

DEGRADO PROGRESSIVO DELLA RUGOSITÀ DI DISCONTINUITÀ IN ROCCIA DOVUTA AD AZIONI DI TAGLIO

Maria Teresa Carriero

Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica (DISEG)
maria.carriero@polito.it

Anna Maria Ferrero

Università di Torino, Dipartimento di Scienze della Terra (DST) Torino
anna.ferrero@unito.it

Maria Rita Migliazza

Politecnico di Torino, Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica (DISEG)
maria.migliazza@polito.it

Gessica Umili

Università di Torino, Dipartimento di Scienze della Terra (DST) Torino
gessica.umili@unito.it

Sommario

Nell'analisi del comportamento meccanico delle discontinuità rocciose particolare attenzione deve essere rivolta alla rugosità, che rappresenta una caratteristica geometrica peculiare delle superfici e che ne influenza fortemente la resistenza al taglio. Il presente lavoro descrive una procedura sperimentale effettuata a scala di laboratorio su discontinuità naturali al fine di misurare la rugosità delle superfici e il progressivo degrado delle asperità durante cicli di taglio diretto. A questo scopo le prove meccaniche sono state accoppiate a rilievi fotogrammetrici delle superfici integre (naturali), dopo il primo ciclo e alla fine dell'ultimo ciclo di taglio. Ciò ha permesso la ricostruzione dei modelli digitali delle superfici intatte e degradate. I modelli di superficie (DSM) ottenuti sono stati elaborati lungo profili lineari orientati, consentendo di considerare descrittori geometrici in grado di quantificare la misura di rugosità ed applicare equazioni empiriche proposte nella letteratura tecnica di settore per stimare il Joint Roughness Coefficient (JRC), parametro meccanico legato alla rugosità del criterio di resistenza di Barton. Il confronto tra i risultati sperimentali e la misura diretta della rugosità di superficie ha mostrato come le discontinuità, anche su piccola scala, mostrino caratteristiche di disomogeneità ed anisotropia naturale, evidenziando il carattere fortemente aleatorio di tale misura e come il degrado delle asperità sia un processo progressivo la cui entità è influenzata anche dallo stato di confinamento applicato.

1. Introduzione

Il comportamento meccanico e deformativo di un ammasso roccioso è governato dal suo grado di frattura ed è caratterizzato non solo dalle proprietà meccaniche della roccia intatta ma anche dall'orientamento, dalla geometria e dalla rugosità dei giunti rocciosi. In letteratura sono stati proposti molti modelli costitutivi al fine di rappresentare il comportamento a taglio delle discontinuità che dipende da diversi parametri, tra cui lo stato di stress normale applicato, le dimensioni e la scala del giunto, la rugosità superficiale, la composizione minerale, le condizioni superficiali e le proprietà meccaniche (Patton, 1966; Barton & Choubey, 1977; Grasselli & Egger, 2003).

Il degrado della superficie può influenzare le proprietà meccaniche e idrauliche delle discontinuità e per questo la rugosità ha una notevole importanza nella valutazione del comportamento al taglio delle discontinuità (Ferrero, *et al.*, 2010). Il Joint Roughness Coefficient (JRC) è probabilmente il parametro più comunemente utilizzato nella pratica ingegneristica per valutare il contributo della rugosità sulla resistenza al taglio della discontinuità, e per questo motivo, sono stati proposti diversi metodi per correlare altri parametri di rugosità geometrica (statistici, frattali e direzionali) al JRC (Li & Zhang, 2015; Ferrero, *et al.*, 2019). Esso viene, generalmente, stimato attraverso il confronto tra profili di riferimento (Barton & Choubey, 1977) e quelli misurati appoggiando direttamente profilometri lineari ad aghi sulla superficie di discontinuità. Non si tiene in conto che la morfologia della superficie di discontinuità risulta, la gran parte delle volte, disomogenea ed anisotropa: la misura della rugosità mostra come questa non assuma valori univoci lungo l'intera superficie e che essa cambi in relazione alla direzione rispetto a cui viene misurata.

Lo studio di seguito illustrato riguarda una procedura sperimentale eseguita alla scala di laboratorio su discontinuità naturali in roccia avente lo scopo di misurare, da una parte, la resistenza al taglio dall'altra la rugosità naturale di tali superfici e il loro degrado progressivo durante il processo di taglio.

A tale scopo sono stati eseguiti test di taglio diretto su campioni con discontinuità in tre differenti litotipi. I risultati di questi test hanno permesso di definire le condizioni di resistenza di picco e residuo misurate dopo cinque cicli di taglio. Al fine di analizzare l'evoluzione del degrado della superficie durante il processo di taglio, la morfologia di entrambe le superfici di discontinuità è stata acquisita attraverso un rilievo fotogrammetrico in diverse condizioni della discontinuità: naturale, post-picco e residuo. Il rilievo fotogrammetrico ha permesso la ricostruzione del modello digitale di superficie (DSM) elaborato lungo diversi profili lineari, al fine di ottenere descrittori geometrici di rugosità e la loro variazione statistica lungo l'intera superficie. I risultati sono stati utilizzati per una valutazione del JRC utilizzando correlazioni empiriche (Tse & Cruden, 1979). Il confronto tra i risultati sperimentali e la misura diretta della superficie di rugosità ha permesso di ottenere informazioni utili a quantificare il degrado delle discontinuità in relazione allo stato di confinamento indotto durante le prove.

2. Prove di taglio

Le prove di taglio sono state condotte presso il laboratorio del Dipartimento di Scienze della Terra "Ardito Desio" dell'Università degli Studi di Milano. I test sono stati eseguiti su nove campioni di tre differenti litotipi: Riodacite, Marmo e Paragneiss. Le prove di taglio sono state effettuate attraverso una scatola di taglio su campioni di dimensioni medie di 80 mm x 100 mm, imponendo una sollecitazione di confinamento costante (1.5, 2.5 e 4 MPa), controllando la velocità di carico di taglio ed imponendo 5 cicli di taglio durante le quali sono stati misurati: la pressione di confinamento σ_n , la tensione tangenziale τ , gli spostamenti normali e di taglio (Fig. 1.a).

3. Rilievo fotogrammetrico

Le 18 superfici di discontinuità (due per ciascun campione) sono state oggetto di un rilievo fotogrammetrico al fine di riprodurre la loro morfologia attraverso un DSM e analizzarne il progressivo degrado durante le prove di taglio. A tale scopo il rilievo è stato effettuato nelle condizioni naturali (prima delle prove di taglio) e in quelle danneggiate (dopo il primo e il quinto ciclo).

Per massimizzare la precisione ottenibile ed avere un sistema di riferimento fisso durante i processi di acquisizione, è stata utilizzata una maschera in ottone, ancorabile alle semiscatole che contengono le superfici di discontinuità, sulla quale è stata incisa a laser una griglia con spaziatura di 30 mm nelle due direzioni (Fig 1b). Dopo aver posizionato la maschera e illuminato le superfici di discontinuità, sono stati realizzati 12 scatti opportunamente ruotati utilizzando una NIKON D800 (lunghezza focale 50 mm e sensore CMOS Full-Frame da 36,3 MP).

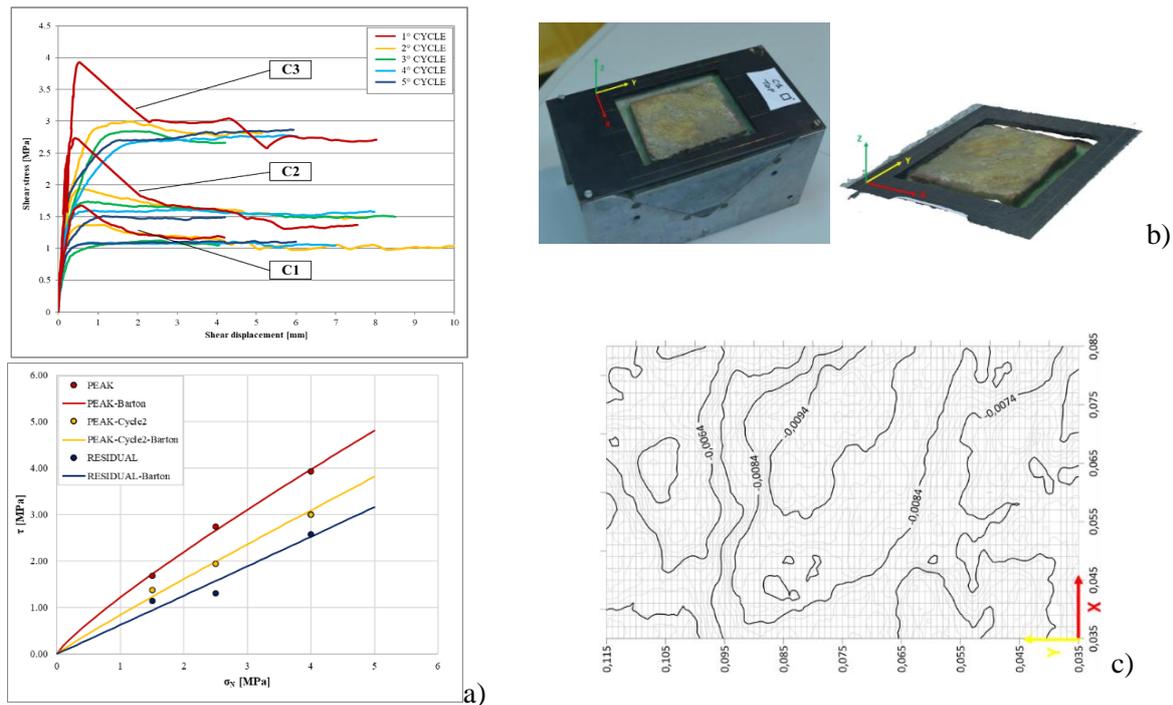


Fig1. a) Risultati delle prove di taglio ottenute sui campioni di Paragneiss; b) Rilievi fotogrammetrici (foto e DSM ricostruito con il software Metashape); c) esempio di griglia regolare con curve di livello generate con il software Surfer

Le immagini digitali sono state elaborate con il software Metashape (Agisoft,) ottenendo 54 nuvole di punti e i relativi DSM (Fig 1.b): 3 litotipi, 3 campioni per ogni litotipo, 3 gradi di danno e due superfici per ogni campione (superficie superiore e inferiore). Le nuvole di punti sparse ottenute dalla foto-elaborazione sono state trasformate in una griglia di punti regolari nel piano xy (orizzontale) attraverso il software Surfer (Goldensoftware), estrapolando i dati di altezza (coordinata z) secondo una griglia regolare di punti (Fig 1.c). È stata analizzata solo la parte centrale delle superfici (griglia di 50x80 mm) ricostruendo 51 profili per ogni superficie con una spaziatura dei punti di 1 mm lungo la direzione x e di 0,5 mm lungo la direzione y (direzione di taglio nelle prove sperimentali).

4. Risultati

4.1 Risultati delle prove di taglio

Durante le prove di taglio, sono state effettuate misurazioni delle sollecitazioni e degli spostamenti normali e di taglio in tutte le fasi della prova. Ciò ha permesso di determinare la curva sforzi- spostamenti che ha evidenziato, in tutti in litotipi un comportamento iniziale picco-residuo che si attenua notevolmente nei cicli successivi (Fig. 1.a).

La Tab 1 riporta i risultati ottenuti per tutti i campioni in termini di sforzo di confinamento normale (σ_n), sforzo di taglio di picco (τ_p), sforzo di taglio residuo (τ_r), variazione dello sforzo di taglio tra il picco e il valore residuo ($\Delta\tau$), spostamento di taglio al picco di taglio (s_p), rigidità di taglio (K_s), spostamento normale raggiunto alla fine della fase di confinamento (s_n) e rigidità normale (K_n).

I risultati delle prove di taglio forniscono dati sperimentali per ricostruire il comportamento meccanico delle discontinuità. I dati residui sono stati analizzati utilizzando il criterio di resistenza di Mohr-Coulomb mentre i dati di picco con il criterio di Barton (Fig 1.a), (Barton & Choubey, 1977):

$$\tau = c + \sigma_n \tan \varphi \quad (1)$$

$$\tau_p = \sigma_n \tan \left[\varphi_r + JRC \cdot \log_{10} \left(\frac{ICS}{\sigma_n} \right) \right] \quad (2)$$

Tab 1. Risultati della prova di taglio per nove campioni.

Litotipi	Campione	σ_n [MPa]	τ_p [MPa]	τ_r [MPa]	$\Delta\tau$ [MPa]	s_p [mm]	Ks [MPa/mm]	s_n [mm]	Kn [MPa/mm]
Paragneiss	C1	1.50	1.67	1.14	0.54	0.56	4.39	0.22	9.42
	C2	2.50	2.74	1.31	1.43	0.42	12.95	0.29	11.87
	C3	4.00	3.93	2.58	1.35	0.54	9.21	1.50	6.89
Riodacite	G1	1.55	2.29	1.94	0.36	1.71	2.01	\	\
	G2	2.89	3.94	3.22	0.72	1.23	3.72	0.60	13.60
	G3	5.39	6.84	5.06	1.78	1.62	4.18	0.80	16.80
Marmo	M1	1.50	1.15	0.46	0.69	1.53	1.17	0.28	7.65
	M2	2.50	2.31	1.50	0.81	0.94	2.75	0.84	7.23
	M3	4.00	3.59	2.03	1.56	1.20	3.22	1.00	12.23

Nota: dati "\" mancanti a causa di nessuna acquisizione dati

È stato ottenuto un valore JRC lab per ciascun litotipo mediante back analysis considerando la curva che meglio approssima i dati sperimentali utilizzando l'equazione (2) per i tre cicli di riferimento. A tal fine, l'angolo di resistenza residua (ϕ_r) è stato definito dall'analisi dei risultati residui e il valore Joint Compressive Strength (JCS) determinato attraverso test sclerometrici (Tab 2). Al fine di studiare il processo di degrado l'equazione di Barton è stata applicata ai risultati ottenuti nei tre cicli di riferimento per ciascun campione (JRC singolo).

Tab 2. Valori del JRC ottenuti dall'interpolazione dei dati sperimentali per i nove campioni.

Litotipi	ϕ_r [°]	JCS [MPa]	Campione	Ciclo 1		Ciclo 2		Ciclo 5	
				JRC singolo	JRC lab	JRC singolo	JRC lab	JRC singolo	JRC lab
Paragneiss	33	69.7	C1	9.12		5.65		2.56	
			C2	10.12	9.51	3.36	4.04	0.00	0.85
			C3	9.28		3.11		0.00	
Riodacite	44	52.5	G1	7.60		5.91		3.10	
			G2	7.52	7.55	3.65	3.68	2.59	1.90
			G3	7.53		1.48		0.00	
Marmo	32.5	155	M1	2.49		1.38		0.00	
			M2	5.73	4.72	3.25	1.73	0.00	0.00
			M3	5.95		0.56		0.00	

4.2 Risultati del rilievo fotogrammetrico

Ogni profilo ottenuto attraverso l'analisi con Surfer è stato analizzato al fine di ottenere una misura di rugosità attraverso il parametro Z_2 (Tse Cruden, 1979) che rappresenta la deviazione quadratica media dell'altezza di asperità, secondo la formula:

$$Z_2 = \left[\frac{1}{N(dy)^2} \sum_{i=1}^{i=N} (z_{i+1} - z_i)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

dove N è il numero di misurazioni lungo y, dy è l'ampiezza dell'intervallo di scansione (0.5 mm) e z è l'elevazione del profilo.

Per ogni superficie sono stati analizzati 51 profili che consentono un'analisi statistica della variazione di rugosità lungo le superfici nei tre cicli di taglio (Fig. 2).

Per valutare e confrontare la rugosità stimata attraverso l'analisi fotogrammetrica e quella valutata con l'analisi meccanica, è stata scelta la correlazione (Tse Cruden, 1979) tra il parametro statistico Z_2 e il coefficiente del JRC:

$$JRC = 32.2 + 32.47 \cdot \log(Z_2) \quad (4)$$

Utilizzando questa correlazione, è possibile ottenere il valore del JRC per ciascun profilo e quindi effettuare analisi di frequenza. La Fig 2 mostra le distribuzioni di frequenza per il campione C2 nelle condizioni di naturale, post-picco e residuo: la linea continua rossa rappresenta la distribuzione di frequenza del JRC della superficie inferiore del campione, mentre la linea continua blu rappresenta quella superiore, le linee tratteggiate rappresentano il valore medio delle due distribuzioni e la linea

continua grigia rappresenta il valore di laboratorio del JRC.

Si può osservare che la distribuzione di frequenza mostra una disomogeneità della rugosità superficiale evidenziando in questo caso un comportamento bimodale. Nel primo ciclo il JRC varia tra 0 e 10 nel secondo tra 0 e 7 e nell'ultimo ciclo tra 0 e 6. Dopo il primo e l'ultimo ciclo di taglio si osserva una significativa diminuzione della rugosità: diminuiscono le frequenze dei valori più alti del JRC e quelle dei valori inferiori. Dai grafici risulta chiaro che i valori medi JCR non sono rappresentativi della rugosità del campione. Infatti, il campione C2 ha una distribuzione bimodale e il valore medio del JRC rientra in una classe con una frequenza inferiore rispetto a quella dei due picchi.

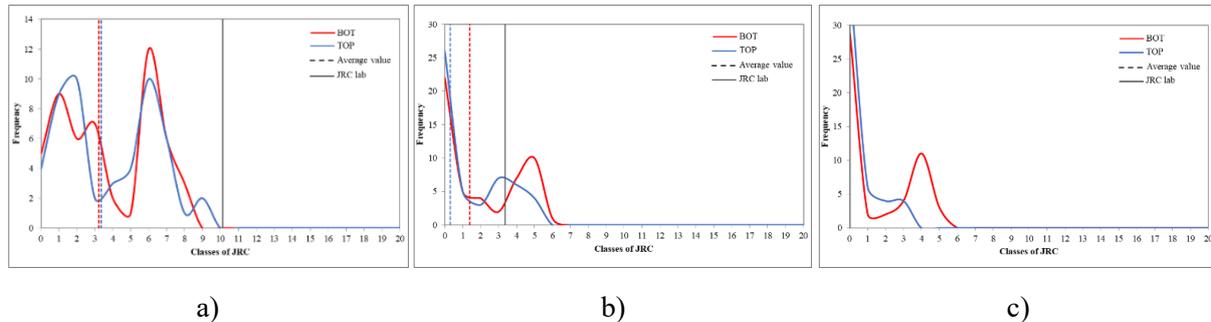


Fig 2. Distribuzioni di frequenza di JRC, campione C, condizioni di pre-taglio (a), post-taglio (b) e residue (c).

La Tab 3 riassume i risultati ottenuti per i nove campioni considerando per ciascun campione il valore medio delle distribuzioni di frequenza delle due metà superfici. Come si può notare, i valori del JRC non corrispondono a quelli ottenuti con l'analisi meccanica (JRClab)

Tab 3. Confronto tra i valori del JRC ottenuti dall'analisi fotogrammetrica e quelli di laboratorio.

Litotipi	Campione	Ciclo 1			Ciclo 2			Ciclo 5		
		JRC singolo	JRC medio	JRC lab	JRC singolo	JRC medio	JRC lab	JRC singolo	JRC medio	JRC lab
Paragneiss	C1	6.72			5.84			4.99		
	C2	3.29	4.70	9.51	0.84	2.99	4.04	0.00	1.88	0.85
	C3	4.10			2.28			0.66		
Riodacite	G1	13.61			7.41			5.03		
	G2	16.30	13.27	7.55	5.04	6.29	3.68	2.02	3.50	1.90
	G3	9.91			6.43			3.44		
Marmo	M1	0.42			0.11			0.00		
	M2	0.94	1.47	4.72	0.41	1.03	1.73	0.00	0.65	0.00
	M3	3.94			2.57			1.94		

4.3 Degradamento delle discontinuità in relazione allo stato di confinamento

Dai risultati delle prove calo di laboratorio riportate nella Tab 1 si osserva che, nell'intervallo di confinamento analizzato, il di resistenza tra picco e residuo nel primo ciclo ($\Delta\tau$) è strettamente influenzato dalla sollecitazione normale applicata. Infatti, a parità di rugosità iniziale, la caduta di resistenza è maggiore quanto maggiore è il valore di confinamento normale, in quanto il progressivo degrado delle asperità è dovuto alle forze di attrito durante il taglio. Questo fenomeno si traduce in una sostanziale riduzione del valore del JRC durante la fase di taglio. Per analizzare l'effetto delle sollecitazioni normali sul degrado della superficie delle discontinuità rocciose, è stato definito un fattore di degrado FD come rapporto tra la variazione del JRC e il JRC iniziale:

$$FD = \frac{\Delta JRC}{JRC_0} = \frac{JRC_0 - JRC_1}{JRC_0} \quad (5)$$

dove la variazione del JRC (ΔJRC) tra discontinuità intatta (JRC_0) e discontinuità degradata dopo il primo ciclo di taglio (JRC_1) ed è stata calcolata per ciascun campione per diversi stress di confinamento. La Fig 3 riporta i risultati in termini di FD e σ_n ottenuti sia dalle prove di laboratorio che dall'analisi fotogrammetrica e confrontando i risultati ottenuti si osserva che un aumento di σ_n corrisponde ad una

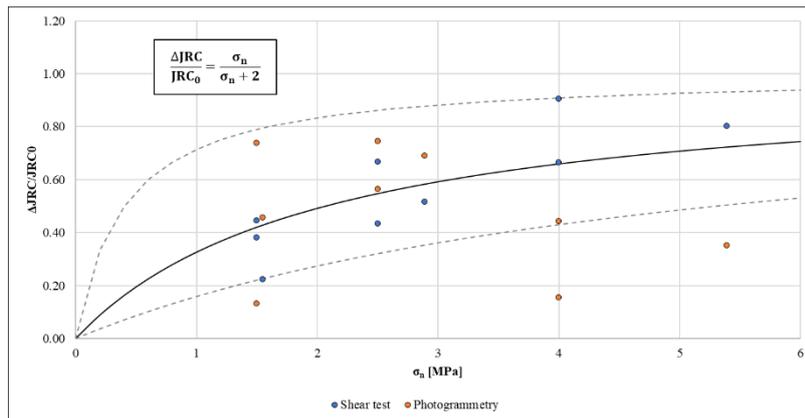


Fig 3. Analisi dei dati in termini di fattore di degradazione rispetto allo stato di confinamento applicato.

crescita del fattore di degrado. Attraverso un'analisi dei minimi quadrati è stato possibile definire la funzione che meglio interpola i risultati ottenuti con cui viene definito il fattore di degradazione in funzione del livello di confinamento del campione. La funzione ottenuta è riportata nella seguente equazione:

$$FD = \frac{\sigma_n}{\sigma_n + 2} \quad (6)$$

5. Conclusioni

In questo lavoro è stata descritta una procedura sperimentale eseguita su scala di laboratorio sulle discontinuità della roccia naturale per misurare la resistenza al taglio, la rugosità delle superfici e il loro degrado progressivo durante il processo di taglio. In questo senso, le tecniche fotogrammetriche si sono rivelate uno strumento utile che permette di analizzare le superfici di discontinuità, al fine di ottenere descrittori geometrici in grado di descrivere numericamente il grado di rugosità della superficie. Tuttavia, il raffronto delle stime del JRC risultante delle prove sperimentali e delle misurazioni effettuate sulle discontinuità ha dimostrato che le discontinuità, anche su piccola scala, hanno una rugosità disomogenea, che dovrebbe essere analizzata come rugosità superficiale. Infatti, dall'analisi fotogrammetrica sono state ottenute distribuzioni di frequenza bimodale e per questo motivo non è stato possibile definire il valore rappresentativo della rugosità dei campioni. L'analisi fotogrammetrica delle superfici nei diversi cicli di taglio ha permesso di studiare il degrado della superficie articolare e i fattori che la influenzano. Infatti, i risultati ottenuti hanno permesso di analizzare il fattore di degradazione della superficie, evidenziando che la degradazione è un processo progressivo fortemente influenzato dal grado di confinamento del campione.

Bibliografia

- Barton N and Choubey V 1977 The shear strength of rock joints in theory and practice *Rock Mech.* **10 (1-2)** 1–55
- Cruden DM and Hu XQ 1988 Basic friction angles of carbonate rocks from Kananaskis country, Canada *Bull. Int. Assoc. Eng. Geol.* **38** 55–59
- Ferrero AM, Migliazza M and Tebaldi G 2010 Development of a new experimental apparatus for the study of the mechanical behaviour of a rock discontinuity under monotonic and cyclic loads *Rock. Mech. Rock. Eng.* **43 (6)** 685–695
- Ferrero AM, Migliazza MR and Umili G 2019 Comparison of methods for discontinuity roughness evaluation *RIVISTA ITALIANA DI GEOTECNICA* **3** 5-15
- Grasselli G., Egger P. (2003) Constitutive law for the shear strength of rock joints based on three-dimensional surface parameters. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* **40 (1)**, 25-40
- Lee HS, Park YJ, Cho TF and You KH 2001 Influence of asperity degradation on the mechanical behavior of rough rock joints under cyclic shear loading *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci.* **38 (7)** 967–980
- Li Y and Huang R 2015 Relationship between joint roughness coefficient and fractal dimension of rock fracture surfaces *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* **75 (15)** 15–22
- Patton FD 1966 Multiple modes of shear failure in rock *Proc. 1st ISRM Congress Int. Society for Rock Mech. Rock Eng. (Lisbon)* 25 September-1 October
- Tse R and Cruden DM 1979 Estimating joint roughness coefficients *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* **16 (5)** 303–307