazione RMR, punteggi relativi alla spaziatura delle discontinuità (da BIENIAWSKI, 1989).

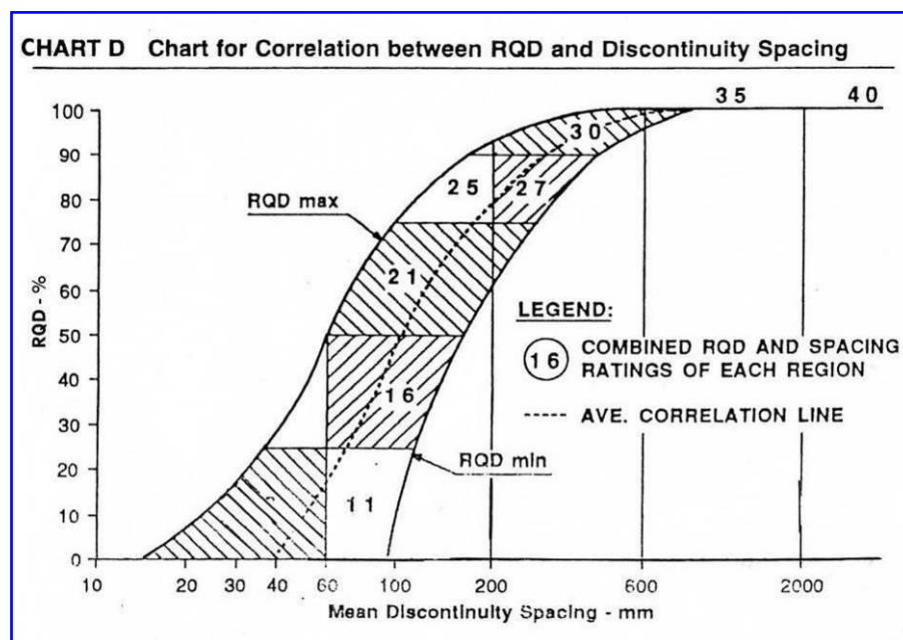


Figura 4-8. Classificazione RMR, punteggi relativi alla relazione tra RQD e la spaziatura delle discontinuità (da BIENIAWSKI, 1989).



CHART E	Guidelines for classification of Discontinuity Conditions				
Parameter	Ratings				
Disc. Length	< 1m	1 ÷ 3 m	3 ÷ 10 m	10 ÷ 20 m	> 20 m
	6	4	2	1	0
Separation	None	< 0.1 mm	0.1 ÷ 1 mm	1 ÷ 5 mm	> 5 mm
	6	5	4	1	0
Roughness	Very rough	Rough	Slightly rough	Smooth	Slikensided
	6	5	3	1	0
		Hard filling		Soft filling	
Infilling	None	< 5 mm	> 5 mm	< 5 mm	> 5 mm
	6	4	2	2	0
Weathering	Unweathered	Slightly weathered	Mod. weathered	Highly weathered	Decomposed
	6	5	3	1	0

Tabella 4-2. Classificazione RMR, punteggi relativi alle condizioni dei giunti (da BIENIAWSKI, 1989).



Parametri			Intervalli di valori						
1	resistenza della roccia intatta	Point load test	> 10	4 ÷ 10	2 ÷ 4	1 ÷ 2	preferibile la compressione		
		Resist. a compress. uniass	> 250	100 ÷ 250	50 ÷ 100	25 ÷ 50	5 ÷ 25	1 ÷ 5	< 1
	punteggio		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		90 ÷ 100	75 ÷ 90	50 ÷ 75	25 ÷ 50	< 25		
	punteggio		20	17	13	8	3		
3	spaziatura delle discontinuità (cm)		> 200	60 ÷ 200	20 ÷ 60	6 ÷ 20	< 6		
	punteggio		20	15	10	8	5		
4	condizioni delle discontinuità		sup. molto scabrose	sup. scabrose	sup. poco scabrose	sup. lisce	riemp. di argilla molle di spess. > 5 mm		
			disc. chiuse e non continue	apertura delle discontinuità < 1mm	apertura delle discontinuità < 1mm	riemp. argilloso di spess. > 5 mm			
			pareti asciutte	pareti umide	pareti bagnate	disc. persistenti a apert. 1 ÷ 5 mm	disc. persistenti a apert. > 5 mm		
	punteggio		30	25	20	10	0		
5	acqua nel sottosuolo (L/min)	venute d'acqua in 10 m di galleria	nessuna	< 10	10 ÷ 25	25 ÷ 125	> 125		
		rapp. (press. nei giunti/tensione princ. max)	0	< 0.1	0.1 ÷ 0.2	0.2 ÷ 0.5			
		cond. generali della roccia	completamente asciutta	umida	bagnata	stillicidi	venute d'acqua		
	punteggio		15	10	7	4	0		

Tabella 4-3. Parametri della classificazione RMR e loro coefficienti numerici.

direzione ed immersione delle discontinuità		molto favorevole	favorevole	indifferente	sfavorevole	molto sfavorevole
punteggio	gallerie	0	- 2	- 5	- 10	- 12
	fondazioni	0	- 2	- 7	- 15	- 25
	frane	0	- 5	- 25	- 50	- 60

Tabella 4-4. Compensazione dei coefficienti numerici in base all'orientamento dei giunti

somma dei punteggi (RMR)	100 ÷ 81	80 ÷ 61	60 ÷ 41	40 ÷ 21	20 ÷ 0
classe	I	II	III	IV	V
descrizione della roccia	molto buona	buona	discreta	scadente	molto scadente

Tabella 4-5. Classi di roccia determinate in base alla somma dei coefficienti numerici

4.1.2.Q-SYSTEM

La classificazione di Barton è stata sviluppata al Norwegian Geotechnical Institute nel 1974. Un consistente aggiornamento è stato eseguito prima nel 1993, poi nel 2002, introducendo in totale nel database quasi 2000 nuovi casi di studio. Il più recente aggiornamento (NGI, 2013) riguarda invece solamente la parte relativa ai rinforzi nelle opere in sotterraneo.

La classificazione di Barton individua tre parametri fondamentali che influenzano la stabilità di un ammasso roccioso:

Grado di fratturazione (Dimensione dei blocchi);

Attrito lungo i giunti;

Condizioni di stress.

Il valore di Q viene calcolato dalla:

$$Q = \frac{RQD}{J_n} * \frac{J_r}{J_a} * \frac{J_w}{SRF}$$

I valori indici sono:

RQD: rappresenta la sommatoria dei tratti con lunghezza superiore a 10 cm rispetto alla lunghezza totale della carota o della scanline, è espresso come percentuale rispetto alla lunghezza totale;

1 RQD (Rock Quality Designation)			RQD
A	Very poor	(> 27 joints per m ³)	0-25
B	Poor	(20-27 joints per m ³)	25-50
C	Fair	(13-19 joints per m ³)	50-75
D	Good	(8-12 joints per m ³)	75-90
E	Excellent	(0-7 joints per m ³)	90-100
Note: i) Where RQD is reported or measured as ≤ 10 (including 0) the value 10 is used to evaluate the Q-value ii) RQD-intervals of 5, i.e. 100, 95, 90, etc., are sufficiently accurate			

Figura 4-9. Valori di RQD e rispettivo numero di giunti per metro cubo.

J_n (Joint Set Number): indica il numero di famiglie di giunti presenti nell'ammasso roccioso. All'interno del conteggio devono essere considerati anche i giunti non appartenenti ad alcuna famiglia e considerati perciò random. Per capire meglio quali siano le principali famiglie di giunti, in funzione della loro orientazione è consigliabile plottare le giaciture dei giunti all'interno di stereo net, cosicché le differenti direzioni appariranno come aree a maggior concentrazione di punti nello stereogramma;

2 Joint set number		J _n
A	Massive, no or few joints	0.5-1.0
B	One joint set	2
C	One joint set plus random joints	3
D	Two joint sets	4
E	Two joint sets plus random joints	6
F	Three joint sets	9
G	Three joint sets plus random joints	12
H	Four or more joint sets, random heavily jointed "sugar cube", etc	15
J	Crushed rock, earth like	20
Note: i) For tunnel intersections, use 3 x J _n ii) For portals, use 2 x J _n		

Figura 4-10. Numero di famiglie di giunti e rispettive classi

J_r (Joint Roughness Number): indica il grado di rugosità della famiglia più sfavorevole dal punto di vista della stabilità dell'ammasso. La rugosità deve essere stimata anche in base alla presenza e all'eventuale tipo di materiale di riempimento dei giunti, poiché, qualora le pareti del giunto non entrino in contatto tra loro durante lo scivolamento, la stima di tale parametro perde di significato

(Figura 4-11). Per classificare i valori di rugosità (Tabella 4-6) di un giunto, i profili ottenuti mediante il pettine di Barton devono essere confrontati con profili standard come quelli di Figura 4-12;

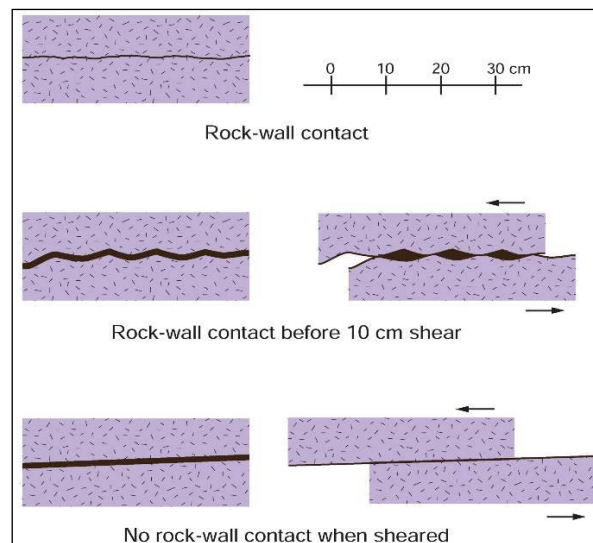


Figura 4-11 Giunti con e senza contatto tra le pareti

3 Joint Roughness Number		J_r
<i>a) Rock-wall contact, and</i>		
<i>b) Rock-wall contact before 10 cm of shear movement</i>		
A	Discontinuous joints	4
B	Rough or irregular, undulating	3
C	Smooth, undulating	2
D	Slickensided, undulating	1.5
E	Rough, irregular, planar	1.5
F	Smooth, planar	1
G	Slickensided, planar	0.5

Tabella 4-6. Valori di J_r .

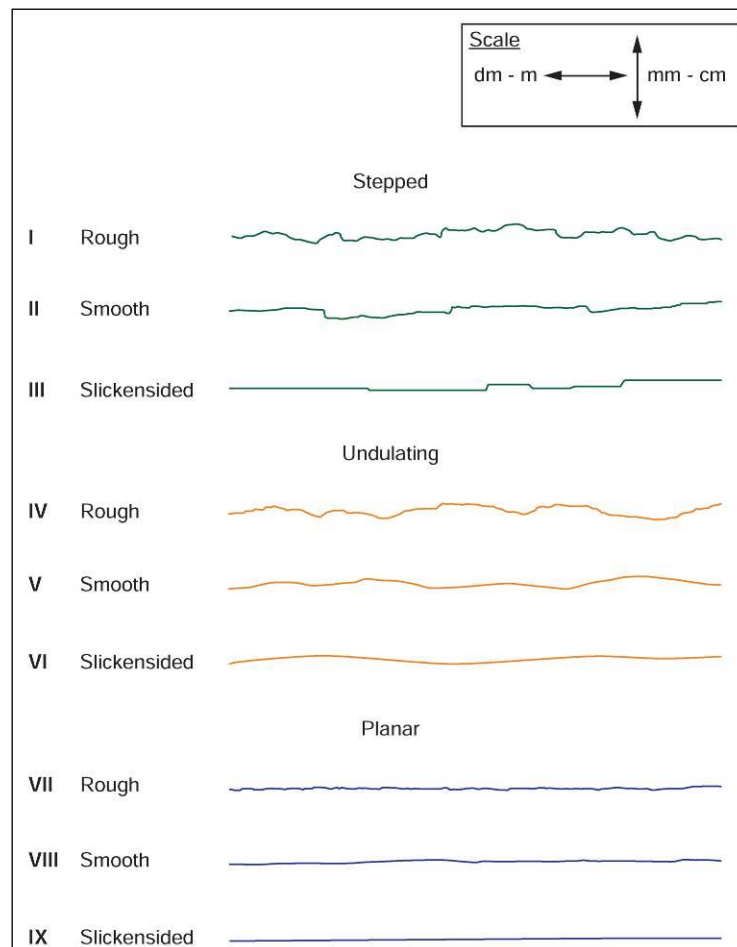


Figura 4-12. Esempi di superfici di giunto con diversi valori di J_r

J_a (Joint Alteration Number): indica il grado di alterazione delle fratture, determinato sulla famiglia di giunti più sfavorevole, e dipende dallo spessore e dalla natura del riempimento. I tre gruppi (Tabella 4-7) in cui si classifica il riempimento dei giunti si basano sullo spessore e sul grado di contatto tra le pareti durante lo scorrimento lungo i piani di scivolamento. Sempre in Tabella 4-7 è indicato anche un valore approssimato dell'angolo di attrito ϕ in funzione del grado di alterazione del giunto;

4 Joint Alteration Number		Φ_r approx.	J_a
a) Rock-wall contact (no mineral fillings, only coatings)			
A	Tightly healed, hard, non-softening, impermeable filling, i.e., quartz or epidote.		0.75
B	Unaltered joint walls, surface staining only.	25-35°	1
C	Slightly altered joint walls. Non-softening mineral coatings; sandy particles, clay-free disintegrated rock, etc.	25-30°	2
D	Silty or sandy clay coatings, small clay fraction (non-softening).	20-25°	3
E	Softening or low friction clay mineral coatings, i.e., kaolinite or mica. Also chlorite, talc gypsum, graphite, etc., and small quantities of swelling clays.	8-16°	4
b) Rock-wall contact before 10 cm shear (thin mineral fillings)			
F	Sandy particles, clay-free disintegrated rock, etc.	25-30°	4
G	Strongly over-consolidated, non-softening, clay mineral fillings (continuous, but <5mm thickness).	16-24°	6
H	Medium or low over-consolidation, softening, clay mineral fillings (continuous, but <5mm thickness).	12-16°	8
J	Swelling-clay fillings, i.e., montmorillonite (continuous, but <5mm thickness). Value of J_a depends on percent of swelling clay-size particles.	6-12°	8-12
c) No rock-wall contact when sheared (thick mineral fillings)			
K	Zones or bands of disintegrated or crushed rock. Strongly over-consolidated.	16-24°	6
L	Zones or bands of clay, disintegrated or crushed rock. Medium or low over-consolidation or softening fillings.	12-16°	8
M	Zones or bands of clay, disintegrated or crushed rock. Swelling clay. J_a depends on percent of swelling clay-size particles.	6-12°	8-12
N	Thick continuous zones or bands of clay. Strongly over-consolidated.	12-16°	10
O	Thick, continuous zones or bands of clay. Medium to low over-consolidation.	12-16°	13
P	Thick, continuous zones or bands with clay. Swelling clay. J_a depends on percent of swelling clay-size particles.	6-12°	13-20

Tabella 4-7. Valori di J_a

J_w (Joint Water Number): indica le condizioni idrogeologiche dell'ammasso. Questo parametro risulta molto importante poiché l'acqua che circola nei giunti può ammorbidire o dilavare il riempimento minerale e ridurre, di conseguenza, l'attrito lungo le pareti del giunto. Inoltre, l'acqua può ridurre lo stress normale alle pareti del giunto favorendo lo scorrimento relativo tra due blocchi. In Tabella 4-8 sono riportati i coefficienti di J_w relativi alle diverse condizioni idrogeologiche identificate nell'ammasso roccioso;



5 Joint Water Reduction Factor		J_w
A	Dry excavations or minor inflow (humid or a few drips)	1.0
B	Medium inflow, occasional outwash of joint fillings (many drips/"rain")	0.66
C	Jet inflow or high pressure in competent rock with unfilled joints	0.5
D	Large inflow or high pressure, considerable outwash of joint fillings	0.33
E	Exceptionally high inflow or water pressure decaying with time. Causes outwash of material and perhaps cave in	0.2-0.1
F	Exceptionally high inflow or water pressure continuing without noticeable decay. Causes outwash of material and perhaps cave in	0.1-0.05
Note: i) Factors C to F are crude estimates. Increase J_w if the rock is drained or grouting is carried out		
ii) Special problems caused by ice formation are not considered		

Tabella 4-8. Valori di J_w

SRF (Stress Reduction Factor): descrive la relazione che intercorre tra stress e resistenza in un ammasso roccioso; in generale è di complessa definizione: è funzione dello stato tensionale in rocce massive o del disturbo tettonico. Può essere valutato, in special modo, con riferimento alle opere in sotterraneo, come rapporto tra la resistenza a compressione uniassiale e lo stress principale maggiore. Si possono distinguere 4 situazioni di stress principale (a, b, c, d) così come indicato in Tabella 4-9.

6 Stress Reduction Factor				SRF
a) Weak zones intersecting the underground opening, which may cause loosening of rock mass				
A	Multiple occurrences of weak zones within a short section containing clay or chemically disintegrated, very loose surrounding rock (any depth), or long sections with incompetent (weak) rock (any depth). For squeezing, see 6L and 6M			10
B	Multiple shear zones within a short section in competent clay-free rock with loose surrounding rock (any depth)			7.5
C	Single weak zones with or without clay or chemical disintegrated rock (depth $\leq 50\text{m}$)			5
D	Loose, open joints, heavily jointed or "sugar cube", etc. (any depth)			5
E	Single weak zones with or without clay or chemical disintegrated rock (depth $> 50\text{m}$)			2.5
Note: i) Reduce these values of SRF by 25-50% if the weak zones only influence but do not intersect the underground opening				
b) Competent, mainly massive rock, stress problems		σ_c / σ_1	σ_θ / σ_c	SRF
F	Low stress, near surface, open joints	>200	<0.01	2.5
G	Medium stress, favourable stress condition	200-10	0.01-0.3	1
H	High stress, very tight structure. Usually favourable to stability. May also be unfavourable to stability dependent on the orientation of stresses compared to jointing/weakness planes*	10-5	0.3-0.4	0.5-2 2-5*
J	Moderate spalling and/or slabbing after > 1 hour in massive rock	5-3	0.5-0.65	5-50
K	Spalling or rock burst after a few minutes in massive rock	3-2	0.65-1	50-200
L	Heavy rock burst and immediate dynamic deformation in massive rock	<2	>1	200-400
Note: ii) For strongly anisotropic virgin stress field (if measured): when $5 \leq \sigma_1 / \sigma_3 \leq 10$, reduce σ_c to $0.75 \sigma_c$. When $\sigma_1 / \sigma_3 > 10$, reduce σ_c to $0.5 \sigma_c$, where σ_c = unconfined compression strength, σ_1 and σ_3 are the major and minor principal stresses, and σ_θ = maximum tangential stress (estimated from elastic theory) iii) When the depth of the crown below the surface is less than the span; suggest SRF increase from 2.5 to 5 for such cases (see F)				
c) Squeezing rock: plastic deformation in incompetent rock under the influence of high pressure		σ_θ / σ_c	SRF	
M	Mild squeezing rock pressure	1-5	5-10	
N	Heavy squeezing rock pressure	>5	10-20	
Note: iv) Determination of squeezing rock conditions must be made according to relevant literature (i.e. Singh et al., 1992 and Bhasin and Grimstad, 1996)				
d) Swelling rock: chemical swelling activity depending on the presence of water				SRF
O	Mild swelling rock pressure	5-10		
P	Heavy swelling rock pressure	10-15		

Tabella 4-9. Valori di SRF

Nell'equazione del Q il primo quoziente (RQD/J_n) è rappresentativo della dimensione dei blocchi isolati dai sistemi fratturativi, il secondo (J_r/J_a) è rappresentativo della resistenza d'attrito disponibile al contatto tra i blocchi e il terzo (J_w/SRF) tiene conto dell'influenza della circolazione d'acqua nell'ammasso e dello stato tensionale al contorno.



ROCK MASS QUALITY AND ROCK SUPPORT

G	F	E	D	C	B	A		
Exceptionally poor	Extremely poor	Very poor	Poor	Fair	Good	Very good	Extremely good	Excep. good

Span or height in m (Left Y-axis): 1, 2, 3, 5, 10, 20, 50

ESR (Left Y-axis): 1, 2, 3, 5, 10, 20, 50

Bolt length in m for ESR = 1 (Right Y-axis): 1.5, 2.4, 3, 5, 7, 11, 20

Regions and Lines:

- RRS III** (Red region, G to F)
- RRS II** (Orange region, F to E)
- RRS I** (Yellow region, E to A)
- Average bolt spacing with Sfr** (Solid lines, labeled with values like 1.0 m, 1.2 m, 1.3 m, 1.5 m, 1.7 m, 2.1 m, 2.3 m, 2.5 m)
- Average bolt spacing without Sfr** (Dashed lines, labeled with values like 1.6 m, 2.0 m, 3.0 m, 4.0 m)
- Energy Levels (E):** E = 1000 J, E = 700 J, E = 500 J

Rock mass quality $Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$

Figura 4-13. Qualità dell'ammasso roccioso secondo Q

4.1.3. GEOLOGICAL STRENGTH INDEX (GSI)

Il GSI fornisce un sistema per valutare la riduzione di resistenza di un ammasso roccioso in differenti condizioni geologiche, tramite una valutazione di tipo empirico (GSI di Hoek & Marinos, 2000).

In Figura 4-14 è riportato l'abaco per la determinazione di GSI sulla base delle caratteristiche geologiche e strutturali d'ammassi di natura







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

Figura 4-14. GSI per ammassi rocciosi flyschoidi (HOEK & MARINOS, 2000, tradotto in Bruschi, 2004).

4.2. IL CRITERIO DI ROTTURA DI HOEK & BROWN

Il criterio di rottura di Hoek-Brown generalizzato per gli ammassi rocciosi (The Hoek-Brown Failure Criterion, and GSI – 2018 edition) rappresenta un involucro di rottura curvo che, al contrario del classico criterio di Mohr-Coulomb utilizzato nell'ambito della meccanica delle terre, non può essere descritto da una coppia di parametri (coesione ed angolo d'attrito), nel piano sforzo normale-sforzo di taglio.

La formulazione originale prevede la descrizione dell'involucro di rottura nel piano degli sforzi principali:

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

σ_{ci} indica la resistenza a compressione uniassiale del materiale intatto;

m_b , s ed a sono costanti che caratterizzano l'ammasso roccioso.

Definito il metodo GSI (Geological Strength Index) come un criterio per valutare la riduzione di resistenza di un ammasso roccioso in differenti condizioni geologiche, tramite una valutazione di tipo empirico (Figura 4-14), Hoek, Carranza-Torres e Corkum (1994, 1995, 2002) hanno proposto le seguenti relazioni tra le costanti m_b , s ed a e l'indice GSI:

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

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

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

in cui m_i è una costante che caratterizza il materiale roccioso, determinata mediante prove triassiali di laboratorio o stimata dai dati di letteratura. Per la valutazione del parametro m_i si può inoltre fare riferimento alla seguente relazione, se sono disponibili prove di trazione indiretta ("Brasiliiana"):

$$m_i \approx \sigma_c / \sigma_t$$

σ_t indica la resistenza alla trazione indiretta

σ_c indica la resistenza a compressione uniassiale del materiale intatto

5. RILEVAMENTO GEOMECCANICO IN SITO

Ai fini della caratterizzazione dell'ammasso roccioso oggetto d'intervento, sono state eseguite due stazioni geomeccaniche di dettaglio mediante *scan-line* "SG1" e "SG2" con le quali si sono indagati i litotipi arenacei appartenenti alla Formazione del Macigno, sulla scarpata a monte della S.R.71 Umbro-Casentinese (Figura 5-1; Figura 5-2). Le stazioni sono state effettuate in quei settori in cui la rete semplice che ricopre l'intera scarpata risultasse aperta per un tratto sufficientemente ampio da consentire una misura sistematica delle discontinuità.

Ove a causa dell'opera esistente non fosse possibile eseguire delle vere e proprie stazioni geomeccaniche, si è provveduto ad acquisire dati qualitativi/speditivi (valutazione del GSI). Sono state eseguite un totale di 5 stazioni geomeccaniche speditive: GSI1 , GSI2, GSI3, GSI4 e GSI5 (Figura 5-3 ÷ Figura 5-7) le cui caratteristiche sono sintetizzate nei capitoli successivi dell'elaborato.



Figura 5-1. Vista dell'affioramento roccioso a monte della S.R. 71 Umbro-Casentinese nel tratto prossimo alla PK 191+300, tratto in cui è stata realizzata la stazione geomeccanica SG1 in cui la rete semplice che riveste l'intera scarpata risulta lacerata.



Figura 5-2. Vista dell'affioramento roccioso a monte della S.R. 71 Umbro-Casentinese nel tratto prossimo alla PK 191+500, ove è stata realizzata la stazione geomeccanica SG2 in un tratto in cui la rete semplice che riveste l'intera scarpata risulta lacerata.



Figura 5-3. Ammasso roccioso arenaceo in corrispondenza ove è stata realizzata la stazione geomeccanica speditiva GSI1



Figura 5-4. Ammasso roccioso arenaceo in corrispondenza ove è stata realizzata la stazione geomeccanica speditiva GS12



Figura 5-5. Ammasso roccioso arenaceo in corrispondenza ove è stata realizzata la stazione geomeccanica speditiva GS13



Figura 5-6. Ammasso roccioso arenaceo in corrispondenza ove è stata realizzata la stazione geomeccanica speditiva GSI4



Figura 5-7. Ammasso roccioso arenaceo in corrispondenza ove è stata realizzata la stazione geomeccanica speditiva GSI5

5.1. STAZIONE GEOMECCANICA SG1 (PK 191+300)

La stazione geomeccanica SG1 è stata misurata lungo una *scan-line* con sviluppo di 15m (Figura 5-8). I dati delle discontinuità rilevate sono sintetizzati in Tabella 5-1.



Figura 5-8. Foto di dettaglio dell'ammasso roccioso arenaceo sul quale è stata effettuata la stazione geomeccanica SG1.

Sul piano generale, si evidenzia un ammasso roccioso di litologia arenacea caratterizzato da discontinuità con ondulazione in prevalenza decimetrica, occasionalmente metrica e persistenza prevalentemente compresa tra 5% e 20%; in due casi si evidenziano la persistenza raggiunge l'intera scala dell'affioramento. Le discontinuità si presentano generalmente serrate, quelle aperte hanno apertura dell'ordine di 1-5 mm. Le aperture occasionalmente riempite di materiale terrigeno o cataclastico.

I valori di resistenza alla compressione monoassiale (Uniaxial Compressive Strength, UCS), derivato a partire dalla misura dell'indice di rimbalzo con martello di Schmidt, forniscono per la roccia intatta, un valore medio pari a 111 MPa (Tabella 5-2).

I valori di JRC desunti dai profili di rugosità acquisiti mediante pettine di Barton (Tabella 5-3), risultano mediamente compresi entro la classe 4-6, a conferma di superfici mediamente ondulate e rugose.



COMMITTENTE		522234												
STAZIONE GEOMECCANICA:		SG1		Data:		14/02/24		Operatore/i:		FU RS				
Località:		Pn 191+300		GSI:		Orientamento parete (°)		Formazione / Litotipo						
						imm. incl.								
						130 70								
SCHEDA DI RILIEVO GEOMECCANICO														
LUNGHEZZA SCAN-LINE (m):														
ID	D	IMM	INCL	T	X	A	R	O	X	P	X	SR	AK	TIPO DI GIUNTO
1	0	264	89	O		5mm	T	dm		<10%				
2	20	159	72	A		-		pdmm		<5%				
3	0	290	84	O		1mm	T	mm		20%				
4	30	22	72	A		-		dm		<5%				
5	70	162	72	O				pdmm		<5%				
6	80	87	76	A		5mm		dm						
7	170	352	56	O		5mm		dm						
8	290	349	67	O				dm						
9	60	77	74	O		1mm	T							
10	100	155	35	A										
11	40	141	81	A				dm						
12	0	319	66	A				dm						
13	120	179	39	A				dm						
14	90	251	75	O		1mm		dm		100%				
15	0	319	45	A				dm						
16	160	227	83	O				mm						
17	120	240	67											
18	80	233	68											
19	130	251	68				C			100%				
20	160	105	62											
21	120	248	51				C							
22	180	137	58					dm						
23	280	154	86											
24	260	158	89											
25	140	300	78	A				pdmm						
26	170	251	80											
27	90	35	82	A				pdmm						
28	170	277	77	A				dm						
29	210	121	87	O		<1mm		mm						
30	210	162	87	A										
31	190	269	80	A		mm								
32	260	184	67	A				mm						
33	220	250	62	A		mm		pdmm						
34	240	119	84	A		0		dm						

D: distanza della frattura intercettata dallo zero del nastro

T: tipo di terminazione A: contro un'altra discontinuità, I: nella matrice rocciosa, O: non visibile o estesa oltre l'estremità dell'allineamento

L: distanza della terminazione dal nastro

A: apertura della discontinuità

R: materiale di riempimento: C: cataclastico M: breccia cementata ("milonite") Ca: calcite Cc: coesivo Gr: granulare T: terrigena

O: ondulazione

S: scabrezza

P: persistenza

C: consistenza

F: frequenza

Sp: spaziatura

Note: Parete bagnata, venute d'acqua tra gli strati



SCHEMA DI RILIEVO GEOMECCANICO														
ID	D	IMM	INCL	T	L	A	R	O	S	P	C	SP	ALT.	TIPO DI GIUNTO
35	280	179	78	A				pdm						
36	200	187	40	A		0		dcm						
37	210	265	52	A				m						
38	330	297	59	A		mm		pdm						
39	380	197	9	A				dcm						
40	350	275	64	A				m						
41	510	167	86	0				dcm						
42	450	151	42	A										
* 43	390	279	67	A		mm		dcm						
* 44	500	191	77	0		0								
45	370	161	35											
46	410	256	70	A		mm		pdm						
47	530	127	88	A				dcm						
48	600	16	80											
* 49	500	135	49											
50	570	189	85	A		1 cm		dcm						
51	450	270	70	0				pdm						
52	460	116	86											
53	480	130	79	0				pdm						
54	540	14	87											
55	550	228	45											
56	580	235	89			0		m						
57	610	270	62											S?
58	550	262	50											
59	650	174	73											
60	520	140	85											
61	810	334	69									dm 10-20		
62	680	276	82											
63	690	121	90											
64	720	189	74											
65	690	135	56	A				dcm						
66	590	192	43	A										
67	700	144	15											
68	630	243	26											
69	750	352	42											
70	1090	183	84	A				pdm						
71	1000	280	30	A				dcm						
72	1250	325	57											
73	1070	89	43	A				dcm						
74	950	133	84											
75	1040	224	52											
76	1100	172	71											
77	1020	110	79	A				pdm						
78	1070	254	61	0										
79	1050	254	61	0										
80	1140	158	70											
81	1500	26	84											

Tabella 5-1. Scheda di rilievo geomeccanico relativa alla stazione geomeccanica SG1



MISURE TRAMITE MARTELLO DI SCHMIDT			SG1	
CORRELAZIONE $r \rightarrow \sigma_c$				
DATI DI INPUT				
NUMERO DELLA DISCONTINUITÀ	DENSITÀ DELLA ROCCIA $g \text{ (kNm}^3\text{)}$	ANGOLO SCHMIDT HAMMER vs ORIZZONTALE $\alpha \text{ (}^\circ\text{)}$	INDICE DIRIMBALZO r	INDICE DIRIMBALZO NORMALIZZATO r_{corretto}
43	24	45	52	49
	24	45	46	42
	24	45	56	53
	24	45	49	45
	24	45	43	39
	24	45	32	27
	24	45	45	41
	24	45	52	49
	24	45	44	40
	24	45	45	41
44	24	0	52	50
	24	0	52	50
	24	0	51	49
	24	0	45	43
	24	0	54	52
	24	0	54	52
	24	0	52	50
	24	0	54	52
	24	0	52	50
	24	0	54	52
49	24	-45	56	56
	24	-45	46	45
	24	-45	54	54
	24	-45	61	61
	24	-45	58	58
	24	-45	50	49
	24	-45	52	52
	24	-45	50	49
	24	-45	41	40
	24	-45	53	53
60	24	0	44	42
	24	0	51	49
	24	0	55	53
	24	0	45	43
	24	0	58	56
	24	0	45	43
	24	0	51	49
	24	0	55	53
	24	0	50	48
	24	0	51	49

DATI DI OUTPUT	
PRINCIPALE $\sigma_c \text{ (Mpa)}$	UNIAXIAL COMPRESSIVE STRENGTH $\sigma_c \text{ (Mpa)}$
109	109
78	78
133	133
90	90
67	67
37	37
74	74
109	109
71	71
74	74
118	118
118	118
113	113
82	82
130	130
130	130
118	118
130	130
118	118
130	130
153	153
93	93
139	139
199	199
168	168
113	113
126	126
113	113
73	73
132	132
78	78
113	113
137	137
82	82
158	158
82	82
113	113
137	137
105	105
113	113

UCS media	
$\sigma_c \text{ (Mpa)}$	111

Tabella 5-2. Misure della compressione uniassiale con martello di Schmidt presso la stazione geomeccanica SG1.

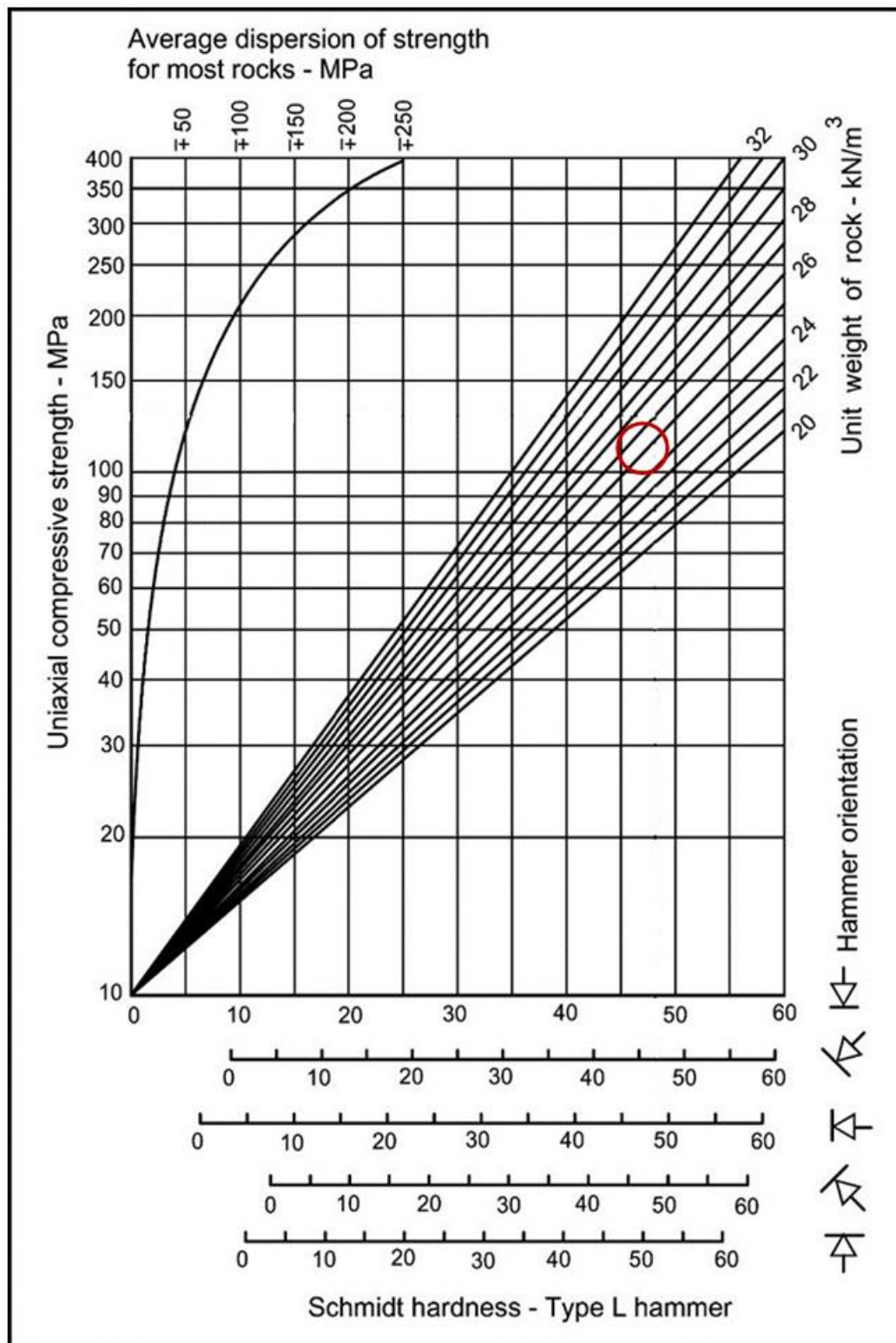


Figura 5-9. Diagramma di correlazione tra l'indice di rimbalzo misurato con il martello di Schmidt e l'UCS secondo il modello proposto da Barton & Choubey (1977)



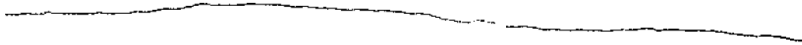




COMMITTENTE:		PROVINCIA DI AREZZO				
STAZIONE GEOMECCANICA:		SG1	Data:	14/02/2024	Operatore/i:	Moruzzi-Sangiorgi
Località:	Mandrioli Pk 191+300	Orientamento parete		Formazione / Litotipo		
		Dip Direction	Dip	Macigno		
		130	70			
Riferimento normativo:		RACCOMANDAZIONI IRSM				
PROFILI DI RUGOSITA'						
N° giunto		JRC				
43	279/67 	4÷6				
44	191/77 	2÷4				
44	191/77 	4÷6				
49	135/49 	10÷12				
60	140/85 	8÷10				

Tabella 5-3. Profili di rugosità misurati presso la stazione geomeccanica SG1.

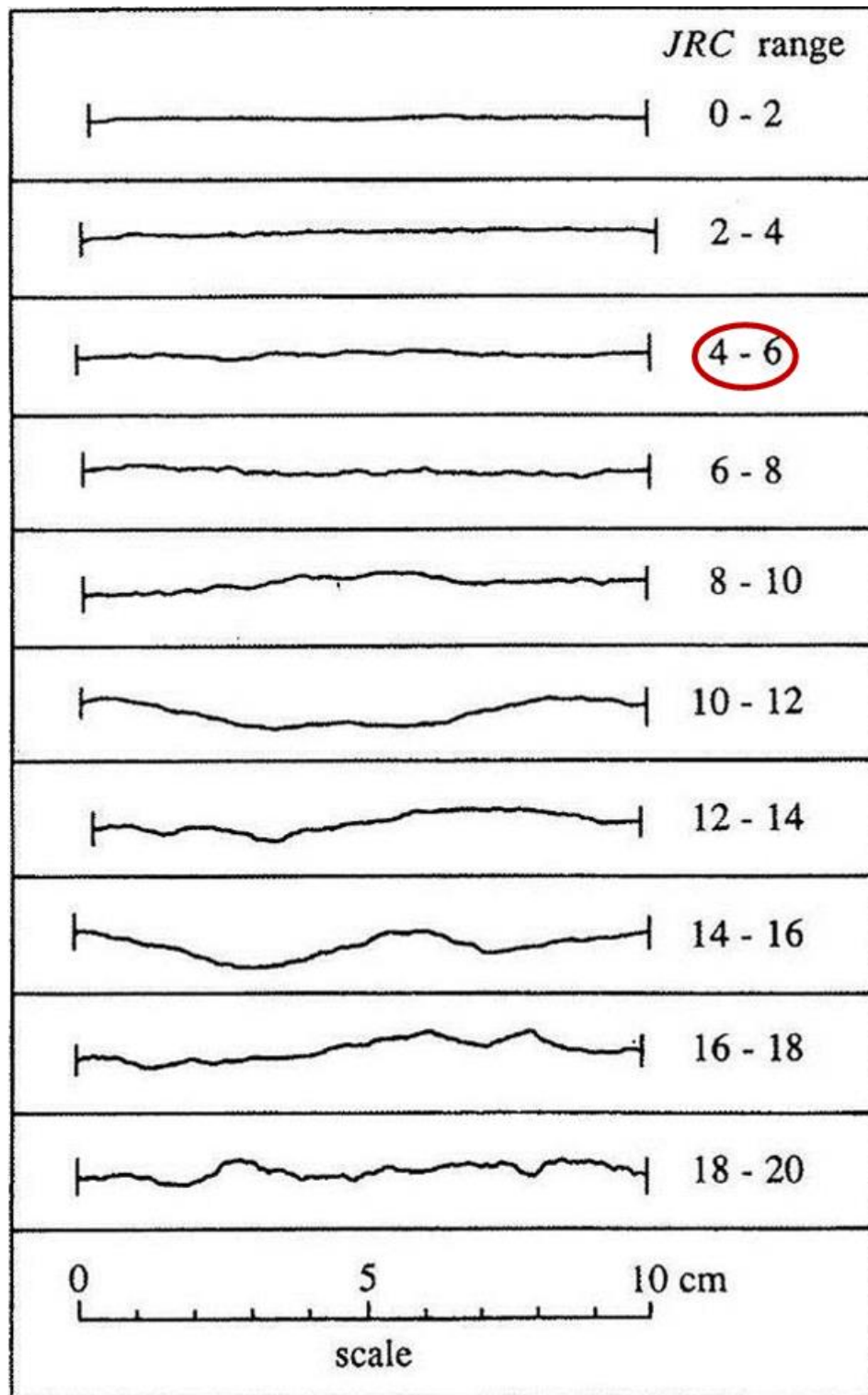


Figura 5-10. Profili di rugosità tipici e valori JRC stimati sull'arenaria della formazione del Macigno. Cerchiata in rosso l'intervallo scelto per l'ammasso.

5.2. STAZIONE GEOMECCANICA SG2 (PK 191+500)

La stazione geomeccanica SG2 è stata misurata lungo una *scan-line* con sviluppo di 3,6 m (Figura 5-11). I dati delle discontinuità rilevate sono sintetizzati in Tabella 5-4.



Figura 5-11. Foto di dettaglio dell'ammasso roccioso arenaceo sul quale è stata effettuata la stazione geomeccanica SG2.

Sul piano generale, si evidenzia un ammasso roccioso di litologia arenacea caratterizzato da discontinuità con ondulazione in prevalenza decimetrica, occasionalmente metrica. Le discontinuità si presentano generalmente serrate, quelle aperte hanno apertura dell'ordine di 1-5 mm, occasionalmente centimetrica. Le aperture misurate presentano in alcuni casi materiale riempimento terrigeno.

I valori di resistenza alla compressione monoassiale (Uniaxial Compressive Strength, UCS), derivato a partire dalla misura dell'indice di rimbalzo con martello di Schmidt, forniscono per la roccia intatta, un valore medio pari a 103 MPa (Tabella 5-2).

I valori di JRC desunti dai profili di rugosità acquisiti mediante pettine di Barton (Tabella 5-3), risultano mediamente compresi entro la classe 6-8, a conferma di superfici mediamente ondulate e rugose.



COMMITTENTE	S22234		
STAZIONE GEOMECCANICA:	SG-2	Data:	14/02/24
		Operatore/i:	FU RS
Località:	PK 197 + 500	GSI:	
		Orientamento parete (°)	
		imm.	incl.
		105	75
		Formazione / Litotipo	

SCHEDA DI RILIEVO GEOMECCANICO

LUNGHEZZA SCAN-LINE (m):

ID	D _{0m}	IMM	INCL	T	A	R	O	S	P	C	SP	ALT.	TIPO DI GIUNTO
1	20	44	86	0			pd/m						
2	30	249	35	0			pd/m						
3	30	73	86	0			pd/m						
4	30	92	84	A			pd/m						
5	40	115	56	0			pd/m						
6	90	762	69										
7	100	5	53	A	1/100	T	dm						
8	60	240	64	A			dm						
9	50	168	80	0	Ø		dm						
10	120	312	75	A	Ø		mm						
11	150	315	69	0							18°20		
12	150	161	84	0	1/100	T	dm						
13	150	355	55	0			dm						
14	180	135	81	0									
15	240	152	80										
* 16	240	341	75	0			mm						
* 17	200	53	79	A			dm						
18	240	354	63				dm						
19	270	137	51				mm						
* 20	200	90	78	A			dm						
21	280	179	79										
22	350	355	42	A									
23	320	312	50	A	Ø								
24	280	15	68	A			pd/m						
* 25	170	265	53	A			pd/m						
26	280	153	73	A			dm						
27	260	68	41	A			mm						
* 28	265	76	53	A			dm						
29	250	84	67	A			dm						
30	210	103	37	A			dm						
31	260	157	87										
32	270	171	71										
33	280	184	68										
34	280	220	72										

D: distanza della frattura intercettata dallo zero del nastro

T: tipo di terminazione A: contro un'altra discontinuità, I: nella matrice rocciosa, O: non visibile o estesa oltre l'estremità dell'affioramento

L: distanza della terminazione dal nastro

A: apertura della discontinuità

R: materiale di riempimento: C: cataclastico M: breccia cementata ("milonite") Ca: calcite Cc: coesivo Gr: granulare T: terrigena

O: ondulazione

S: scabrezza

P: persistenza

C: consistenza

F: frequenza

Sp: spaziatura

Note: Parete bagnata, venute d'acqua tra gli strati



COMMITTENTE		S2223A													
STAZIONE GEOMECCANICA:		SG2	Data:		14/02/24		Operatori:		FU		RS				
SCHEDA DI RILIEVO GEOMECCANICO															
ID	D	IMM	INCL	T	L	A	R	O	S	P	C	SP	ALT.	TIPO DI GIUNTO	
35	250	276	89	0				plm							
36	250	245	86												
37	320	77	79	A				dm							
38	430	296	55			d									
39	360	223	26												SZ

Tabella 5-4. Scheda di rilievo geomeccanico relativa alla stazione geomeccanica SG2



MISURE TRAMITE MARTELLO DI SCHMIDT			SG2			
CORRELAZIONE $r \rightarrow \sigma_c$						
DATI DI INPUT					DATI DI OUTPUT	
NUMERO DELLA DISCONTINUITÀ	DENSITÀ DELLA ROCCIA $g \text{ (kN/m}^3\text{)}$	ANGOLO SCHMIDT HAMMER vs ORIZZONTALE $\alpha \text{ (}^\circ\text{)}$	INDICE DI RIMBALZO r	INDICE DI RIMBALZO NORMALIZZATO r_{corretto}	PRINCIPALE $\sigma_c \text{ (Mpa)}$	UNIAXIAL COMPRESSIVE STRENGTH $\sigma_c \text{ (Mpa)}$
16	24	0	52	50	118	118
	24	0	57	55	151	151
	24	0	53	51	124	124
	24	0	47	45	90	90
	24	0	59	57	166	166
	24	0	49	47	100	100
	24	0	57	55	151	151
	24	0	58	56	158	158
	24	0	49	47	100	100
	24	0	60	58	174	174
17	24	0	56	54	143	143
	24	0	50	48	105	105
	24	0	49	47	100	100
	24	0	47	45	90	90
	24	0	54	52	130	130
	24	0	49	47	100	100
	24	0	51	49	113	113
	24	0	53	51	124	124
	24	0	52	50	118	118
	24	0	40	37	63	63
20	24	0	28	25	34	34
	24	0	46	44	86	86
	24	0	43	41	74	74
	24	0	50	61	199	199
	24	0	49	47	100	100
	24	0	50	48	105	105
	24	0	43	41	74	74
	24	0	50	48	105	105
	24	0	50	48	105	105
	24	0	54	52	130	130
25	24	45	56	53	133	133
	24	45	40	35	55	55
	24	45	48	44	86	86
	24	45	49	45	90	90
	24	45	53	50	115	115
	24	45	50	46	94	94
	24	45	48	44	86	86
	24	45	54	51	120	120
	24	45	50	46	94	94
	24	45	50	46	94	94
28	24	-45	38	37	63	63
	24	-45	42	41	77	77
	24	-45	52	52	126	126
	24	-45	44	43	84	84
	24	-45	39	38	66	66
	24	-45	38	37	63	63
	24	-45	46	45	93	93
	24	-45	37	36	60	60
	24	-45	38	37	63	63
	24	-45	40	39	69	69
UCS media						
$\sigma_c \text{ (Mpa)}$			103			

Tabella 5-5. Misure della compressione uniassiale con martello di Schmidt presso la stazione geomeccanica SG2.

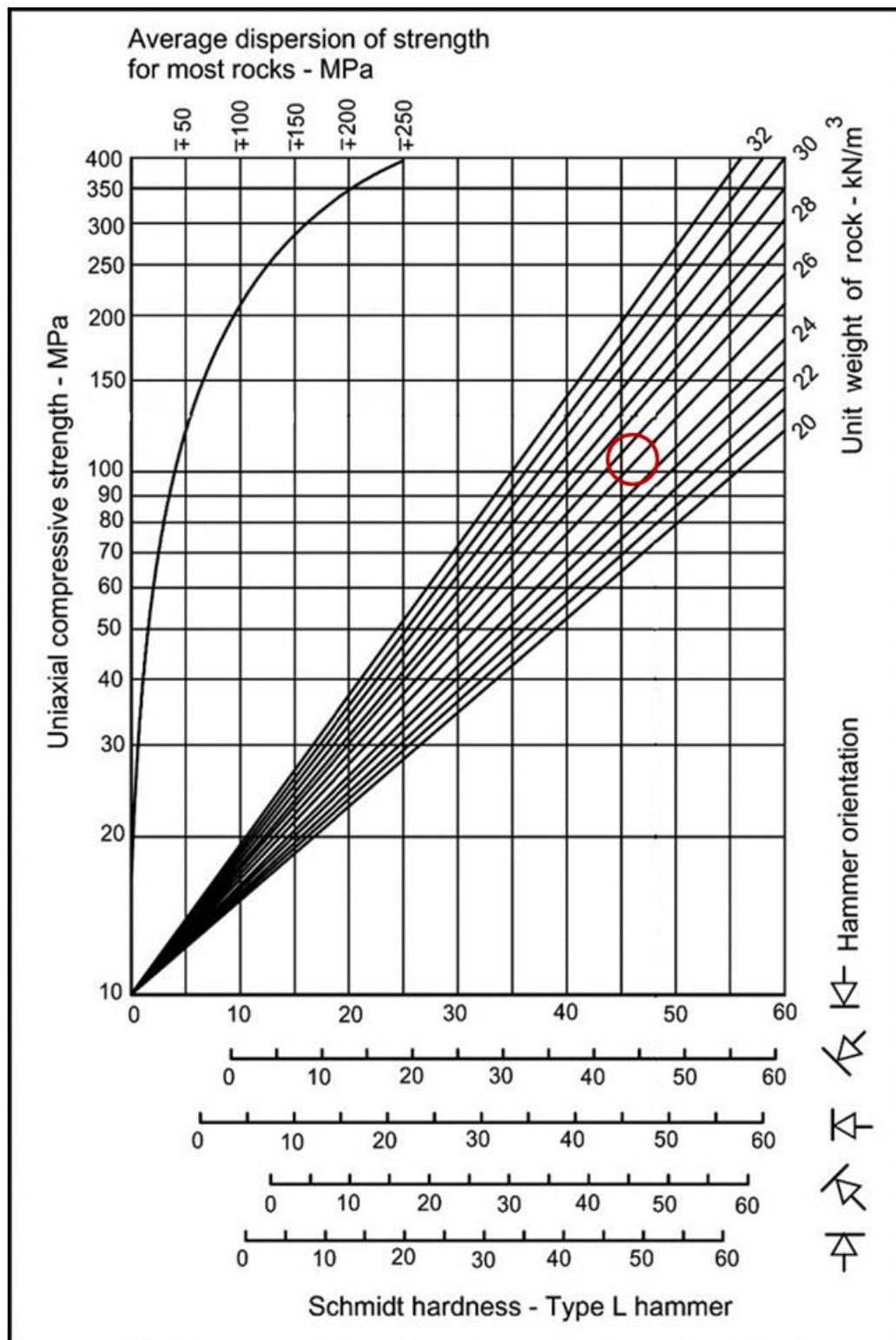
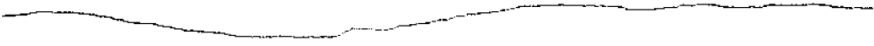

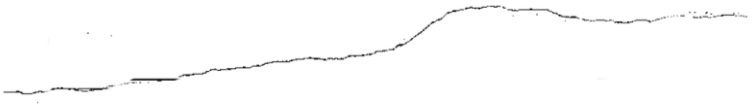




Figura 5-12. Diagramma di correlazione tra l'indice di rimbalzo misurato con il martello di Schmidt e l'UCS secondo il modello proposto da Barton & Choubey (1977)



COMMITTENTE / OPERA: PROVINCIA DI AREZZO				
STAZIONE GEOMECCANICA: SG2		Data: 14/02/2024	Operatore/i: Moruzzi-Sangiorgi	
Località:	Mandrioli Pk 191+500	Orientamento parete		Formazione / Litotipo
		Dip Direction	Dip	
		105	75	
Macigno				
Riferimento normativo:		RACCOMANDAZIONI IRSM		
PROFILI DI RUGOSITA'				
N° giunto				JRC
16	341/75 			8÷10
17	59/79 			2÷4
20	99/78 			12÷14
25	265/53 			6÷8
28	76/53 			6÷8




COMMITTENTE / OPERA: PROVINCIA DI AREZZO				
STAZIONE GEOMECCANICA: SG2		Data: 14/02/2024	Operatore/i: Moruzzi-Sangiorgi	
Località:	Mandrioli Pk 191+500	Orientamento parete		Formazione / Litotipo
		Dip Direction	Dip	Macigno
		105	75	
Riferimento normativo:		RACCOMANDAZIONI IRSM		
PROFILI DI RUGOSITA'				
N° giunto			JRC	
39	<div>223/26</div> 		6÷8	

Tabella 5-6. Profili di rugosità misurati presso la stazione geomeccanica SG2.

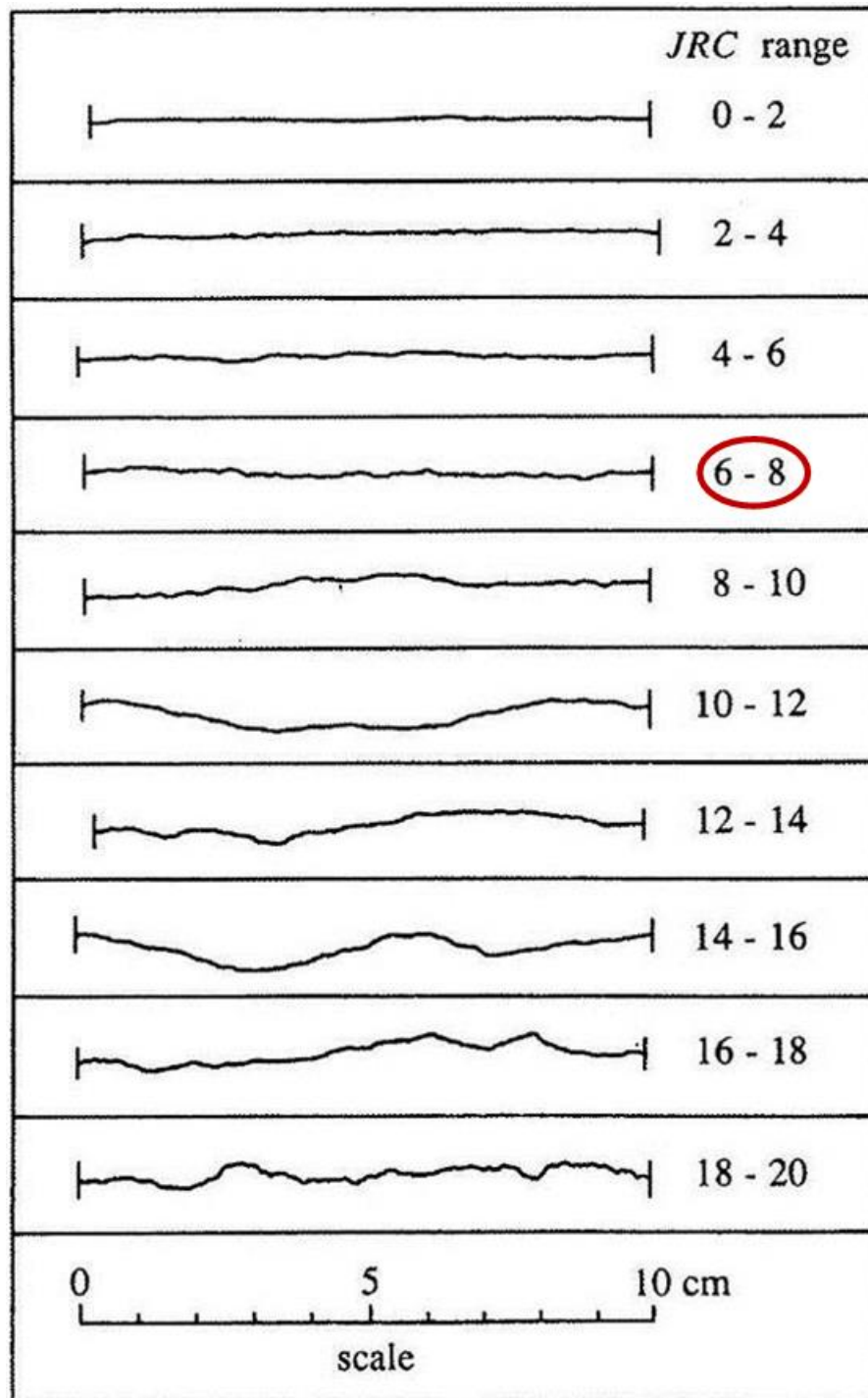


Figura 5-13. Profili di rugosità tipici e valori JRC stimati sull'arenaria della formazione del Macigno. Cerchiata in rosso l'intervallo scelto per l'ammasso.

6. RISULTATI DEL RILIEVO GEOMECCANICO

6.1. GEOMECCANICA DI DETTAGLIO (SG1)

I poli dei piani delle discontinuità rilevate alla stazione geomeccanica di dettaglio SG1, sono rappresentati nello stereonet equiangolare visibile in Figura 6-1.

Sulla base delle concentrazioni dei poli delle discontinuità rilevate, è stato possibile suddividerle in 5 diverse famiglie (*sets*). Le giaciture medie delle diverse famiglie sono riportate in Tabella 6-1.

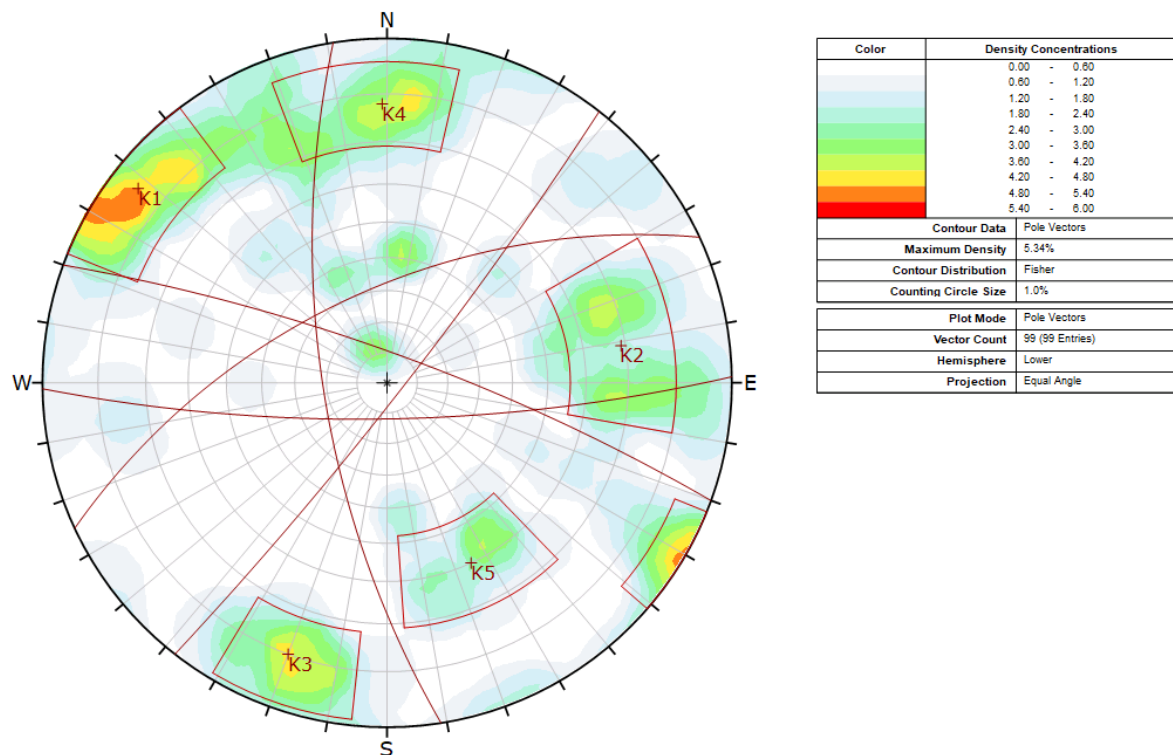


Figura 6-1. Stereonet delle discontinuità nella stazione geomeccanica SG1 costituita da 5 diverse famiglie (*sets*)

Famiglia	Direzione di immersione media [°]	Inclinazione media [°]
K1	128	85
K2	261	69
K3	20	80
K4	179	78
K5	335	60

Tabella 6-1. Giacitura media delle 4 famiglie di discontinuità individuate nella stazione SG1

6.2. GEOMECCANICA SPEDITIVA (SG2)

I poli dei piani delle discontinuità rilevate alla stazione geomeccanica speditiva SG2 sono rappresentati nello stereonet equiangolare visibile in Figura 6-2.

Sulla base delle concentrazioni dei poli delle discontinuità rilevate, è stato possibile suddividerle in 3 diverse famiglie (sets). Le giaciture medie delle diverse famiglie sono riportate in Tabella 6-2.

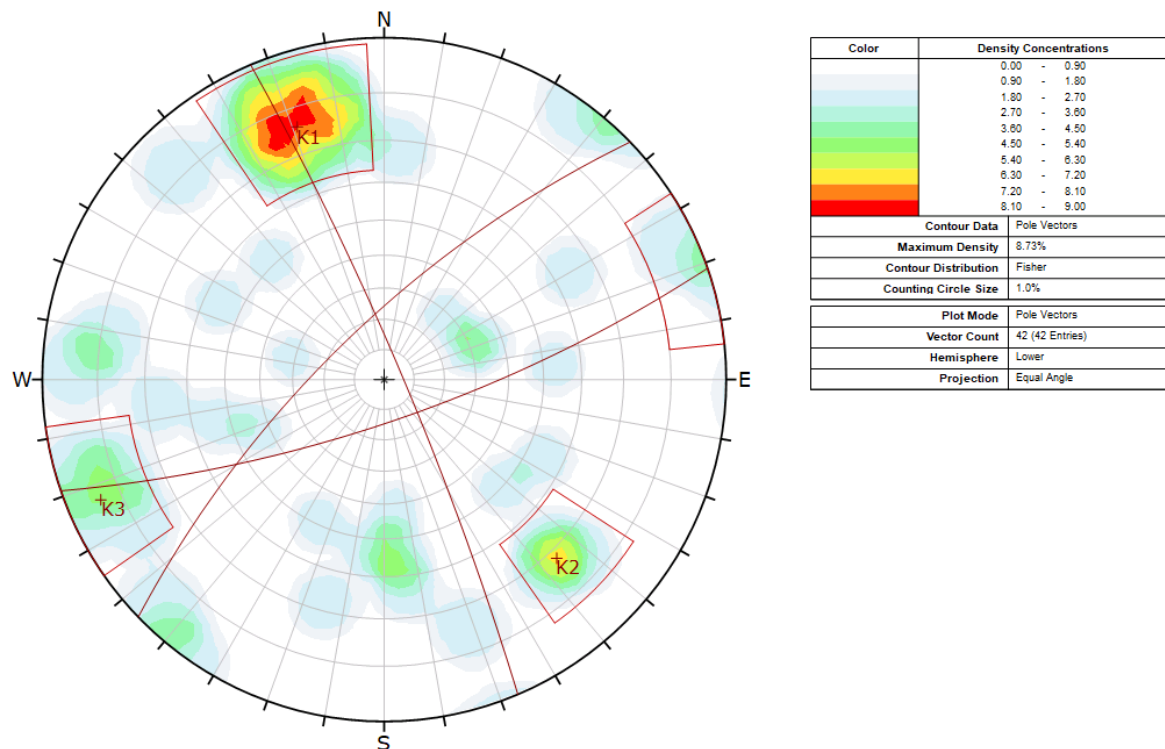


Figura 6-2. Stereonet delle discontinuità nella stazione geomeccanica speditiva SG1 costituita da 4 diverse famiglie (sets)

Famiglia	Direzione di immersione media [°]	Inclinazione media [°]
K1	161	76
K2	316	72
K3	67	84

Tabella 6-2. Giacitura media delle 4 famiglie di discontinuità individuate nella stazione SG2

6.3. STAZIONI GEOMECCANICHE SPEDITIVE

Nelle successive tabelle (Figura 6-3÷Figura 6-11) vengono riportati i dati qualitativo/quantitativi raccolti in corrispondenza delle stazioni speditive GSI1÷GSI5 in corrispondenza delle quali si è valutato il *Geological Strenght Index* (*sensu Hoek & Marinos, 2000*) dell'ammasso roccioso fratturato.

Nel complesso si può assumere un valore medio di GSI tra 45 e 55.

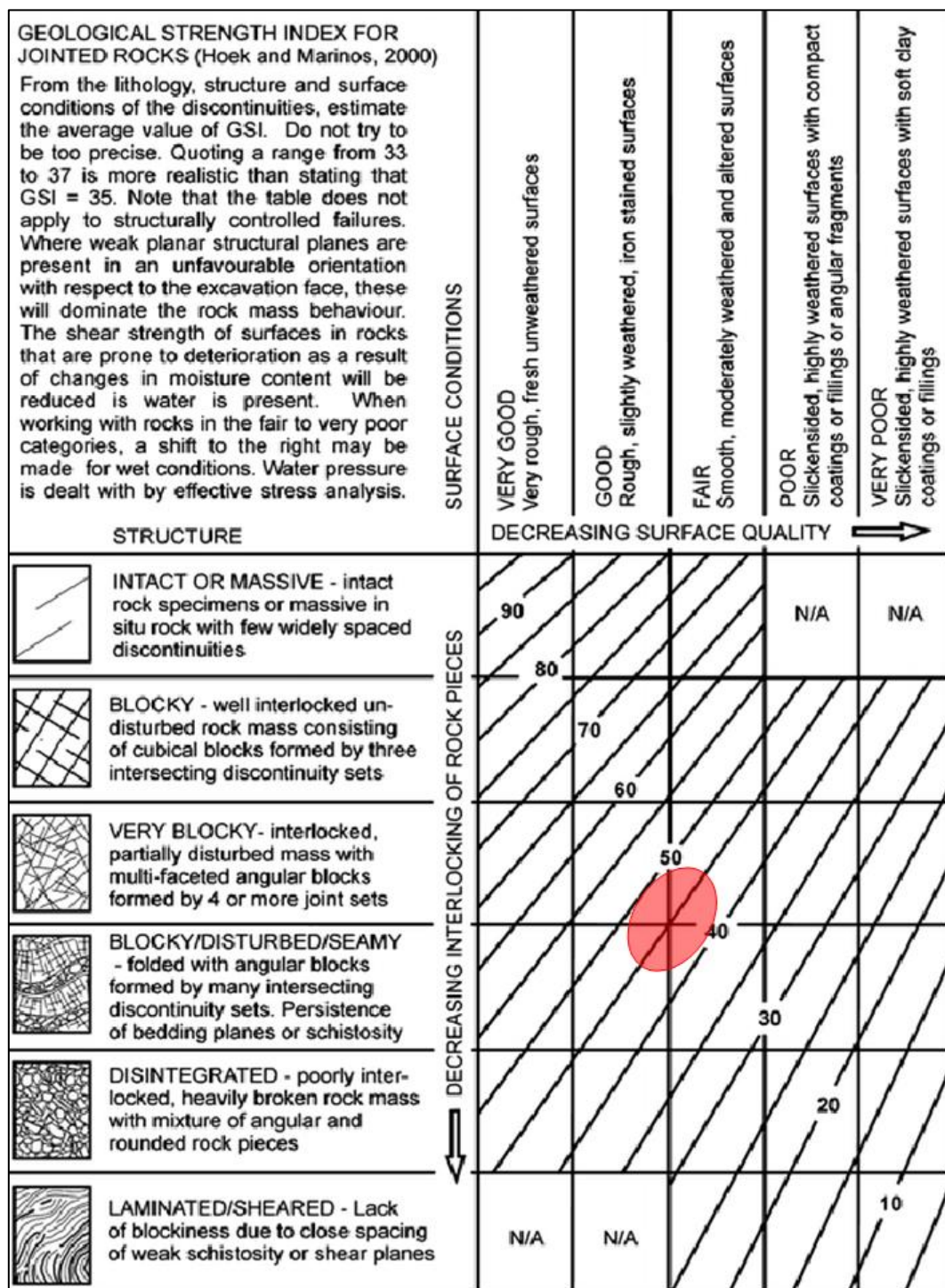


Figura 6-3. Schema di classificazione dell'ammasso roccioso fratturato GSI (Hoek & Marinos, 2000), il cerchio rosso individua il GSI relativo alla stazione speditiva GSI1



Figura 6-4. Immagine di riferimento per la valutazione del GSI relativo all'ammasso roccioso in corrispondenza della stazione speditiva GSI1

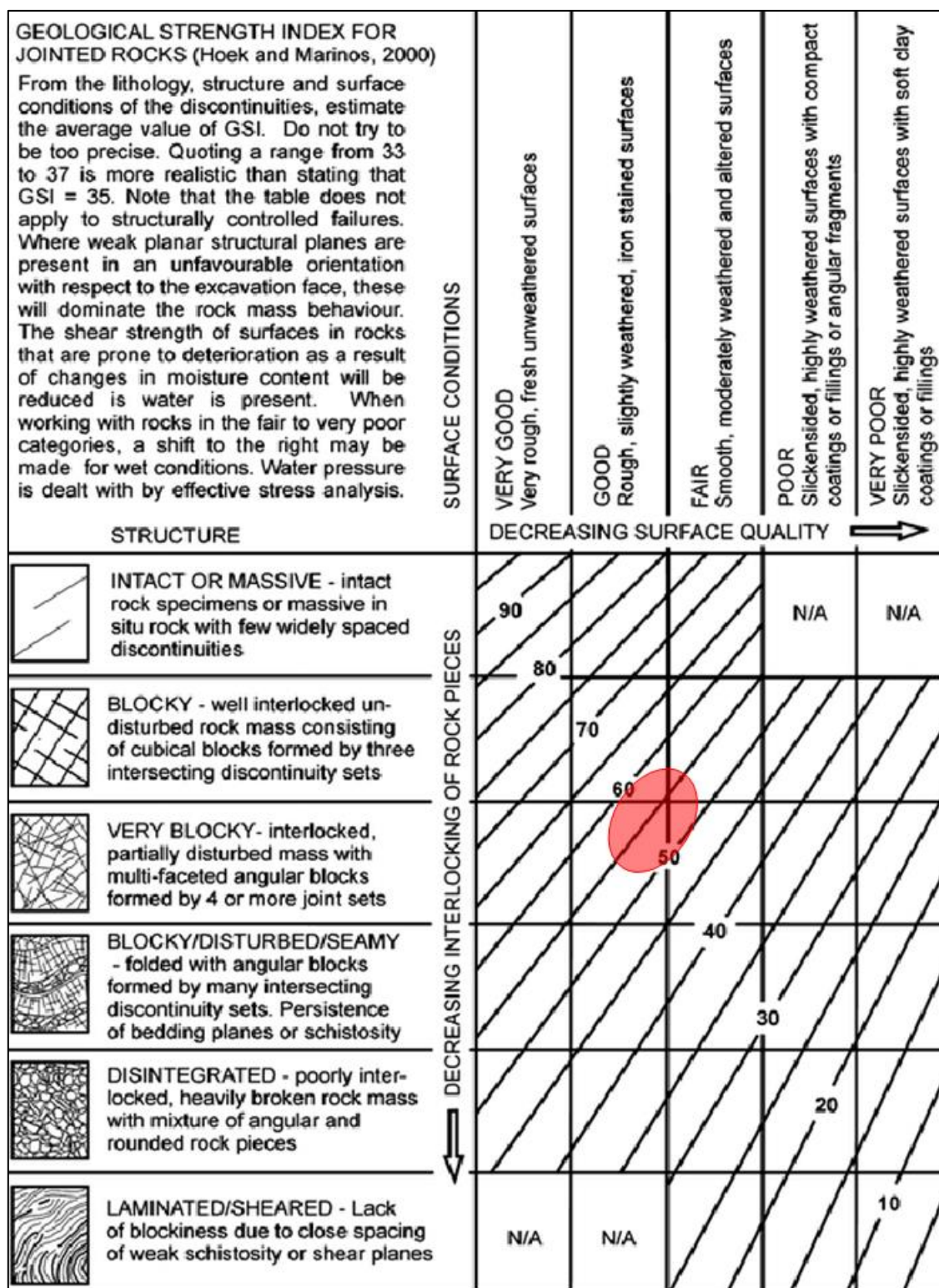


Figura 6-5. Schema di classificazione dell'ammasso roccioso fratturato GSI (Hoek & Marinos, 2000), il cerchio rosso individua il GSI relativo alla stazione speditiva GSI2



Figura 6-6. Immagine di riferimento per la valutazione del GSI relativo all'ammasso roccioso in corrispondenza della stazione speditiva GSI2

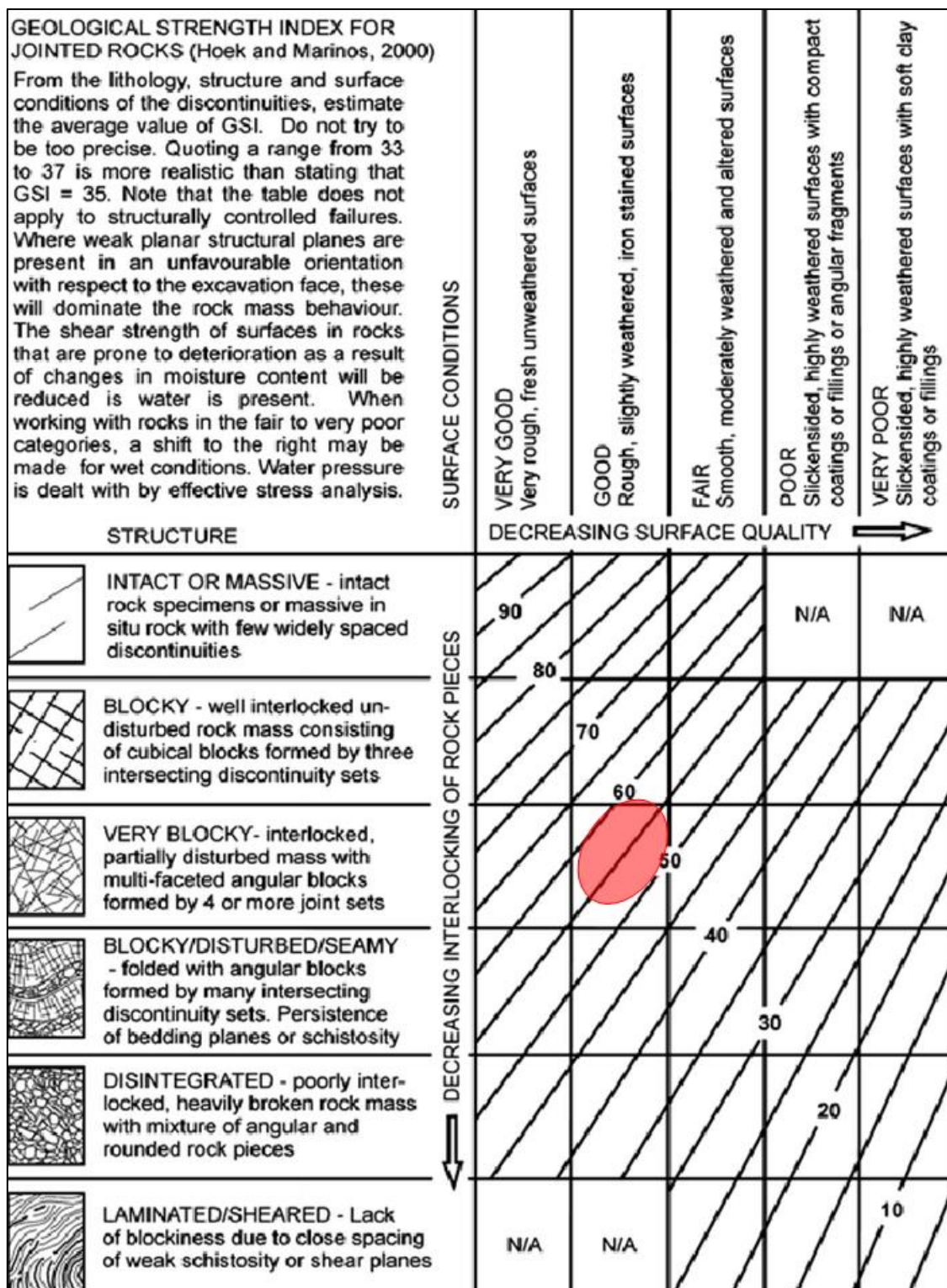


Figura 6-7. Schema di classificazione dell'ammasso roccioso fratturato GSI (Hoek & Marinos, 2000), il cerchio rosso individua il GSI relativo alla stazione speditiva GSI3



Figura 6-8. Immagine di riferimento per la valutazione del GSI relativo all'ammasso roccioso in corrispondenza della stazione speditiva GSI3

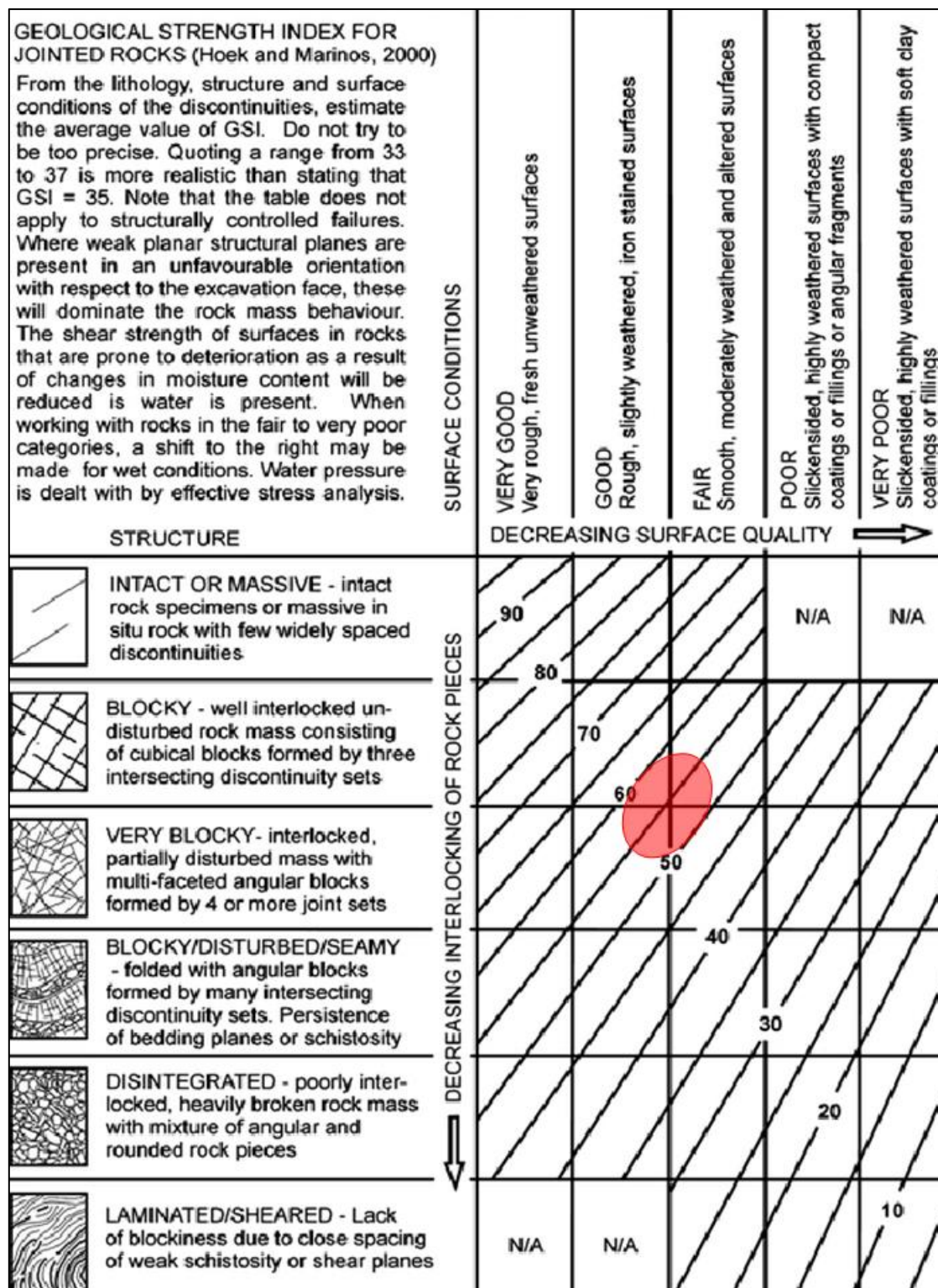


Figura 6-9. Schema di classificazione dell'ammasso roccioso fratturato GSI (Hoek & Marinos, 2000), il cerchio rosso individua il GSI relativo alla stazione speditiva GS14



Figura 6-10. Immagine di riferimento per la valutazione del GSI relativo all'ammasso roccioso in corrispondenza della stazione speditiva GSI4

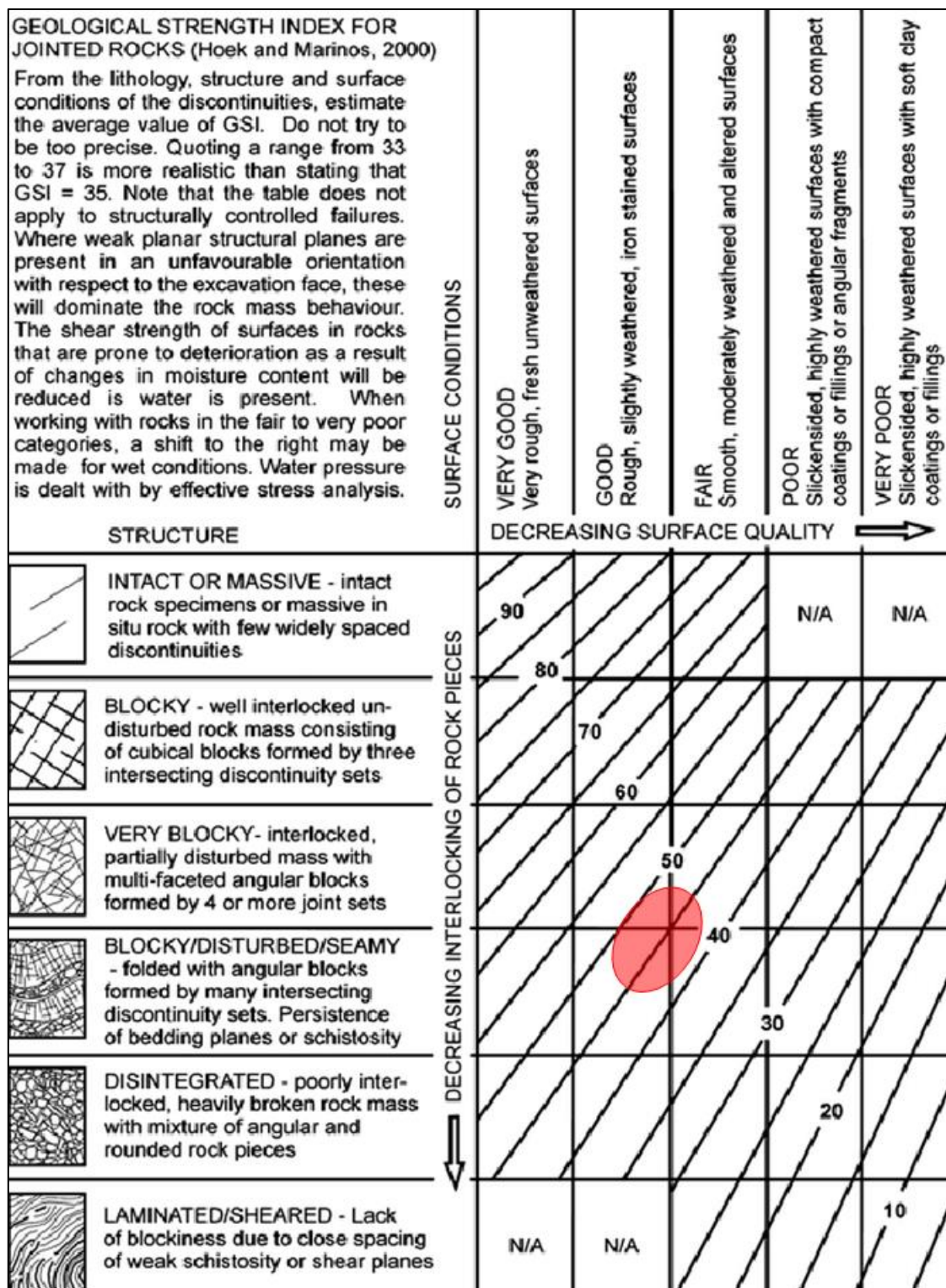


Figura 6-11. Schema di classificazione dell'ammasso roccioso fratturato GSI (Hoek & Marinos, 2000), il cerchio rosso individua il GSI relativo alla stazione speditiva GSI5



Figura 6-12. Immagine di riferimento per la valutazione del GSI relativo all'ammasso roccioso in corrispondenza della stazione speditiva GSI5

7. ANALISI CINEMATICHE

Le analisi cinematiche di una scarpata rocciosa mediante proiezioni stereografiche sono un'utile metodologia che permette di valutare i potenziali meccanismi di rottura. Occorre tenere in considerazione i seguenti punti:

- Le analisi rappresentano un punto di partenza e dovrebbero essere accompagnate da più specifiche analisi puntuali in fase di progettazione esecutiva e di esecuzione dei lavori.
- Le scarpate rocciose potrebbero paventare più di un meccanismo di rottura. Sono rari i casi ove si riscontrano meccanismi di rottura puri: ciò vale particolarmente per l'analisi del ribaltamento ove possono concorrere componenti di scivolamento e/o rotazionali.
- Anche se le analisi cinematiche indicano un rischio di rottura, ciò non significa necessariamente che il meccanismo si esplicherà in un evento franoso, in quanto ci sono altri fattori che governano l'innescò e la resistenza al taglio per garantire la stabilità (come, ad esempio, la coesione lungo i giunti, la loro persistenza, i ponti di roccia, ecc.). Contrariamente, altri fattori potrebbero peggiorare la stabilità di una scarpata cinematicamente stabile, come ad esempio la pressione dell'acqua lungo le discontinuità o l'azione meccanica delle radici di alberi ad alto fusto sui cigli delle scarpate.
- È importante prendere in considerazione anche le fasce di taglio dovute alle strutture tettoniche principali che possono giocare un ruolo dominante sulla stabilità a causa delle loro scadenti caratteristiche geomeccaniche e della loro genetica persistenza. Infatti, in concomitanza di queste fasce di taglio, le intersezioni dei giunti che possono generare meccanismi cinematicamente ammissibili sono maggiormente sfavorevoli e non sono colte dall'analisi statistica.
- Analisi di maggior dettaglio sia deterministiche sia probabilistiche possono essere localmente eseguite mediante software specifici.

7.1. PRODOTTI DELLE ANALISI CINEMATICHE

Sono state effettuate le seguenti analisi cinematiche: Planar Sliding, Flexural Toppling e Wedge Sliding. Per l'analisi della densità di concentrazione dei poli, una pratica regola (DIPS 8.0. - User manual - Rocscience) per la valutazione statistica dei dati è:

- concentrazione $c > 6\%$ è molto significativa;
- concentrazione compresa tra $4\% < c < 6\%$ è marginalmente significativa;
- concentrazione $c < 4\%$ dovrebbe essere trascurata a meno che il numero totale dei dati non ammonti a diverse centinaia.

7.1.1. PLANAR SLIDING

Il *Daylight Envelope* viene individuato in Figura 7-1 con la tipica forma ovoidale e corrisponde alla giacitura necessaria affinché il meccanismo di scivolamento planare si verifichi: ogni polo che ricade all'interno di questo involucro è cinematicamente libero di scorrere se la resistenza al taglio non è sufficiente ad opporsi al cinematismo. Il cono di attrito, assunto in questo esempio tipologico pari a 30° , è rappresentato da un cerchio che si origina dal centro dello stereonet: ogni polo che ricade al di fuori del cono di attrito rappresenta un piano che potrebbe scivolare, se cinematicamente possibile. L'intersezione del *Daylight Envelope* e del cono di attrito genera la regione critica per lo

scivolamento planare: ogni polo che ricade in questa regione rappresenta un piano che può scivolare. La regione critica per lo scivolamento planare è così definita dai poli che ricadono all'esterno del cono d'attrito e all'interno del *Daylight Envelope*. L'analisi dello scivolamento planare descritta sopra considera l'intera regione del *Daylight Envelope* come zona cinematicamente valida. In pratica è stato osservato che lo scivolamento planare, ed anche il ribaltamento, tendono a verificarsi quando l'immersione dei piani è all'interno di un certo intervallo rispetto all'angolo di immersione della parete. Tipicamente si considera un intervallo variabile da 20° a 30°, ed i poli che ricadono al di fuori rappresentano un rischio basso. I limiti laterali sono rappresentati dalle linee rette che definiscono un intervallo di ampiezza misurato partendo dall'immersione della parete.

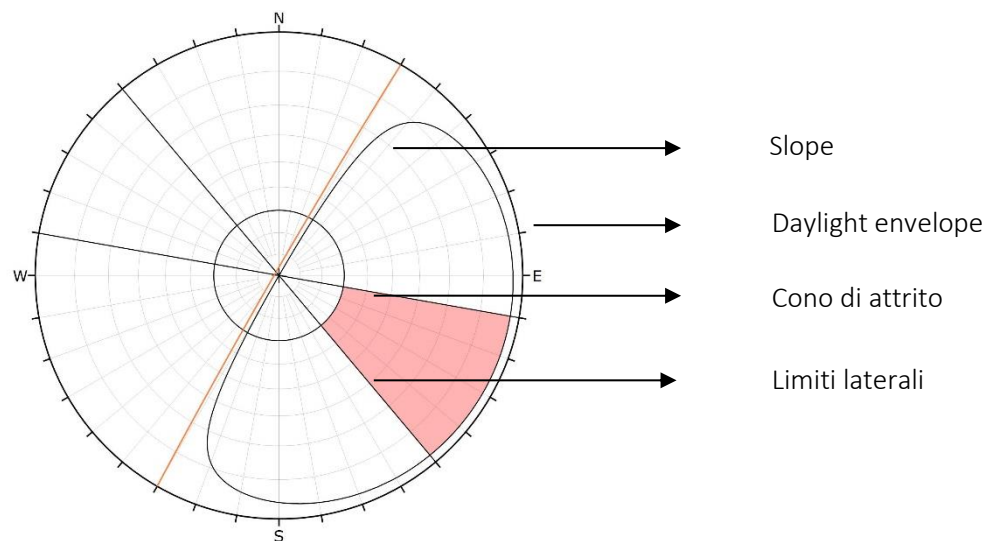


Figura 7-1. Stereonet tipologico *planar sliding*.

7.1.2.WEDGE SLIDING

Gli elementi chiave di questo prodotto sono: la parete rocciosa (slope), il piano del cono d'attrito (misurato dal perimetro dello stereonet e non dal centro in quanto l'elaborazione lavora con le linee di scivolamento e non con i poli come precedentemente), i punti d'intersezione dei piani (Figura 7-2). Ogni punto plottato in questo tipo di elaborato rappresenta l'intersezione di due piani di discontinuità: sono considerate tutte le possibili intersezioni, ovvero ogni piano è intersecato con ognuno degli altri piani contenuti nel dataset. I punti di intersezione rappresentano la Direzione e l'Immersione (trend/plunge) della linea d'intersezione di due piani di discontinuità. Si individuano due regioni critiche per lo scivolamento di cunei:

- la regione critica principale è individuata dal settore tra la parte interna del cono d'attrito e la parte esterna della parete (in rosso); le intersezioni che ricadono all'interno rappresentano cunei che soddisfano le condizioni attrittive e cinematiche per lo scivolamento di cunei.
- La regione critica secondaria (in giallo) è individuata dal settore tra la parete rocciosa ed il piano inclinato quanto l'angolo d'attrito; le intersezioni che ricadono all'interno di queste zone rappresentano sempre cunei che scivolano su un piano di discontinuità.

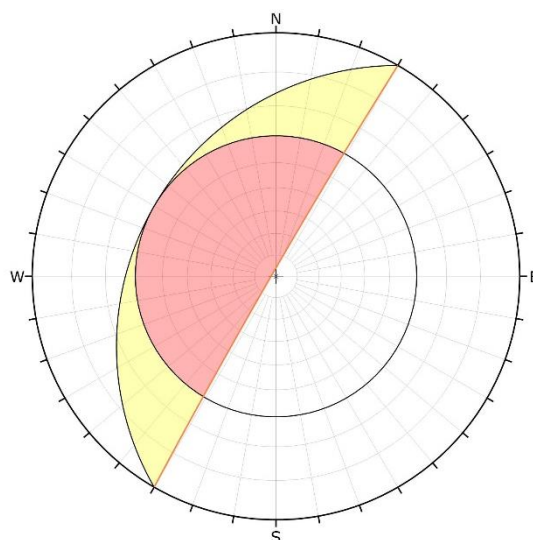


Figura 7-2. Stereonet tipologico *wedge sliding*

7.1.3.FLEXURAL TOPPLING

I piani non possono ribaltarsi se non possono scorrere gli uni rispetto agli altri. Il piano limite di scorrimento definisce pertanto la regione critica. I limiti laterali hanno lo stesso significato di quelli introdotti per lo scivolamento planare, assunti pari a 20° . La regione critica è individuata tra il piano limite di scorrimento, il perimetro dello stereonet ed i limiti laterali: ogni polo che ricade all'interno della regione in colore rosso è a rischio di ribaltamento (Figura 7-3).

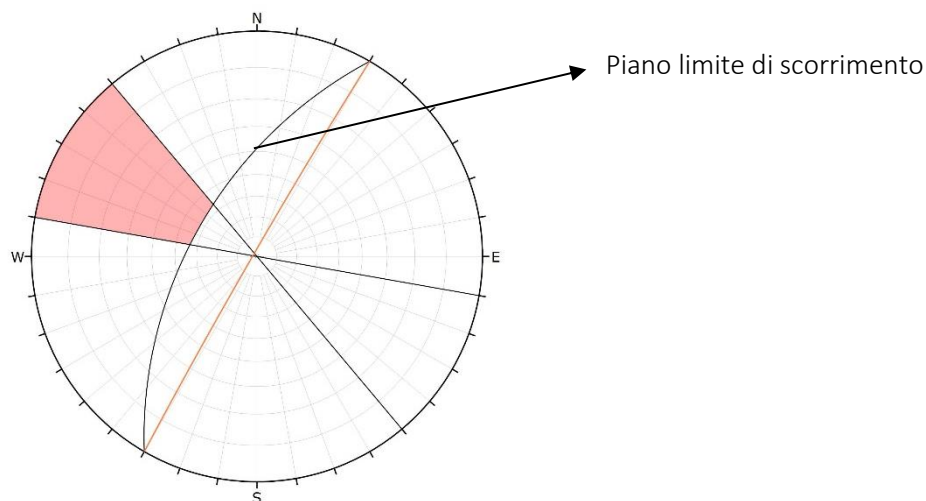


Figura 7-3. Stereonet tipologico *flexural toppling*

7.1.4.DIRECT TOPPLING

Gli elementi chiave del ribaltamento primario come definito in Hudson e Harrison (1997), sono (Figura 7-4):

2 famiglie di discontinuità che si intersecano generando una linea che immerge all'interno del versante in modo da formare blocchi isolati che possono ribaltare; una terza famiglia di discontinuità che agisca da piano di svincolo e permetta ai blocchi di ribaltare.

Il meccanismo di ribaltamento diretto è critico sia quando i piani delle discontinuità sono subverticali e si intersecano con immersione verso l'interno della scarpata sia quando sono presenti piani suborizzontali che sottoescavano i blocchi.

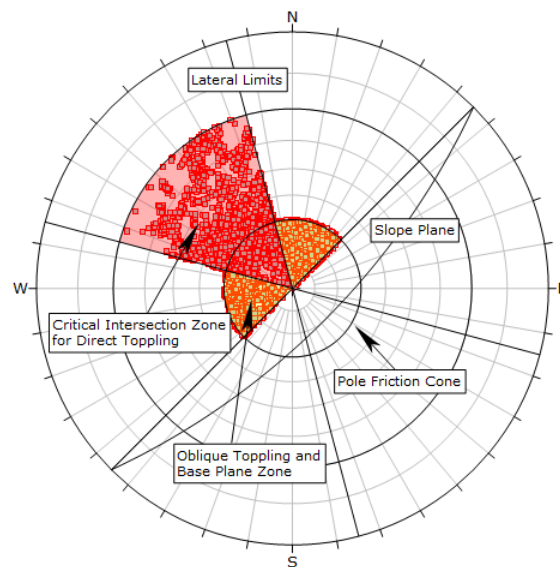


Figura 7-4. Stereonet tipologico *direct toppling*

Il ribaltamento primario ha vari criteri geometrici che considera contemporaneamente. In riferimento alla Figura 7-5, in rosso sono individuate le zone 1 e 2 che costituiscono le aree critiche primarie, in giallo le zone 3 corrispondenti alle aree critiche secondarie corrispondenti ai ribaltamenti obliqui.

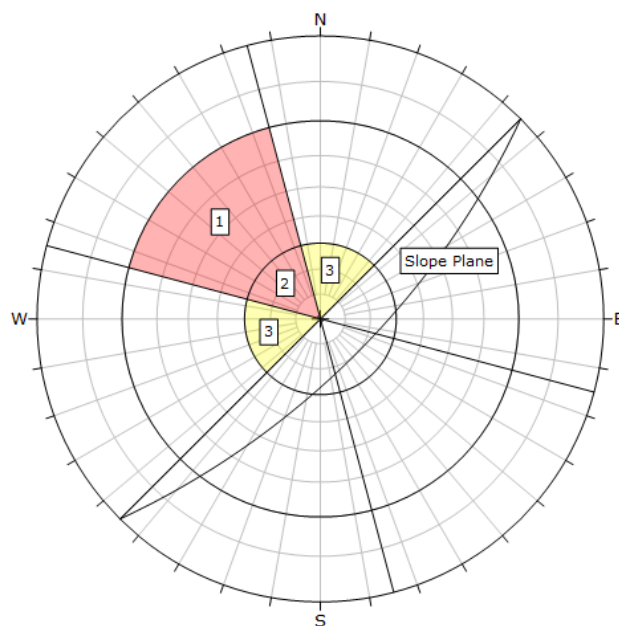


Figura 7-5. Stereonet tipologico *direct toppling*, regioni principali

Le intersezioni che ricadono all'interno delle regioni critiche 1 e 2 presentano il rischio della formazione di blocchi che ribaltano. Si tratta di intersezioni che immergono all'interno della scarpata e rientrano all'interno dei limiti laterali. Il limite esterno è dato da un cerchio con angolo del cono pari all'angolo della scarpata: la distanza di questo limite dal perimetro esterno dello stereonet è pari a $90^\circ - \text{l'angolo della scarpata}$ (nella Figura 7-5 = $90^\circ - 70^\circ = 20^\circ$). Si noti che le intersezioni che ricadono nella zona 2 sono più inclinate di quelle della zona 1, perciò dovrebbero essere considerate a rischio maggiore rispetto a quelle della zona 1.

Il limite tra la zona 1 e 2 è il cono d'attrito dei piani di base: ciò non è direttamente rilevante per le intersezioni critiche, ma è utilizzato per distinguere la presenza del meccanismo di scivolamento o non scivolamento per i piani di base. Le intersezioni che ricadono nelle zone gialle 3 rappresentano la possibilità di ribaltamenti obliqui che sono considerati solamente per le intersezioni ad alto angolo prossime alla verticalità. In sintesi, ogni polo che ricade all'interno delle zone 2 e 3 rappresenta un piano di base che può agire come potenziale superficie di rilascio per blocchi che ribaltano, ogni polo che ricade in zona 1 costituisce un piano di rilascio che funziona con meccanismo misto scivolamento – ribaltamento. Da segnalare infine che DIPS attualmente non implementa i piani che immergono all'interno della scarpata che possono comunque fungere da piani di svincolo per il meccanismo di ribaltamento primario: essi si trovano nel mezzo cerchio opposto alle zone 2 e 3.

7.2. RISULTATI DELLE ANALISI CINEMATICHE

A partire dalle giaciture dei piani di discontinuità, le analisi cinematiche sono state elaborate inserendo nel *software* l'orientazione e l'inclinazione della parete nel punto di rilievo.

7.2.1. STAZIONE GEOMECCANICA SG1

- Orientazione della parete: DIR130/IMM70

La Figura 7-6 mostra i risultati dell'analisi cinematica per lo scivolamento planare (*planar sliding*).

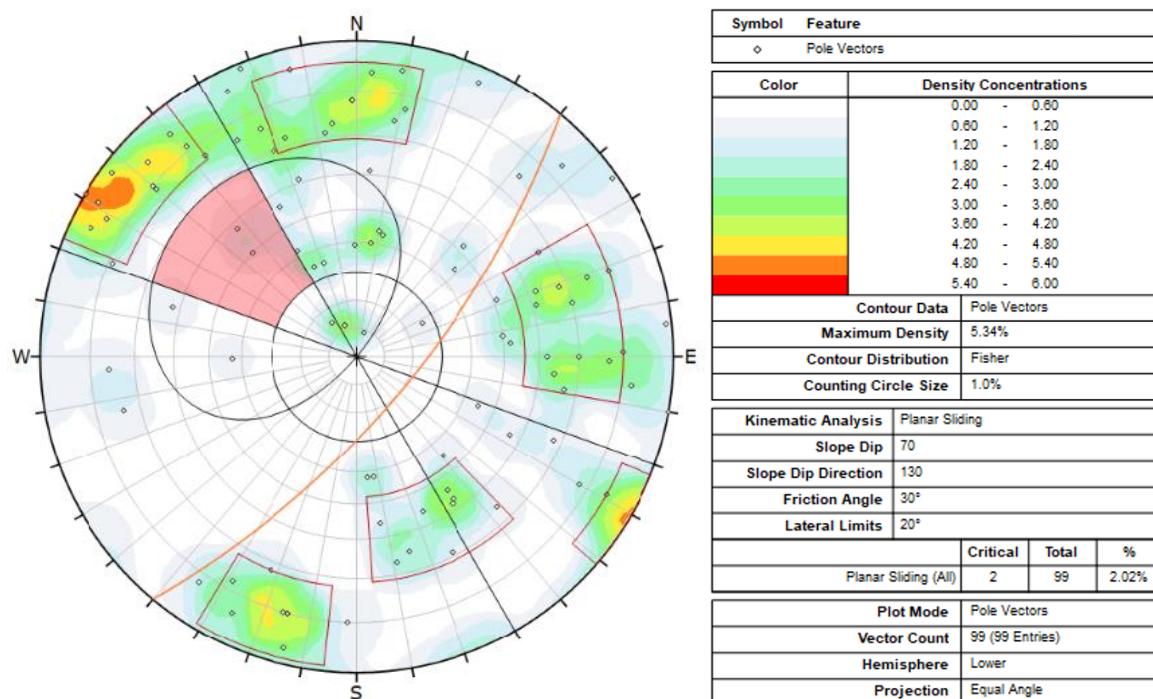


Figura 7-6. *Planar sliding* stazione geomeccanica SG1

Un totale di 2 poli, appartenenti ad un set di discontinuità con carattere randomico (ovvero non incluso all'interno delle famiglie identificate), ricadono all'interno della zona critica possono dare luogo ad una cinematica di scivolamento planare. Ciò equivale a circa il 2% circa del totale delle discontinuità rilevate.

La Figura 7-7 riporta i risultati dell'analisi cinematica per lo scivolamento di cunei (*wedge sliding*), che possono scivolare lungo la linea d'intersezione tra due piani.

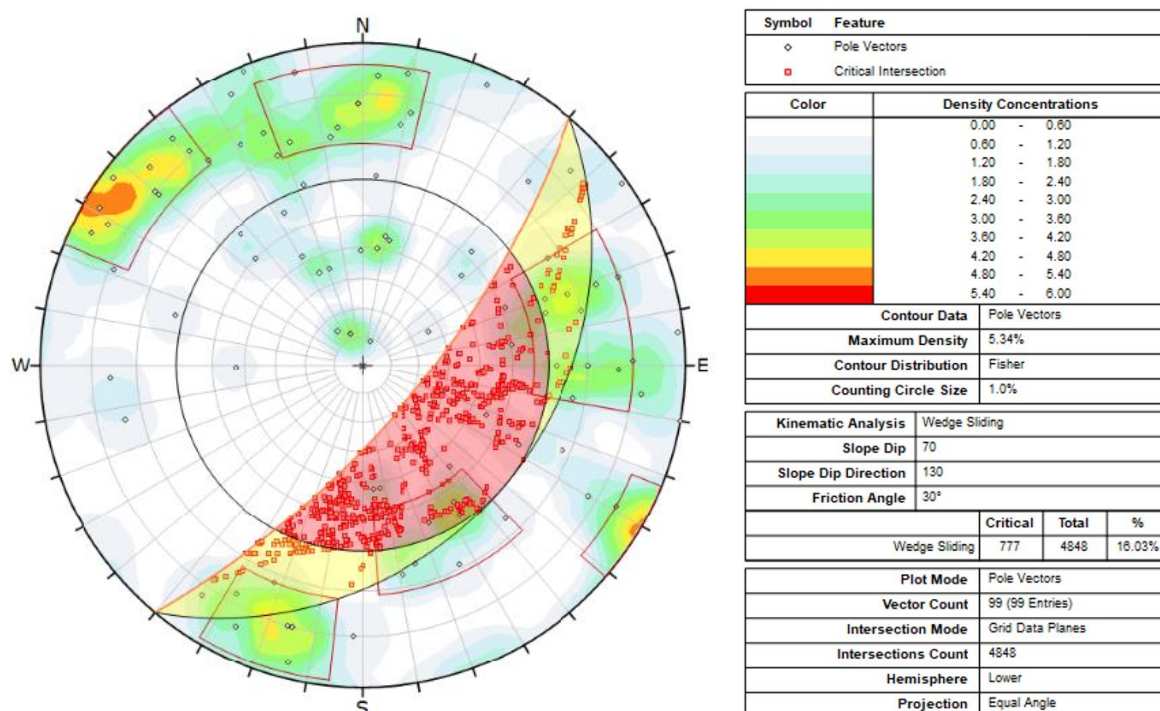


Figura 7-7. *Wedge sliding* stazione geomeccanica SG1

Delle 4848 intersezioni possibili tra le superfici di discontinuità rilevate, 777 possono dare luogo a scivolamento di cuneo, ovvero circa il 16% del totale considerato. Sono le intersezioni con inclinazione compresa tra 20° e 50° ad essere maggiormente problematiche. Le discontinuità che presentino tali inclinazioni sono pertanto considerabili come le più sfavorevoli in sede di progettazione (si veda il Capitolo 9).

La Figura 7-8 riporta i risultati dell'analisi cinematica al ribaltamento flessurale (*flexural toppling*).

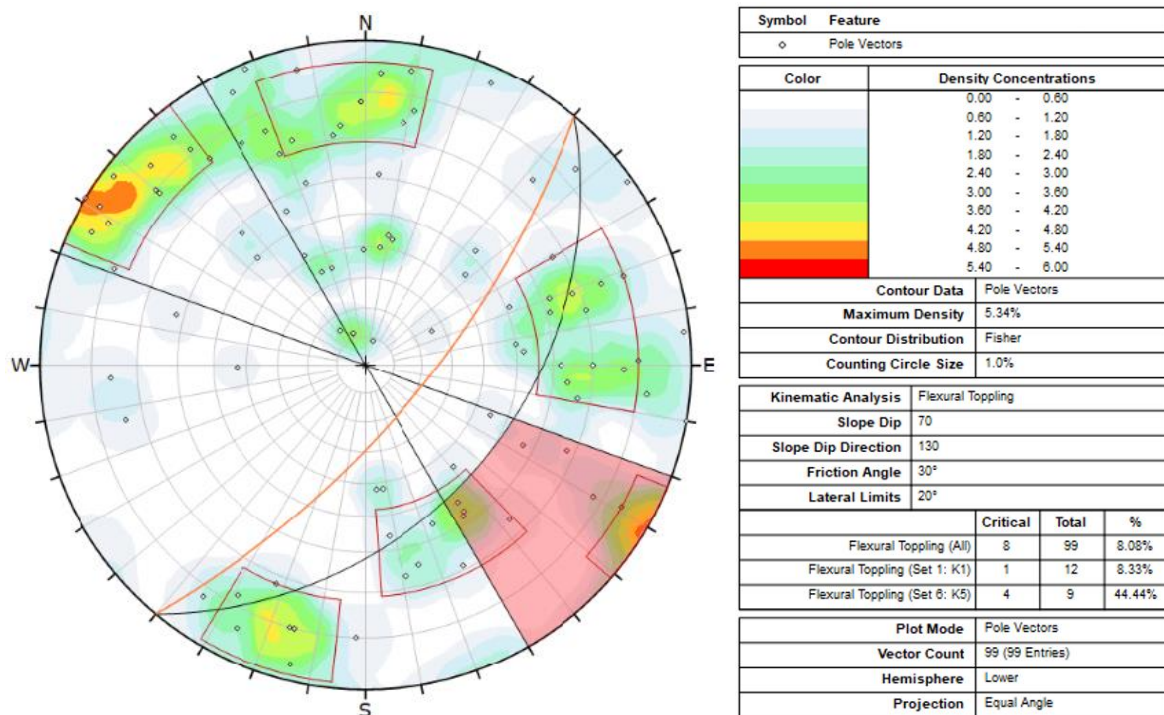


Figura 7-8. *Flexural toppling* stazione geomeccanica SG1

Dei 99 piani di discontinuità rilevati un totale di 8 risulta critico e ammette statisticamente una cinematica di ribaltamento flessurale. Di questi piani, 1 appartiene al set di discontinuità K1, 4 appartengono alla famiglia K3; i restanti 3 hanno carattere randomico. Ciò equivale a dire che l'8% del totale delle discontinuità può dare luogo a cinematica di ribaltamento flessurale.

La Figura 7-9. riporta l'analisi cinematica del ribaltamento diretto (*direct toppling*).

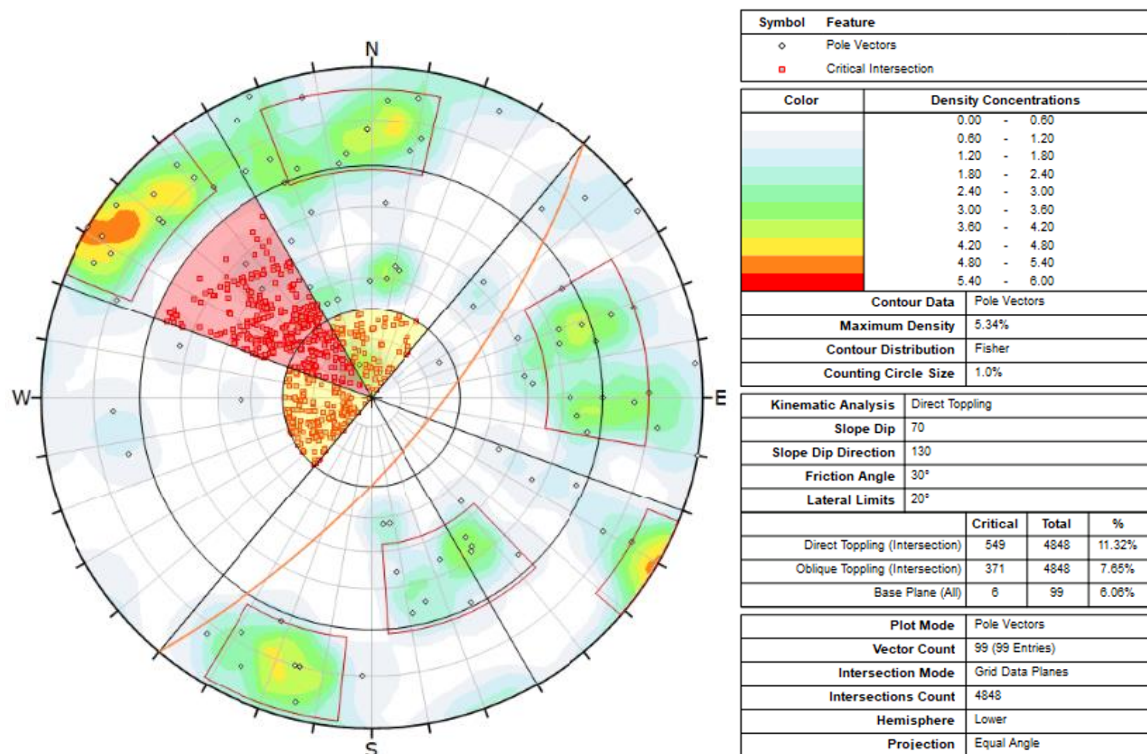


Figura 7-10. Direct toppling SG1

Le intersezioni critiche per il cinematicismo di ribaltamento diretto risultano circa l'11% del totale, mentre per i ribaltamenti obliqui sono pari a circa il 7% del totale. 6 delle 99 superfici di discontinuità rilevate possono funzionare come piano di base per lo svincolo, tutte appartenenti ad un set di discontinuità di carattere randomico.

7.2.2.STAZIONE GEOMECCANICA SG2

- Orientazione della parete: DIR105/IMM75

La Figura 7-6 mostra i risultati dell'analisi cinematica per lo scivolamento planare (*planar sliding*).

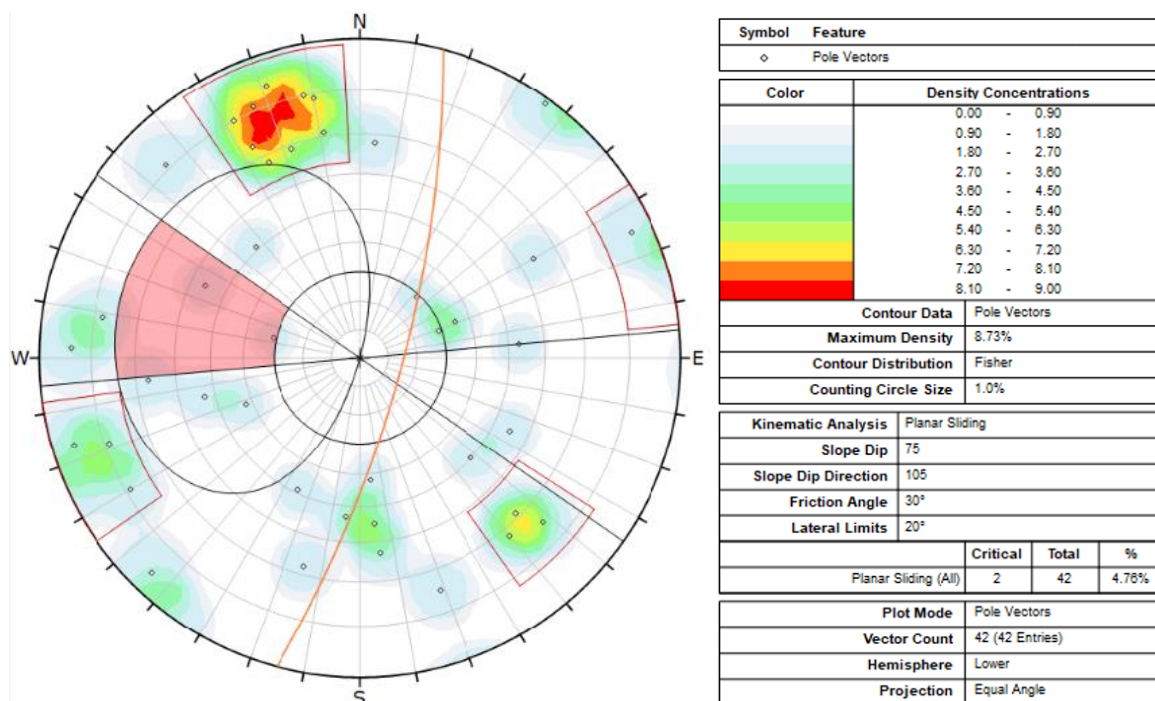


Figura 7-11. *Planar sliding* stazione geomeccanica SG2

Un totale di 2 poli, appartenenti ad un set di discontinuità con carattere randomico (ovvero non incluso all'interno delle famiglie identificate), ricadono all'interno della zona critica possono dare luogo ad una cinematica di scivolamento planare. Ciò equivale a circa il 5% circa del totale delle discontinuità rilevate (42).

La Figura 7-7 riporta i risultati dell'analisi cinematica per lo scivolamento di cunei (*wedge sliding*), che possono scivolare lungo la linea d'intersezione tra due piani.

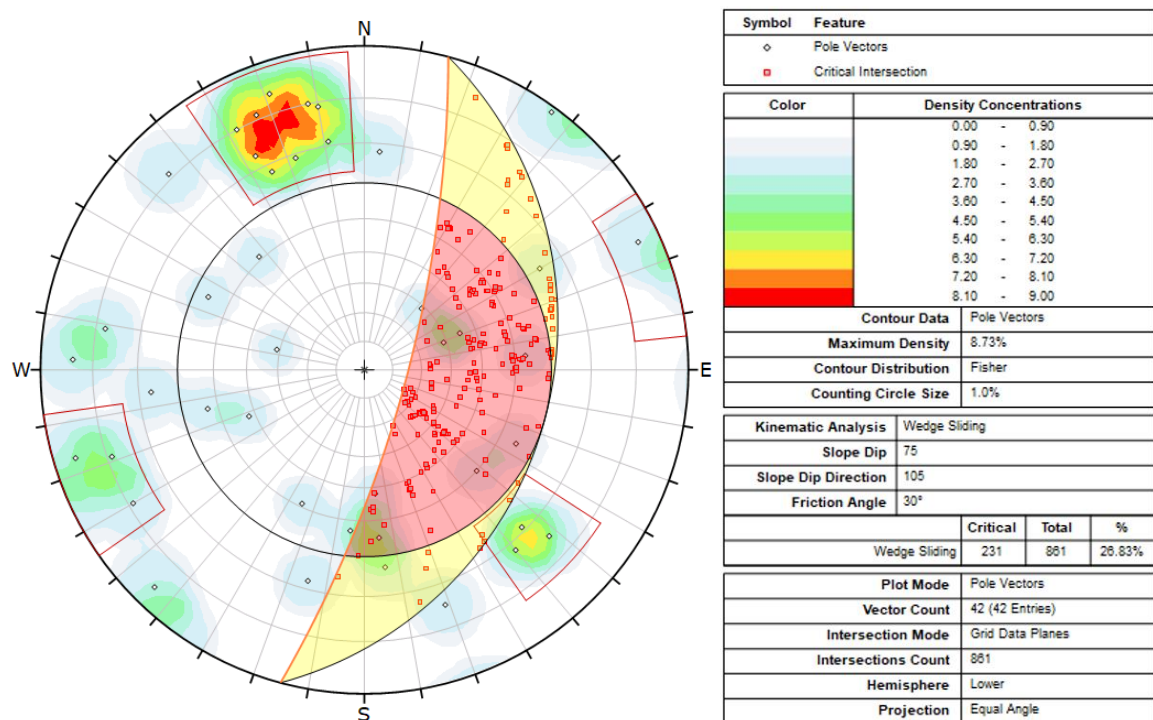


Figura 7-12. *Wedge sliding* stazione geomeccanica SG2

Delle 861 intersezioni possibili tra le superfici di discontinuità rilevate, 231 possono dare luogo a scivolamento di cuneo, ovvero circa il 27% del totale considerato. Sono le intersezioni con inclinazione compresa tra 25° e 50° ad essere maggiormente problematiche. Le discontinuità che presentino tali inclinazioni sono pertanto considerabili come le più sfavorevoli in sede di progettazione (si veda il Capitolo 9).

La Figura 7-8 riporta i risultati dell'analisi cinematica al ribaltamento flessurale (*flexural toppling*).

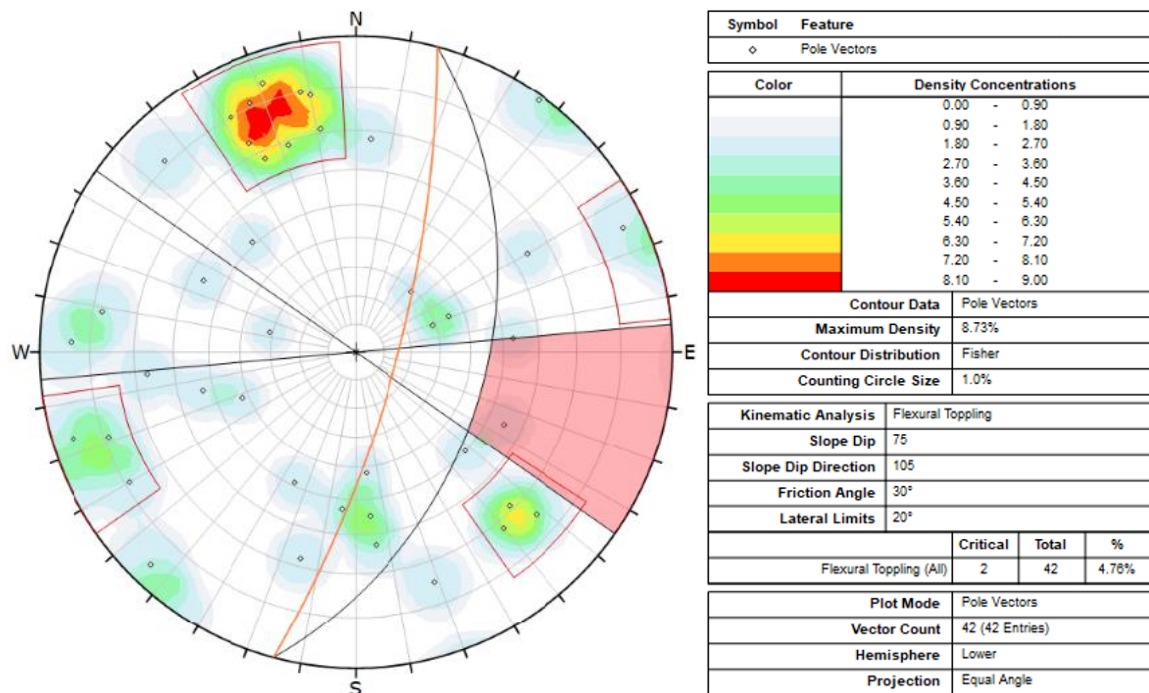


Figura 7-13. *Flexural toppling* stazione geomeccanica SG2

Dei 42 piani di discontinuità rilevati un totale di 2 risulta critico e ammette statisticamente una cinematica di ribaltamento flessurale. I piani individuati appartengono a set di discontinuità con carattere randomico. Ciò equivale a dire che il 5% del totale delle discontinuità può dare luogo a cinematica di ribaltamento flessurale.

La Figura 7-10 riporta l'analisi cinematica del ribaltamento diretto (*direct toppling*).

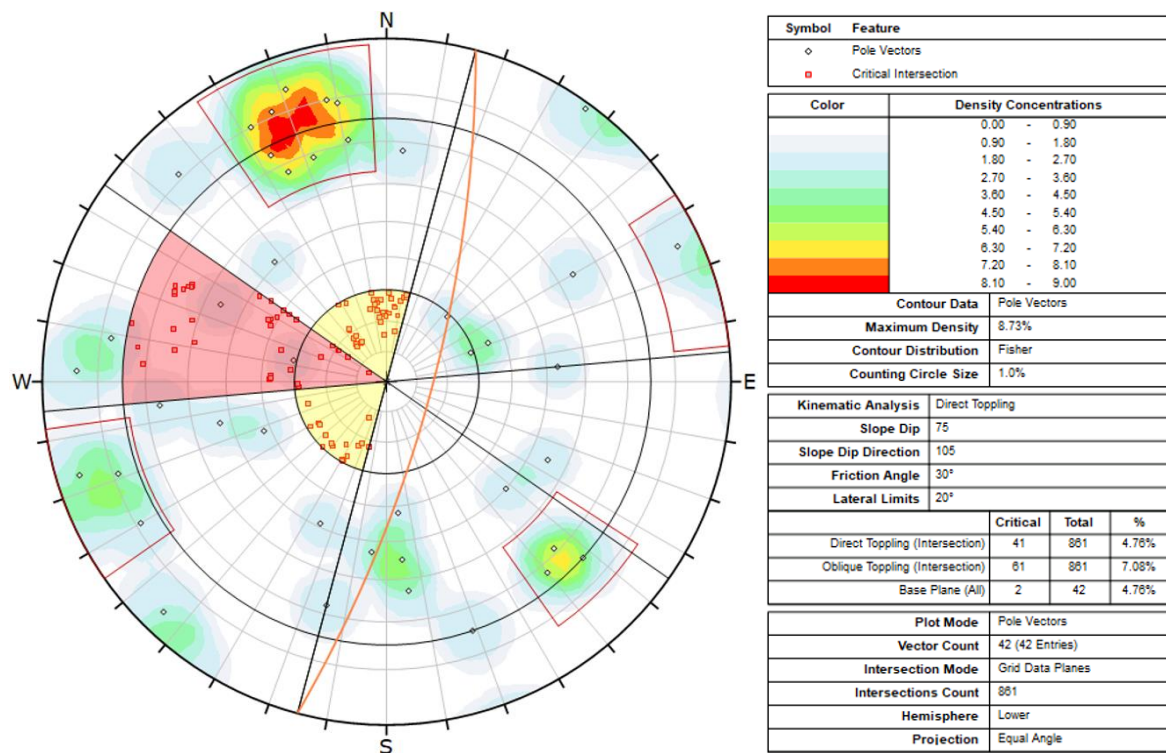


Figura 7-14. *Direct toppling* SG2

Le intersezioni critiche per il cinematiso di ribaltamento diretto risultano circa l'5% del totale, mentre per i ribaltamenti obliqui sono pari a circa il 7% del totale. 2 delle 42 superfici di discontinuità rilevate possono funzionare come piano di base per lo svincolo, tutte appartenenti ad un set di discontinuità di carattere randomico.

8. CLASSIFICAZIONE DELL'AMMASSO ROCCIOSO

I dati raccolti durante le attività di rilevamento hanno permesso di assegnare parametri numerici all'ammasso roccioso e di caratterizzarlo quantitativamente. Si rimanda al Capitolo 4 ed alle relative pubblicazioni scientifiche bibliografiche per una descrizione esaustiva e completa dei metodi di classificazione utilizzati.

Le stime effettuate per confronto tra i profili di rugosità rilevati e quelli tipici hanno permesso di valutare il valore di JRC dei giunti arenacei. La classe più rappresentativa è quella compresa tra valori di 4 e 6.

Il valore medio di resistenza a compressione uniassiale misurato con martello di Schmidt su arenarie fresche risulta pari a 100-110 MPa.

I parametri per la classificazione sono forniti in termini di intervalli di valori di RMR, Q e GSI. Si precisa che i valori RQD, acquisiti ed utilizzati per le classificazioni geomeccaniche, sono stati stimati in funzione della spaziatura della fratturazione direttamente in affioramento, compresa generalmente tra 100 e 200 mm.

Come riportato in Tabella 8-1, il valore RMR_{base} risulta pari a 56 (ammasso roccioso discreto di classe III, Tabella 4-5), mentre il valore di Q risulta pari a 1,5 (ammasso roccioso mediocre di classe D, Figura 4-13).

Le correlazioni di letteratura tra RMR e Q (*Beniawsky, 1976; Rutledge, 1978*) mostrano una buona corrispondenza tra i valori ottenuti.

I valori di GSI stimati durante le attività di rilievo geomeccanico risultano compresi tra 45 e 55 (Figura 8-1).



STAZIONE GEOMECCANICA:	SG1/SG2
-------------------------------	----------------

Località: Mandrioli
Data: 14/02/2024

Orientazione parete:

130-105 (azimuth)
70- 75 (dip)

Litotipo:

Macigno (arenaria)

CLASSIFICAZIONE DEL'AMMASSO ROCCIOSO

CLASSIFICAZIONE GEOMECCANICA Q (Barton, 1974)

		Indice	Note
Rock quality designation	RQD	45%	RQD stimato 45 (B)
Numero famiglie di giunti	Jn	15	
Scabrezza del giunto	Jr	2,0	
Alterazione delle superfici del giunto	Ja	4	
Fattore di riduzione per acqua nei giunti	Jw	1	
Fattore di riduzione delle tensioni	Js	1	

$Q=(RQD/Jn)(Jr/Ja)(Jw/Js)$

Q = 1,5

Correlazioni Q/RMR (Beniawsky, 1976)

$RMR_{medio} = 9 \ln(Q) + 44 =$

47,6

$RMR_{min} = 9 \ln(Q) + 26 =$

29,6

$RMR_{max} = 9 \ln(Q) + 62 =$

65,6

Correlazioni Q / RMR (Rutledge, 1978)

$RMR = 13,5 \log(q) + 43 =$

45,4

CLASSIFICAZIONE GEOMECCANICA RMR (Beniawsky, 1989)

		Indice	Note
Resistenza roccia intatta	R1	9	Da sclerometro
Rock quality designation (RQD)	R2	9	RQD stimato 45
Spaziatura giunti	R3	8	
Condizione giunti	R4	20	
Condizioni idrauliche	R5	10	
Orientazione delle discontinuità	R6		

$RMR(base) = R1+R2+R3+R4+R5$

RMR(base)

56

$RMR(corretto) = RMR(base) + R6$

RMR(corretto)

56

Parametri di resistenza al taglio (valori di picco)

Caratteristiche di deformabilità (valori di picco)

$c = 5RMR(base) =$

280

Kpa

$\phi = 0,5 \cdot RMR(base) + 5 =$

33

°

$E = 10^{(RMRb - 10) / 40} =$

Gpa

14,1

Tabella 8-1. Classificazione dell'ammasso roccioso RMR e Q







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

Figura 8-1. Classificazione dell'ammasso roccioso flyschoidale GSI (Hoek & Marinos, 2000)

9. PARAMETRI GEOMECCANICI DI PROGETTO

La scelta dei parametri geomeccanici si basa sui dati raccolti durante l'attività di rilevamento in sito sugli affioramenti della Formazione del Macigno del febbraio 2024. I valori sono stati misurati direttamente o scelti utilizzando correlazioni il più possibile cautelative al fine di tenere in debita considerazione le caratteristiche sito-specifiche.

Il valore di UCS degli strati arenacei, misurato con lo sclerometro da roccia, è risultato pari a 111 MPa, ma data la tendenza intrinseca dello strumento a sovrastimare la resistenza dei litotipi, si è optato per considerare come rappresentativo un intervallo variabile tra 80 e 100 MPa.

Lo spessore della porzione instabile, considerato a livello globale sulla base delle osservazioni della parete, è rappresentato dalla massima sotto escavazione a cui gli strati arenacei vanno incontro prima di entrare in una condizione di instabilità ed è variabile da 0,5 a 1,5 m, con occasionali eccezioni fino a 2,5 m circa.

I giunti più sfavorevoli alla stabilità dell'ammasso sono quelli con assetto da franapoggio a traverspoggio a basso angolo, le cui intersezioni definiscono cunei rocciosi potenzialmente interferenti con le opere previste. La cinematica prevalente è lo scivolamento di cuneo.

L'adesione laterale all'interfaccia boiaccia-terreno τ_l (resistenza a sfilamento) è stata valutata facendo riferimento al grafico di Bustamante-Doix (Figura 9-1), considerando iniezioni IGU (Iniezione Globale Unica) e una roccia mediamente fratturata:

$$\tau_l = 300 \text{ kPa} = 0.30 \text{ MPa}$$

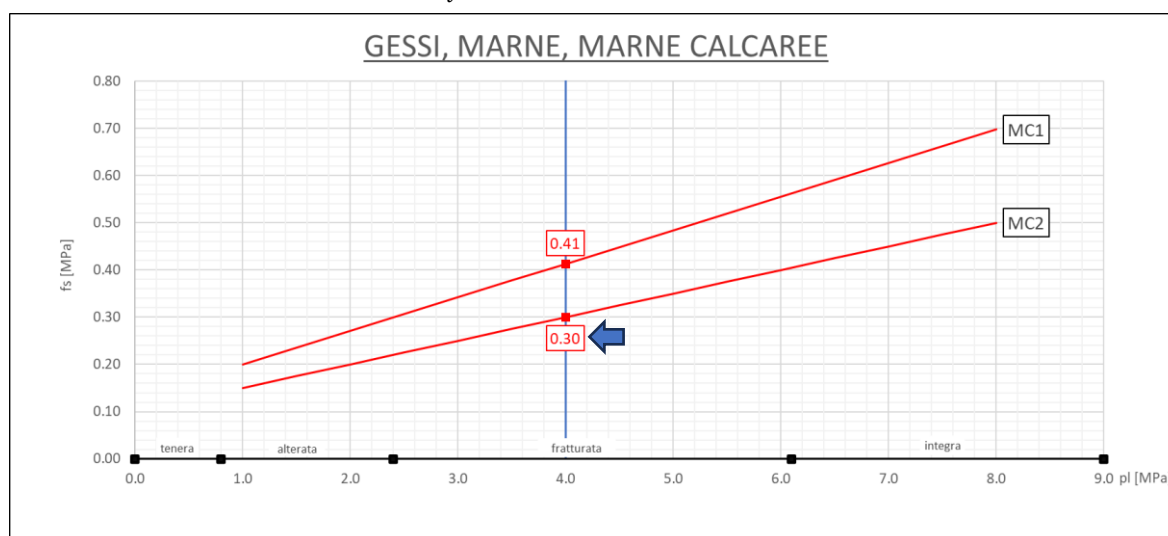


Figura 9-1. Grafico di Bustamante-Doix per gessi e marne, con identificazione della tensione di aderenza adottata ai fini delle verifiche

A favore di sicurezza si è assunto il coefficiente di sbulbatura α unitario:

$$\alpha = 1.0$$



Parametro	Valore
Peso di volume [kN/m ³]	24
UCS roccia intatta [MPa]	80- 100
JRC	8-10
JCS [MPa]	80-100
Spessore porzione instabile [m]	0,5 -1,5
Inclinazione del giunto più sfavorevole [°]	30°-40°
τ_l [KPa]	300