

UN AGGIORNAMENTO SUL TEMA DELLA CLASSIFICAZIONE GEOMECCANICA E DELLA PREVISIONE DEL COMPORTAMENTO ALLO SCAVO

Giordano Russo e Piergiorgio Grasso - GEODATA SpA Torino

La nota si concentra sul tema della classificazione geomeccanica e la previsione del comportamento allo scavo, articolandosi conseguentemente in due parti distinte: nella prima si pone l'attenzione sull'utilizzo degli indici di qualità geostrutturale per la derivazione dei principali parametri dei gruppi geomeccanici delle masse rocciose, soffermandosi in particolare su un nuovo metodo per la definizione quantitativa del Geological Strength Index (GSI), agevolmente integrabile anche con un approccio di tipo probabilistico.

Nella seconda parte si propone uno schema per l'inquadramento generale del comportamento allo scavo sostanzialmente basato sulla combinazione di due sistemi classificativi: il primo essenzialmente incentrato sulle risultanze in termini deformativi delle analisi di tipo tensionale ed il secondo costituito dal sistema RMR, specificamente finalizzato alla rappresentazione delle caratteristiche geostrutturali dell'ammasso e delle relative capacità di autosostentamento. La matrice risultante dal duplice approccio classificativo consente infatti un'ottimale focalizzazione delle casistiche progettuali da affrontare, consentendo una razionale scelta tipologica degli interventi di stabilizzazione in funzione della fenomenologia deformativa potenziale più probabile. In linea sequenziale con quanto illustrato nella prima parte dell'articolo, vengono infine forniti alcuni esempi applicativi con implementazione probabilistica del metodo.

1. INTRODUZIONE

E' passato quasi un decennio da quando un'iniziativa congiunta delle principali associazioni culturali italiane, operanti nel settore della geotecnica e degli scavi, portava alla pubblicazione delle "Linee Guida per la Progettazione, l'Appalto e la Costruzione di Opere in Sotterraneo" (LGP, 1997). Come del resto testimoniato dallo stesso titolo, tale documento non intendeva proporsi come un manuale di progettazione, quanto piuttosto come una procedura raccomandata per lo sviluppo organico e completo del progetto. Nonostante forse una diffusione ancora relativamente limitata di tale approccio metodologico in campo nazionale, le LGP italiane hanno sicuramente spronato riflessioni analoghe in altri paesi ed uno dei Working Group dell'ITA è specificamente dedicato alla messa a punto di una procedura progettuale di riferimento internazionale.

Come si è già avuto modo di evidenziare, uno degli elementi di maggiore rilevanza nello sviluppo progettuale è quello di una chiara distinzione e sequenzialità tra le diverse fasi dello studio, ed in un precedente articolo¹ ci si è già concentrati sui concetti di gruppo geomeccanico, categoria di comportamento e classe tecnica di scavo. Nei capitoli successivi, si riprende brevemente tale tematica, aggiornando in particolare, alla luce delle più recenti esperienze, le riflessioni su alcuni aspetti specifici, quali:

- l'utilizzo degli indici di qualità geostrutturale per la derivazione dei principali parametri dei gruppi geomeccanici di progetto, secondo un modello di riferimento "continuo-equivalente";

¹ Russo, Kalamaras e Grasso, 1998.

- l'inquadramento classificativo generale del comportamento allo scavo.

2. NUOVE CONSIDERAZIONI SULL'UTILIZZO DEL GEOLOGICAL STRENGTH INDEX (GSI)

Nella pratica corrente, per la quantificazione dei parametri geomeccanici della massa rocciosa è piuttosto comune l'utilizzo di indici di qualità, mediante cui le proprietà della massa rocciosa sono definite a partire da quelle della roccia intatta, tenendo conto del reticolo fessurativo e delle relative caratteristiche geotecniche.

Un utilizzo corretto di tale approccio presuppone in particolare:

- una ragionevole possibilità di assimilazione dell'ammasso roccioso ad un modello geotecnico "continuo-equivalente" ed isotropo;
- il riferimento ad indici di qualità "puri", rappresentativi delle condizioni geostrutturali dell'ammasso in situ, quali ad esempio il "Geological Strength Index" (GSI di Hoek, Kaiser e Bawden, 1995 e segg.) e specificamente il "Joint Parameter" (JP) del "Rock Mass Index" (RMI di Palmstrom, 1995 e segg.).

Per quanto concerne il metodo di quantificazione del GSI, è opportuno osservare come inizialmente gli Autori indicavano una derivazione dagli indici RMR (Bieniawski, 1973 e segg.) e Q (Barton, 1974 e segg.), previa opportune correzioni per tener conto solo delle caratteristiche intrinseche delle masse rocciose. In seguito, tuttavia, Hoek² ha progressivamente abbandonato tale procedura a favore di una determinazione diretta, basata unicamente sull'utilizzo di un diagramma³ che compendia la valutazione qualitativa delle caratteristiche geologiche strutturali della massa rocciosa e delle relative caratteristiche delle discontinuità.

Il senso logico di tale evoluzione è probabilmente da ricercarsi nell'esigenza:

- di un indice unicamente "geostrutturale": ciò ha particolare rilevanza nel caso di utilizzo come sorgente dell'indice RMR (corretto), dato che tra i parametri di ingresso è inclusa la resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta (σ_c);
- di un metodo di stima qualitativa ritenuto comunque più adatto:
 - per la classificazione dei contesti geomeccanici più sfavorevoli (secondo Hoek, generalmente riferibili a valori di $GSI < 35$);⁴
 - per una valutazione del grado di reciproca interconnessione dei blocchi rocciosi.

Se da un lato tali motivazioni risultano del tutto comprensibili, dall'altro la definizione dell'indice GSI su basi esclusivamente qualitative appare comunque oggettivamente discutibile, ed ha in effetti originato una vivace discussione in campo internazionale (si veda ad es. Stille e Palmstrom (2003), Bieniawski (2004), ecc.).

² Ad es. Hoek (1997); Hoek e Brown (1997); Hoek (1998); Hoek (1999); Hoek e Marinos (2000); Hoek (2005: comunicazione personale).

³ Tale diagramma è riprodotto nelle successive figure 2.1 e 2.4, dove sono stati peraltro aggiunti i parametri per una stima quantitativa, come di seguito descritto.

⁴ Si osserva nel contempo che per valori di GSI molto elevati (orientativamente >75) non è raccomandato l'utilizzo di tale indice per la derivazione dei parametri d'ammasso secondo il riferimento ad un modello continuo-equivalente [Hoek (2005), Diederichs (2005)].

In effetti, l'inevitabile approssimazione di un approccio solo qualitativo, se non altro, sembra mal combinarsi ad esempio con l'affinamento sempre più rigoroso delle formulazioni per la derivazione dei parametri d'ammasso mediante appunto l'indice GSI (Hoek et al., 2002; Hoek e Diederichs, 2005)). Più generalmente, sembra riproporsi soprattutto il problema di fondo che ha sostanzialmente favorito la diffusione delle classificazioni geomeccaniche tradizionali, vale a dire il rischio di eccessiva soggettività nella stima da parte degli utilizzatori, tenuto anche conto della diversa esperienza.

Per le considerazioni prima svolte, il problema non è tuttavia banale e si deve correttamente aggiungere che analoghe possibilità di errore, se non peggiori, possono derivare da una stima classificativa basata solo su misurazioni, senza tener conto di una valutazione interpretativa più ampia di carattere essenzialmente geologico⁵.

Tenendo conto degli elementi a favore e contro, appare di riflesso ottimale un approccio che integri adeguatamente le due impostazioni e cioè preveda ad esempio una prima fase di inquadramento generale qualitativo, una successiva determinazione più oggettiva del GSI su basi quantitative, e infine una valutazione conclusiva delle risultanze, con espressione del definitivo *engineering judgement*.

Tale procedura risulta particolarmente congeniale ad esempio quando si disponga di una notevole quantità di dati dai sondaggi, ed è importante apprezzare anche in modo statistico le possibili variazioni geostrutturali degli ammassi.

Diversi autori hanno quindi proposto un'adeguata quantificazione dei parametri di ingresso del diagramma per la determinazione del GSI, come ad es. Sonmez e Ulusay (1999) e Cai, Kaiser, Uno, Tasaka e Minami (2004). L'approccio proposto da questi ultimi autori è brevemente descritto nel seguito.

2.1 Metodo di Cai, Kaiser et al.(2004) per la determinazione del GSI

Come schematizzato nel diagramma in Fig. 2.1, Cai, Kaiser et al. (2004) hanno proposto il riferimento al Volume Unitario dei Blocchi rocciosi (Vb) ed al Joint Condition Factor (JC) come parametri quantitativi d'ingresso per la determinazione del GSI.

⁵ Si veda anche Marinou, Marinou e Hoek (2004) e Marinou, Hoek e Marinou (2005)

Si tratta, come noto, di parametri base per la determinazione dell'indice RMI di Palmstrom, anche se nel caso specifico il Joint Condition Factor è calcolato mediante la relazione semplificata $JC = JW * JS / JA$ dove:⁶

JW, JS, JA sono rispettivamente gli indici per la quantificazione dell'ondulazione a grande scala, la rugosità e l'alterazione delle discontinuità, i cui punteggi classificativi sono ottenuti in accordo alle tabelle proposte da Palmstrom (1995)⁷. Come ad esempio indicato in Fig. 2.2, Palmstrom ha peraltro sviluppato, sulla base di analisi statistiche, diversi metodi per la derivazione del Volume Unitario dei Blocchi (V_b), evidenziando correlazioni con i diversi indici di fratturazione degli ammassi [RQD , numero di discontinuità a metro lineare, quadrato o cubico (J_v), densità pesata delle discontinuità (wJ_d), ecc.]. La valutazione di V_b è inoltre affinata mediante la stima del fattore di forma dei blocchi rocciosi (β), in base a cui è proposta ad esempio la relazione $V_b = \beta * J_v^{-3}$ o anche $V_b = \beta * wJ_d^{-3}$.

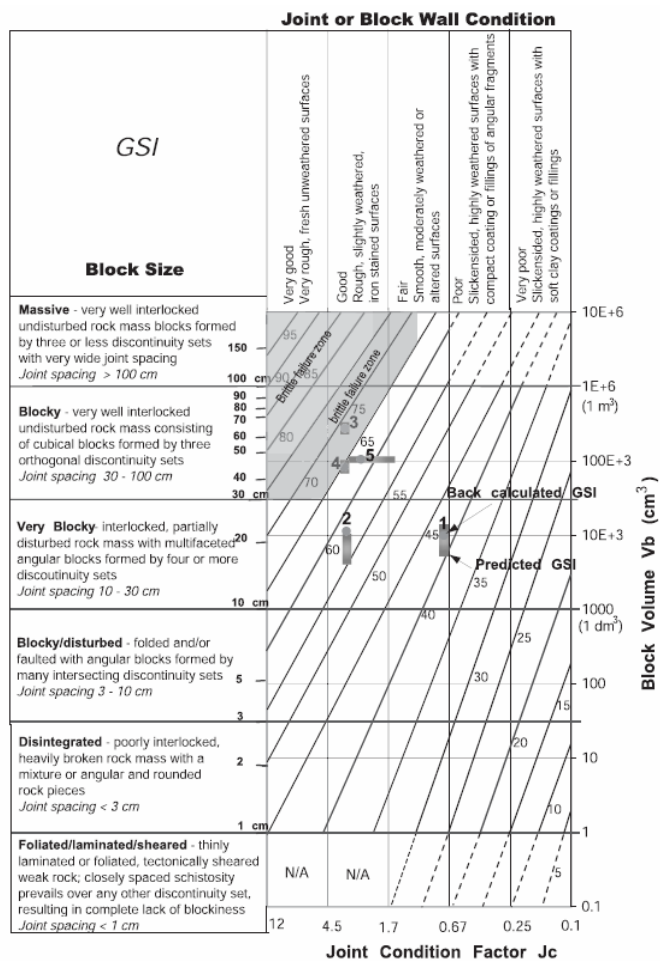


Fig. 2.1: Carta di Hoek (1999) per la determinazione del GSI modificata da Cai, Kaiser et al., 2004.

Fig. 2.1: Hoek's GSI chart (1999) as modified by Cai, Kaiser et al., 2004

⁶ Si deve notare che per la determinazione del JC di Palmstrom è compreso anche il fattore JL che esprime la persistenza delle discontinuità: $JC_{(Palmstrom)} = JR * JL / JA$ dove $JR = JW * JS$.

⁷ Una trattazione completa del metodo RMI e dei diversi indici utilizzati, è visualizzabile nel sito www.rockmass.net di A. Palmstrom a cui si rimanda per i necessari dettagli.

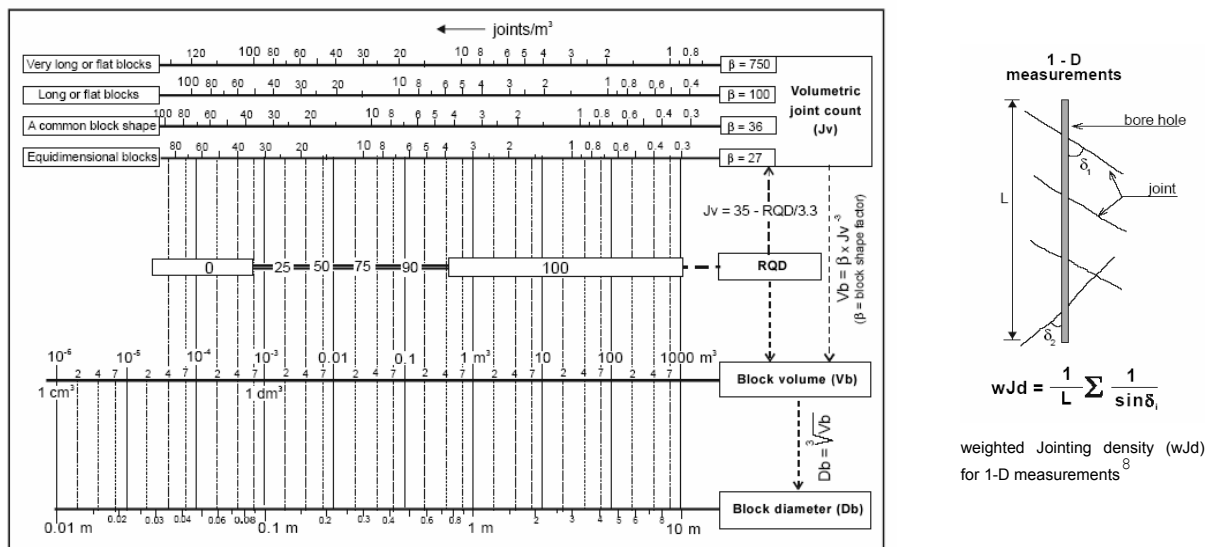


Fig. 2.2: Diversi indici di fratturazione e relative correlazioni (Palmstrom, 2001)

Fig. 2.2: Different fracturing indexes and their reciprocal correlations (Palmstrom, 2001)

2.2 Implementazione probabilistica dell'approccio quantitativo

Come del resto già sperimentato in diversi casi pratici, si ritiene di particolare interesse e potenzialità l'applicazione del metodo quantitativo descritto con un approccio di tipo probabilistico, che consente di tener adeguatamente conto della variabilità e/o dell'incertezza dei dati disponibili. In particolare, quando questi ultimi sono statisticamente significativi (in termini quantitativi e qualitativi), si utilizzano infatti come parametri di ingresso gli istogrammi di frequenza e/o le funzioni di densità che descrivono meglio la distribuzione dei dati. In contesti di maggiore incertezza e di carenza dati, l'approccio probabilistico permette peraltro di riflettere nelle analisi progettuali il campo di variabilità parametrica ipotizzabile sulla base di valutazioni esperte.

Le figure 2.3 e 2.4 evidenziano un esempio di input/output di analisi probabilistica condotta applicando il metodo MonteCarlo (n.500 simulazioni con campionamento casuale Latin-Hypercube) per la derivazione probabilistica di V_b e J_c , e quindi del GSI. Le analisi prendono in esame alcuni sondaggi realizzati in rocce calcareo-dolomitiche e non hanno considerato le zone di faglia, e/o di intensa fratturazione, le quali sono state studiate a parte. Le risultanze possono essere quindi considerate nel caso rappresentative delle condizioni "ordinarie" dell'ammasso roccioso.

In sintesi, l'analisi dei dati disponibili ha portato alla quantificazione dei parametri d'ingresso con le distribuzioni indicate in Fig. 2.3, da ciascuna delle quali, ad ogni simulazione, si è campionato un valore che ha concorso ad un singolo calcolo delle grandezze cercate.

⁸ Secondo Palmstrom $wJd \approx J_v$

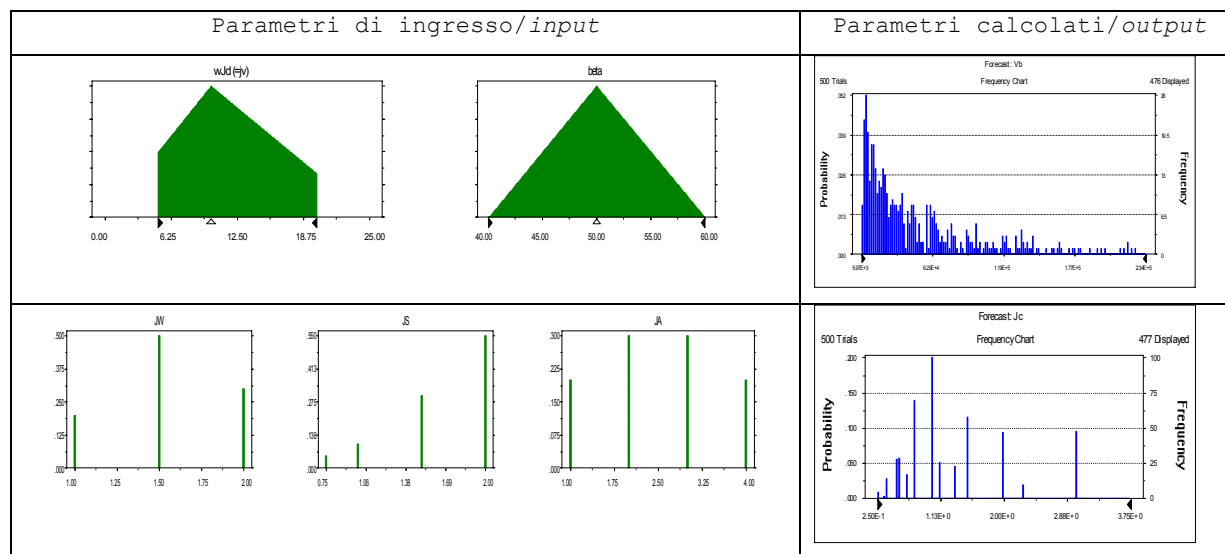


Fig.2.3: Esempio di determinazione probabilistica quantitativa del GSI: parametri di ingresso [$wJd(\approx Jv), \beta, JW, JS, JA$] e calcolati [$(Vb, Jc) \rightarrow GSI$]

Fig.2.3: Example of probabilistic quantitative assessment of GSI: input parameters [$wJd(\approx Jv), \beta, JW, JS, JA$] and calculated parameters [$(Vb, Jc) \rightarrow GSI$]

I valori di GSI risultanti dall'analisi condotta sono esplicitati nella Fig. 2.4: ogni punto evidenziato da un circoletto verde rappresenta un possibile risultato, frutto della combinazione probabilistica dei parametri d'ingresso. Nel grafico sono riportati anche in tratteggio blu le rette corrispondenti al 1°-25°-75° e 99° percentile del GSI. Come è dato osservare, il GSI può variare da circa 35 a 67, con tuttavia intervallo più probabile (compreso tra 25°-75° percentile) racchiuso tra 45 e 55.

Nello stesso grafico sono state riportate per confronto anche alcune valutazioni deterministiche del GSI condotte su affioramenti rocciosi in superficie delle stesse litologie attraversate (simboletto a croce violaceo).

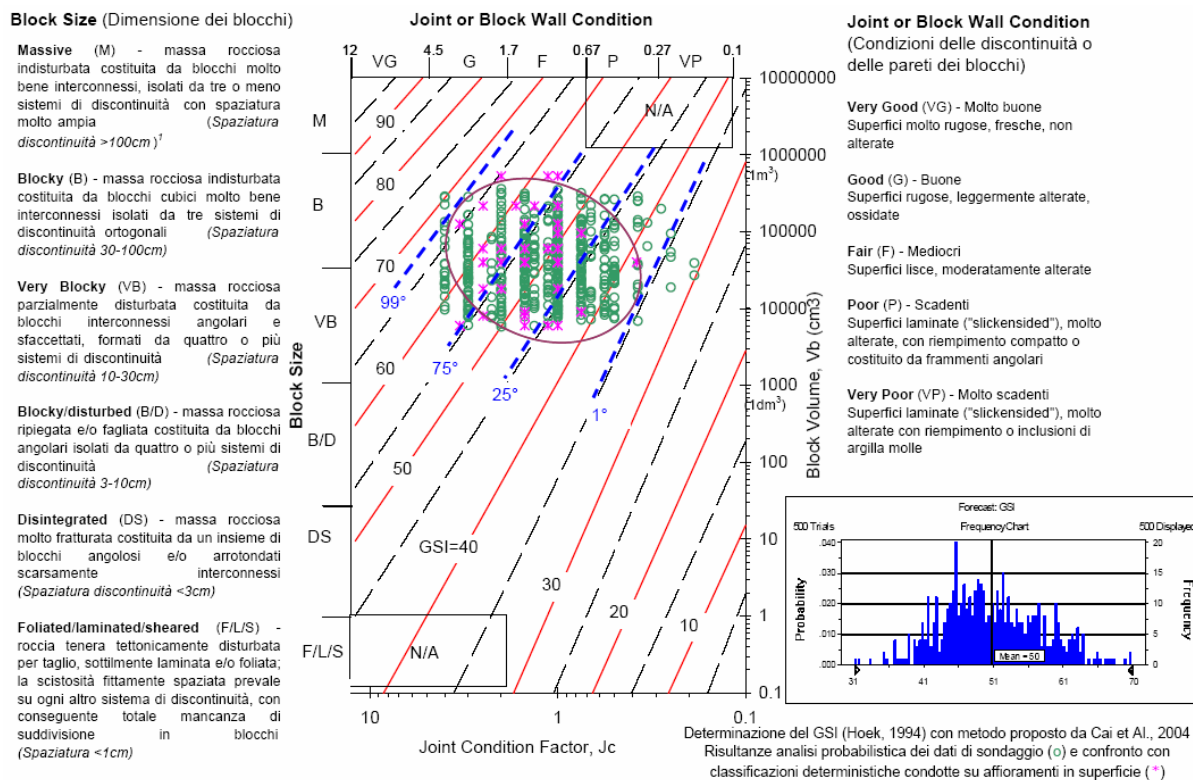


Fig. 2.4: Esempio di applicazione probabilistica del metodo quantitativo proposto da Cai, Kaiser et al. (2004) per la determinazione del GSI

Fig. 2.4: Example application of the probabilistic calculation of the quantitative GSI assessment proposed by Cai, Kaiser et al. (2004)

3. INQUADRAMENTO CLASSIFICATIVO GENERALE DEL COMPORTAMENTO ALLO SCAVO

Come sottolineato dalle LGP (1997), per la scelta tipologica e il dimensionamento progettuale degli interventi di stabilizzazione è importante analizzare il comportamento allo scavo degli ammassi nelle condizioni tensionali esistenti a quota progetto, nell'ipotesi teorica di assenza degli interventi di stabilizzazione.

In termini generali, una classificazione sufficientemente esaustiva della risposta deformativa allo scavo non può prescindere dallo sviluppo congiunto di analisi di tipo tensionale e geostrutturale.

Nella pratica è in genere utile ricorrere ad un approccio ragionevolmente semplificato che consenta un primo inquadramento generale del comportamento atteso, previo poi condurre le necessarie verifiche di dettaglio con metodi più rigorosi e precisi. Secondo tale ottica, le analisi tensionali sono spesso finalizzate alla quantificazione di indici classificativi in grado di esprimere la potenziale intensità dei fenomeni deformativi attesi.

In genere è implicito nel caso il riferimento ad un modello geotecnico "continuo-equivalente", sia ricorrendo a metodi empirici, sia più francamente analitici. Nel primo caso, un esempio tipico è quello degli "Indici di Competenza", espressione del rapporto tra un termine rappresentativo delle condizioni tensionali a quota progetto (sollecitazione sul contorno di scavo o la stessa pressione litostatica), ed uno relativo alla resistenza (della matrice rocciosa o d'ammasso) mobilizzabile dal mezzo incassante.

Tale approccio è comunemente utilizzato per la previsione sia del comportamento "spingente" (si vedano ad esempio gli "Indici di Competenza" proposti da Jethwa et al., 1984; Aydan et al., 1991; Singh et al. 1992; Hoek e Marinos 2000; ecc.)⁹, sia dei fenomeni di decompressione fragile violenta (→"Indici di Danno": Russenes, 1974; Hoek and Brown, 1980; Grimstad e Barton, 1993; ecc.).



Fig.3.1: Esempio di fenomeni di decompressione violenta [sx: Galleria del Loetschberg (Diederichs, 2005)] e di comportamento spingente [dx: deformazione del cunicolo pilota della galleria ferroviaria di Fleres scavato con TBM nel 1987-1988 (foto del 1993, cortesia del Dr. S. Pedemonte)]

Fig.3.1: Example of rockburst (left: Loetschberg Tunnel, Diederichs, 2005) and squeezing behaviour (right: deformation in the pilot tunnel of the Fleres railway tunnel excavated by TBM in 1987-1988 (photo of 1993, for courtesy of Dr. S. Pedemonte)

Un' alternativa progettuale relativamente più accurata rispetto al metodo degli indici di competenza utilizza un approccio analitico¹⁰ per la quantificazione del comportamento allo scavo direttamente in termini deformativi e/o di sviluppo della fascia plastica. Nel già citato articolo¹, era stata presentata ad esempio una classificazione del comportamento che distingue n.6 categorie di comportamento (a,b,c,d,e,f)¹¹ in funzione della deformazione radiale al fronte di scavo e dello sviluppo della fascia plastica nell'intorno del cavo.

⁹ Si veda anche Barla (1994)

¹⁰ Ad esempio il metodo "Convergenza-Confinamento" o delle "Linee caratteristiche"

¹¹ Come si può visualizzare in Fig.3.5, la classe "a" è specificamente associata ad una risposta deformativa in campo elastico di un mezzo roccioso continuo, mentre la classe "f" identifica la condizione di immediata instabilità del fronte di scavo.

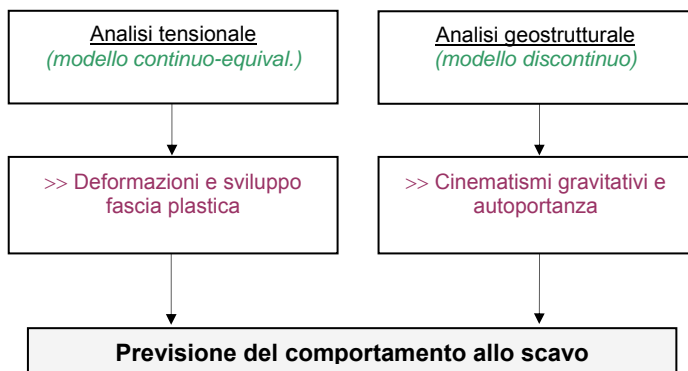


Fig.3.2: Previsione del comportamento allo scavo
 Fig.3.2: *Prevision of behaviour upon excavation*

Come indicato in Fig.3.2, un inquadramento più completo del comportamento allo scavo è peraltro necessariamente articolato non solo su analisi di tipo tensionale, ma anche di tipo geostrutturale, più esplicitamente finalizzate alla previsione di instabilità gravitativa, connesse al reale carattere discontinuo dell'ammasso.

D'altro canto, le analisi tensionali possono di per sé non fornire indicazioni univoche sulla fenomenologia

deformativa attesa: ad esempio, è abbastanza intuitivo che uno squilibrio tensionale elevato può determinare (Fig.3.1), a seconda delle condizioni geostrutturali, un comportamento "spingente" oppure di rottura fragile violenta ("colpi di tensione", *rockburst*). Non a caso, come si è visto, per la previsione empirica di entrambi le fenomenologie, si utilizzano indici (di competenza o danno) del tutto simili.

In un ambito di primo inquadramento classificativo del comportamento, è di riflesso utile il riferimento congiunto ad adeguati indici geostrutturali, specie quando relazionabili alle conseguenti capacità di autoportanza degli ammassi (ad esempio, RMR System di Bieniawski, 1973 e segg. e Q-System di Barton, 1974 e segg.).

In linea con tale impostazione, in Fig.3.3 si evidenzia lo schema base per un inquadramento generale del comportamento allo scavo in termini di fenomenologia deformativa tipica¹².

Un esempio concettualmente simile di schematizzazione classificativa, basato sulla possibile combinazione tra indici di competenza e di qualità geostrutturale è riportato in Fig.3.4 (Hoek, 1981), fornendo nel caso specifico un inquadramento di massima degli interventi di stabilizzazione necessari.

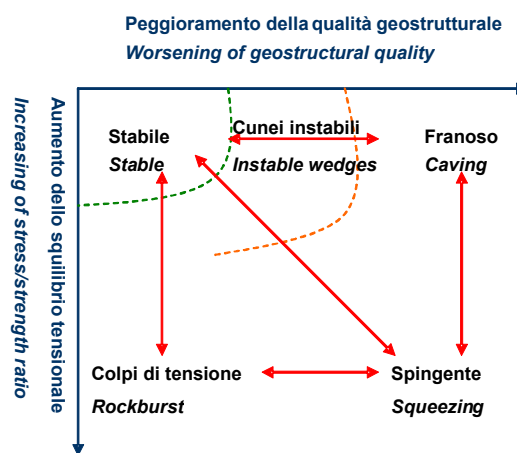


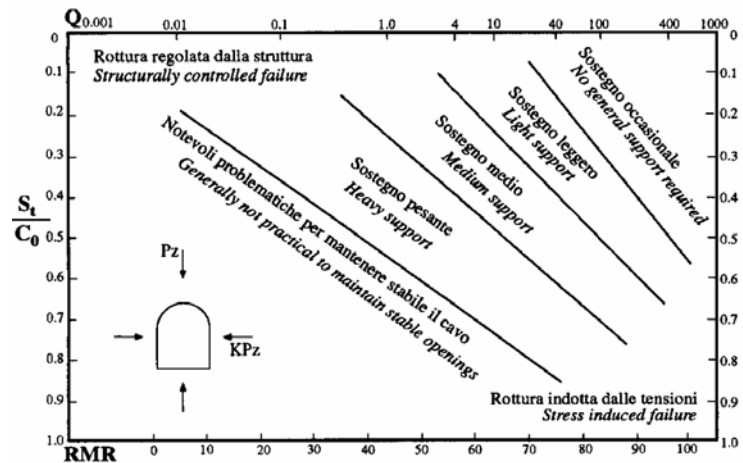
Fig.3.3: Schema concettuale per l'inquadramento generale del comportamento allo scavo (si vedano anche la nota 12 e la Fig.3.5)

Fig.3.3: Conceptual scheme for a general setting of the ground behaviour upon excavation (see also note 12 and Fig.3.5)

¹² I fenomeni di decompressione violenta sono associabili a rocce resistenti e fragili: secondo Diederichs (2005) la potenzialità dei colpi di tensione è almeno "media" per rocce

Fig.3.4: Relazione approssimata tra stabilità del cavo, qualità della massa rocciosa e sollecitazione tangenziale massima sul contorno del cavo (S_t) (Hoek,1981, semplificata); C_0 =resistenza a compressione monoassiale della roccia.

Fig.3.4: Approximate relationship between excavation stability, rock mass quality and maximum compressive boundary stress (S_t) (Hoek, 1981, simplified); C_0 =intact rock strength.



3.1 Sistema classificativo proposto

In Fig.3.5 è evidenziato lo schema classificativo aggiornato correntemente utilizzato dagli autori, nel quale le categorie di comportamento già presentate nel precedente articolo¹ sono rapportate al sistema RMR di Bieniawski.

Come è dato osservare, la matrice risultante dal duplice approccio classificativo consente un'ottimale focalizzazione delle casistiche progettuali da affrontare, consentendo una razionale scelta tipologica degli interventi di stabilizzazione in funzione della fenomenologia deformativa potenziale più probabile associabile alle diverse combinazioni tensionali e geostrutturali.

E' fondamentale aggiungere, comunque, che la matrice classificativa proposta non è in grado, come logico, di coprire tutte le possibili criticità progettuali ed alcune condizioni geologiche particolari devono essere necessariamente analizzate a parte (ad esempio la presenza di materiali espandibili e quindi il rischio di rigonfiamento, situazioni geostrutturali complesse, ecc.).

con Indice di Fragilità $IF=(\sigma_c/\sigma_t)>8$ e $\sigma_c>80\text{MPa}$. Negli altri casi, è più probabile un prevalente meccanismo di rottura per taglio, con fenomenologia deformativa tipica ancora associabile al comportamento spingente.

ANALISI → ↓ ANALYSIS		Geostrutturale Geostructural →		Ammasso roccioso <i>Rock Mass</i>				
				Continuum ↔	Discontinuum ↔	Equivalent Continuum		
Tensionale Stress ↓				RMR				
Risposta deformativa <i>Def. response ↓</i>	δ_o (%)	Rp/Ro	Categoria* di Comportamento <i>Behavioral category ↓</i>	I	II	III	IV	V
Elastica <i>Elastic</i> ($\sigma_\theta < \sigma_{cm}$)	trascurabile <i>negligible</i>	-	(a)	STABILE <i>Stable</i>				
			b	CUNEI <i>Instable wedges</i>				
Elasto-Plastica <i>Elasto-Plastic</i> ($\sigma_\theta \geq \sigma_{cm}$)	<0.5	1-2	c	COLPI <i>Rockburst**</i>	INSTABILI <i>Instable wedges</i>			FRANOSO <i>Caving</i>
	0.5-1.0	2-4	d	DI				
	>1.0	>4	e	TENSIONE <i>Rockburst**</i>				SPINGENTE <i>Squeezing</i>
			(f)	→Immediato collasso del fronte <i>Immediate face collapse ↑</i>				

Fig.3.5: Inquadramento classificativo generale del comportamento allo scavo

Fig.3.5: General classification scheme of the excavation behaviour

Note: In verde i fenomeni deformativi caratteristici, i limiti tra le zone colorate sono indicativi; *in green the typical hazards, the limits of the coloured zone are just indicative.*

* Vedi riferimento in nota 1; *see reference in note 1.*

** Nel campo di rottura fragile (→colpi di tensione) gli indici deformativi dell'analisi tensionale possono essere intesi solo come indicatori di crescente potenzialità del fenomeno deformativo¹³; *in the brittle failure domain (→rockburst) the deformation index of the stress analysis can be intended just as indicators of the increasing potentiality of the deformational phenomenon¹³.*

δ_o = deformazione radiale al fronte di scavo; *radial deformation at the face*

Rp/Ro= Raggio plastico/Raggio cavità; *plastic radius/radius of the cavity*

σ_θ = sollecitazione tangenziale massima sul contorno del cavo; *max tangential stress*

σ_{cm} = resistenza dell'ammasso roccioso; *rock mass strength*

E' importante notare inoltre che lo schema proposto fornisce altresì un ragionevole orientamento al tipo di analisi progettuale di dettaglio più consona alle caratteristiche geostrutturali degli ammassi, con assimilazione secondo caso ad un mezzo roccioso continuo o discontinuo, in genere più adatto alla modellazione dei fenomeni gravitativi.

Analogamente a quanto illustrato in precedenza per il GSI, l'analisi previsionale del comportamento allo scavo può essere sviluppata in termini probabilistici, incorporando la variabilità e l'incertezza delle condizioni geomeccaniche ed al contorno: alcuni esempi sono presentati nella Tab.3.1 e nelle figure 3.6 e 3.7.

¹³In tale contesto, la reale possibilità di una categoria "e" è del resto molto remota (si veda sul tema anche la precedente nota 12).

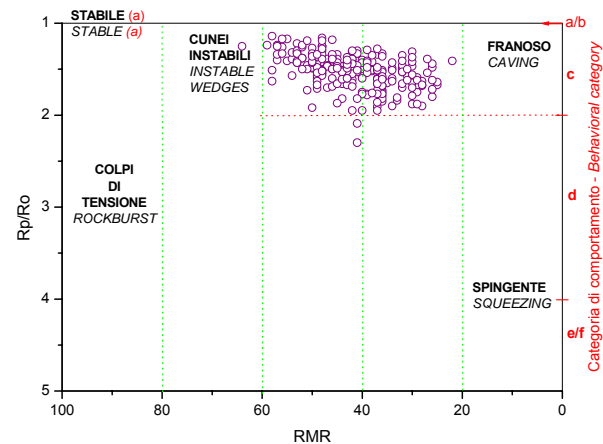
Nel primo caso (Fig.3.6) si è utilizzato come input il risultato dell'analisi probabilistica per la determinazione del GSI illustrato nel capitolo precedente (Fig.2.4), considerando una galleria circolare di raggio 5m ed una copertura di 300m. Le analisi dei dati disponibili e di *best-fitting* hanno portato alla quantificazione dei parametri d'ingresso nella forma evidenziata in Tab.3.1.

Input:

	DISTRIBUZIONE	min	max
GSI	LGN(50,7)	35	67
σ_c MPa	TRG(30,50,70)	30	70
m_i	UNF(8,12)	8	12
RMR ¹⁴	BETA(12,12,84)	22	65

Output:

RMR→ CC↓	II	III	IV
c	0.8%	58%	40%
d		0.4%	0.8%



Tab.3.1: Principali parametri di ingresso (↑) e risultanze dell'analisi probabilistica del comportamento allo scavo (↓) per l'esempio I.

Tab.3.1: Main input parameters (↑) and results of the probabilistic analysis of the excavation behavior (↓) of the example I.

Fig.3.6: Esempio (I) di inquadramento classificativo del comportamento mediante analisi probabilistica

Fig.3.6: Example (I) of the behavior classification scheme by means of probabilistic analysis

Note: LGN=lognormale; TRG=triangolare; UNF=uniforme; σ_c = resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta; m_i = costante di Hoek-Brown (1980) della roccia intatta.

Le analisi sono state eseguite con il metodo "Convergenza-Confinamento", utilizzando la soluzione di Carranza T. (2003-2004). I parametri geomeccanici della massa rocciosa sono stati derivati da quelli della roccia intatta in funzione dell'indice GSI, riferendosi in particolare alle formulazioni di Hoek et al. (2002) per il calcolo della resistenza di picco¹⁵, e a Hoek e Diederichs (2005, equazione semplificata) per il modulo di deformabilità (E_d). A commento dei risultati dell'analisi probabilistica (Fig.3.6 e Tab.3.1↓) si osserva in sintesi:

- in termini di analisi tensionale, la risposta allo scavo è sempre elasto-plastica e nel 99% dei casi l'intensità dei fenomeni deformativi è relativamente contenuta (categoria di comportamento "c"); il fronte di scavo è conseguentemente stabile e gli spostamenti radiali totali, in assenza di interventi di stabilizzazione, sono di ordine centimetrico (valore massimo 5cm);

¹⁴ Nella simulazione probabilistica si è tenuto conto del coefficiente di correlazione con GSI derivato con l'analisi statistica dei dati ($R=0.58$)

¹⁵ i parametri di resistenza residua sono stati calcolati considerando un GSI ridotto $GSI_{res}=0.36 \cdot GSI$ (Russo et al., 1998), con $GSI_{res}(\text{minimo})=25$.

- nella quasi totalità dei casi la classe RMR è compresa tra la III (59%) e la IV (40%): la qualità geomeccanica dell'ammasso è conseguentemente da mediocre a scadente; tenendo conto del diametro di scavo, le relative caratteristiche di autoportanza sono tali da richiedere interventi di confinamento e/o rinforzo, via via più importanti al peggiorare delle condizioni geostrutturali.
- la fenomenologia deformativa più importante ai fini del dimensionamento degli interventi di stabilizzazione è quindi quella di tipo gravitativo, con passaggio da potenziali distacchi di cunei rocciosi¹⁶ ad un comportamento francamente franoso nei contesti più sfavorevoli. E' importante notare che in funzione dell'orientamento delle discontinuità, i fenomeni gravitativi potrebbero interessare anche il fronte di scavo.

La progettazione di dettaglio compendierà di riflesso l'utilizzo dei metodi più adeguati all'analisi del discontinuo, applicando ad esempio soluzioni basate sulla teoria dell'equilibrio limite e/o, preferibilmente, metodi numerici agli elementi distinti (D.E.M.)

Un secondo esempio di risultanze di analisi probabilistica, sviluppata con i criteri prima illustrati, è presentato in Fig.3.7.

Il caso si riferisce ad una galleria stradale di circa 10m di diametro nell'Appennino settentrionale, in rocce conglomeratiche e scistose, con coperture comprese tra ~40-80m. Sulla base dell'indice GSI e delle proprietà della roccia intatta, lo studio geomeccanico ha portato nel caso all'identificazione di n.4 raggruppamenti (G1-G4), di cui si evidenzia in figura il relativo comportamento allo scavo.

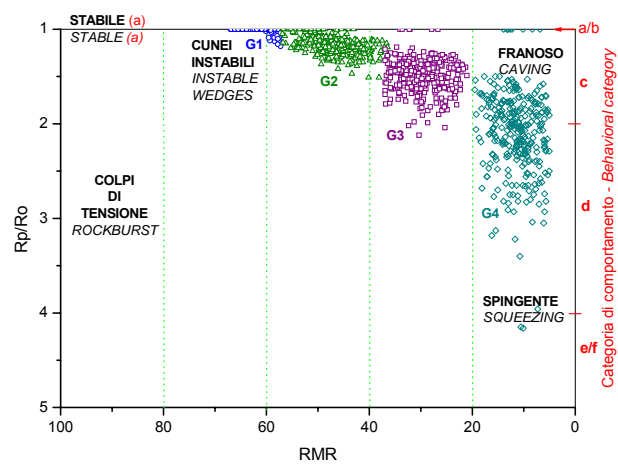


Fig.3.7: Esempio (II) di inquadramento classificativo del comportamento mediante analisi probabilistica

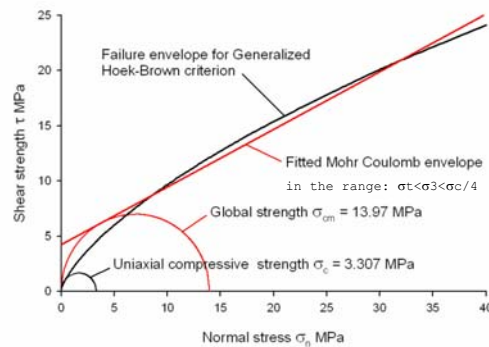
Fig.3.7: Example (II) of the behavior classification scheme by means of probabilistic analysis.

Ad integrazione delle considerazioni svolte, è utile osservare che gli indici deformativi utilizzati per la classificazione del comportamento, ed in particolare il rapporto R_p/R_o , possono essere correlati agli indici di competenza prima descritti. Come del resto intuibile, la correlazione è tuttavia in genere più soddisfacente per ammassi caratterizzati da una legge costitutiva di tipo "perfettamente-plastico".

In tabella 3.2 si evidenziano in proposito i risultati ottenuti, con una confidenza di circa il 90%, mediante un'analisi di tipo probabilistico, ipotizzando un'ampia variabilità dei diversi parametri d'ingresso ed appunto una legge costitutiva "perfettamente-plastica".

¹⁶ Da verificare in funzione delle locali condizioni giacitureali e geotecniche delle discontinuità.

Modello Idealmente-Plastico (Confidenza $\approx 90\%$)			
Indici di Competenza IC		Rp/Ro	CC
$\sigma_{cm} / (2 \cdot \gamma \cdot H)$	$\sigma_{cm_{glob}} / (\gamma \cdot H)$		
>1	(>3)	-	a/b
0.05-1	0.6- (3)	1-2	c
0.01-0.05	0.26-0.6	2-4	d
<0.01	<0.26	>4	e



Tab.3.2: Correlazione tra le Categorie di Comportamento (CC) ed alcuni Indici di Competenza (IC). Il significato della resistenza d'ammasso globale è illustrato nel grafico a destra (Hoek, 2005); come noto, il relativo IC è utilizzato da Hoek e Marinos (2000) per la previsione del comportamento spingente.

Tab.3.2: Correlation between Behavior Categories (CC) and some Competence Indexes (IC). The meaning of the global rock mass strength is presented in the sketch on the right (Hoek, 2005); as known, the relative IC is used by Hoek and Marinos (2000) for prediction of squeezing.

3.2 Definizione tipologica degli interventi di stabilizzazione

La scelta progettuale degli interventi di stabilizzazione (confinamento, rinforzo, ecc.) e quindi la composizione delle Sezioni Tipo è consequenziale all'inquadramento classificativo operato.

Un esempio in tal senso, essenzialmente legato allo scavo con tecniche tradizionali, è fornito nel seguito.

In particolare, dopo avere riepilogato schematicamente in Tab. 3.3 le principali azioni progettuali applicabili nello scavo in sotterraneo (con alcuni esempi dei conseguenti interventi di stabilizzazione), in Fig.3.8 si schematizza il tentativo di relativa associazione alle diverse fenomenologie deformative.

Sigla	Azione progettuale (*)	Interventi di stabilizzazione (esempio)
1	In avanzamento allo scavo	
1.1	Preconfinamento di cunei instabili	Chiodature inclinate in avanzamento
1.2	Rinforzo dell'ammasso al contorno in avanzamento	Riqualifica in avanzamento mediante elementi resistenti interamente connessi
1.3	Precontenimento del contorno di scavo	Coronelle gettiniettate sul contorno di scavo
1.4	Preconsolidamento del fronte	Elementi in vetroresina iniettati, colonne gettiniettate
1.5	Prearmatura del cavo	Ombrello di tubi (infilaggi)
..

2		In fase di scavo
2.1	Sovrascavo ¹⁷	
2.2	Confinamento radiale	Chiodature (confinamento cunei instabili); calcestruzzo proiettato (fibrorinforzato o con rete metallica elettrosaldata); centine metalliche
2.3	Rinforzo dell'ammasso al contorno di scavo (interventi migliorativi)	Bullonature di riqualifica dell'ammasso roccioso
2.4	Deconfinamento (convergenze per scarico tensionale)	Centine metalliche scorrevoli; giunti di decompressione nel calcestruzzo proiettato
2.5	Protezione	Rete metallica a doppia torsione
..

(*) Nota: Alle azioni progettuali elencate si deve naturalmente aggiungere, quando necessario, il drenaggio delle acque in avanzamento.

Tab.3.3: Principali azioni progettuali nello scavo in sotterraneo ed esempio degli interventi di stabilizzazione associati.

Tab.3.3: Main design actions in underground excavation and example of the associated typical stabilization measures.

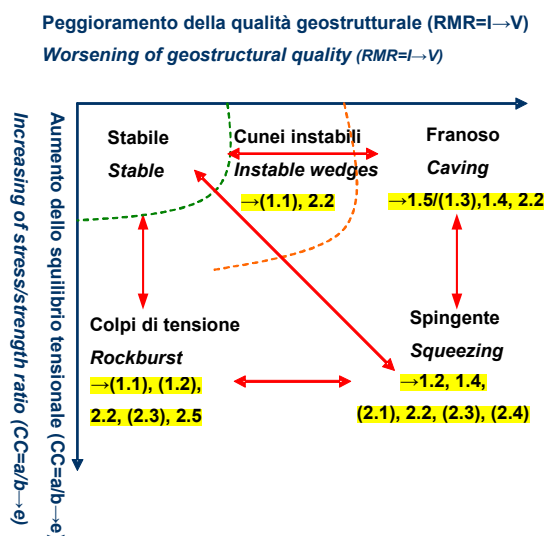


Fig.3.8: Tentativo di associazione degli interventi di stabilizzazione (da Tab.3.3) al tipo di fenomenologia deformativa; si veda anche il commento addizionale nel testo. Nota: (),/=interventi eventuali, alternativi.

Fig.3.8: Tentative association of stabilisation measures (from Tab.3.3) to the type of deformation phenomenons, see also the additional comment in the text. Note: (),/= eventual, alternative measures.

Come è dato osservare in Fig.3.8, spesso la soluzione progettuale non è univoca e risultano teoricamente applicabili misure stabilizzanti diverse, la cui possibilità applicativa sarà opportunamente verificata con i calcoli progettuali e quindi confrontata in termini di tempi e costi costruttivi.

Un esempio tipico riguarda gli interventi di stabilizzazione selezionabili in caso di comportamento "spingente", dove si devono valutare (e confrontare) procedure contrastanti:

(i) consentire una certa decompressione dell'ammasso, oppure (ii) evitarla in toto con preconsolidamenti tesi ad incrementare le caratteristiche geomeccaniche della massa rocciosa nel fronte e/o nel contorno di scavo, o, ancora (iii), applicare opportune tecniche di stabilizzazione ibride.

¹⁷ per compensare le prevedibili convergenze del cavo

Naturalmente, i calcoli progettuali consentiranno infine di differenziare adeguatamente l'intensità degli interventi in funzione delle risultanze delle analisi di dettaglio relative alle diverse condizioni geomeccaniche classificate in Fig.3.5.

Come esempio applicativo, i risultati dell'analisi probabilistica presentata nella Tab.3.1, porterebbero alle indicazioni tipologiche evidenziate in Tab.3.4.

Inquadramento classificativo →	c/III (applicazione ≈ 60%)	c/IV (applicazione ≈ 40%)
Sezione Tipo	C1	C2
Interventi in avanzamento	-Eventuale ¹⁸ bullonatura del fronte	-Eventuale ¹⁹ prerinforzo della calotta e del fronte con elementi resistenti connessi;
Interventi radiali	-Bullonatura sistematica; -Calcestruzzo proiettato (fbr)	-Centine metalliche; -Calcestruzzo proiettato (fbr)

Tab.3.4: Esempio applicativo sulla scelta tipologica degli interventi di stabilizzazione riferito al caso presentato in Tab.3.1 (fbr=fibrorinforzato).

Tab.3.4: *Practical example about the typological choice of the stabilization measures with reference to the case presented in Tab.3.1 (fbr=fiber-reinforced)*

Ringraziamento: gli Autori ringraziano il Prof.Ing. Sebastiano Pelizza per la lettura critica dell'articolo ed i numerosi suggerimenti.

Acknowledgment: *the Authors thank Prof.Eng. Sebastiano Pelizza for the critical review of the paper, as well as for the numerous suggestions.*

4. BIBLIOGRAFIA

- A.F.T.E.S., Association Francaise Traveaux Souterrains. (1993) *Recommandations relatives a la Caracterisation des massifs rocheux utile a l'etude et a la realisation des ouvrages souterrains.* Tunnel et Ouvrages Souterrains n.177.
- Barla G. (1994): *Metodi di analisi progettuale per gallerie in rocce spingenti.* Atti del Quinto Ciclo di Conferenze di meccanica e ingegneria delle rocce pp 7.1-7.10
- Barton N., Lien R. and Lunde J. (1974). *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support.* Rock Mechanics, vol.6, n.4.
- Bieniawski Z.T. (1973): *Engineering classification of Jointed Rock masses.* Trans. South African Inst. of Civil Engineers. Vol.15, No.12, pp 335-344
- Bieniawski Z.T. (1984): *Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling.* Balkema, Rotterdam, 272pp.
- Bieniawski Z.T. (1989): *Engineering Rock Mass Classification,* John Wiley & Son.
- Cai M., Kaiser P.K., Uno H., Tasaka Y. and Minami M. (2004): *Estimation of Rock Mass Deformation Modulus and Strength of Jointed Hard Rock Masses using the GSI system.* International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences n.41, pp.3-19.

¹⁸ In funzione dei possibili cinematismi di cunei instabili; da valutare anche come misura integrativa o alternativa ad un'inclinazione verso l'avanzamento della bullonatura radiale.

¹⁹ In funzione dei possibili cinematismi di instabilità e/o quando l'intervento consenta un'ottimizzazione dei tempi e costi costruttivi legata ad esempio alla possibilità di maggiori sfondi di avanzamento.

- Carranza-Torres C. (2003): *Computation of stress and displacement distributions around circular opening subject to symmetrical loading in elasto-plastic Mohr-Coulomb and Hoek-Brown materials*. Personal communication, submitted to E.Hoek and B.Corkum (Rocscience)
- Diederichs M. (2005): *General Report: Summary of Meetings with Geodata with recommendations towards a Design Methodology for spalling Failure and Rockburst Hazards*. Personal communication to Geodata.
- Hoek E. (2005): *Comunicazioni Personali sui criteri di applicabilità del GSI, le correlazioni con altri indici classificativi e sul significato della resistenza d'ammasso globale*.
- Hoek E. and Brown E.T. (1980). *Underground Excavations in Rock*. The Institution of Mining and Metallurgy, London, 527 p.
- Hoek E. and Brown E.T. (1997). *Practical estimates of rock mass strength*. Submitted for publication to the Int. J. Rock Mech. Min. Sc.& Geomech. Abstr.
- Hoek E. and Diederichs M. (2005): *Estimation of rock mass modulus*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Science (in press).
- Hoek E. and Marinos P., (2000): *Predicting Squeeze*. Tunnels and Tunneling International, November, pp.45-51.
- Hoek E., Carranza-Torres C. and Corkum B. (2002): *Hoek-Brown failure criterion - 2002 Edition*. Proc.North American Rock Mechanics Society. Toronto, July 2002.
- Hoek E., Kaiser P.K. and Bawden W.F. (1995): *Support of Underground Excavations in Hard Rock*. Balkema, Rotterdam, 215pp.
- Hoek E., Marinos P. and Benissi M. (1998): *Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation*. Bull.Eng.Geol.Env. 57(2) 151-160.
- Marinos P., Hoek E., Marinos V. and, (2004): *Variability of the Engineering properties of rock masses quantified by the Geological Strength Index. The case of Ophiolites with special emphasis on tunneling*. Proceed. of Rengers Symposium.
- Marinos P., Marinos V. and Hoek E., (2004): *Geological Streength Index, GSI: Applications, recommendations, limitations and alteration fields commensurately with the rock type*. Bull. of the Geolo.Society of Greece vol XXXVI- Proc. of the 10th Intern.Congress, Thessaloniki
- Metropolis N. and Ulam S., 1949. *The Monte Carlo Method*. J.Am. Statistical Ass.44 (247): 335-341.
- National Project for Design, Tendering and Construction Standards in Underground Works (promoted by AGI, GEAM, IAEG, ITCOLD, SIG, SIGI), (1997): *"Guidelines for design, tendering and construction of underground works"* - Attachment of Gallerie e Grandi Opere Sotterranee, No.51.
- Palmstrom A. (1996): *Characterizing rock masses by the Rmi for use in pratical rock engineering* Tunn. and Und. Space Tech. vol.11
- Palmstrom A. (2000): *Recent developments in rock support estimates by the RMI*". *Journal of Rock mechanics and tunneling technology*, Vol.6, pp.1-9.
- Russo G., Kalamaras G.S. and Grasso P. (1998). *A discussion on the concepts of geomechanical classes, behavior categories and technical classes for an underground project*. Gallerie e grandi opere sotterranee, N.54, pp.40-51.
- Sonmez H. and Ulusay R., (1999): *Modifications to the Geological Strength Index (GSI) and their applicability to stability of slopes*. Intern.Journal of Rock Mchanics and Mining Sciences n.36, pp.743-760.

Summary of:

An update on geomechanical and behavioural classifications rock massed for tunneling

Giordano Russo and Piergiorgio Grasso - Geodata SpA Turin (Italy)

As recommended in the Italian Guidelines for Design (IGD), Tendering, and Construction of Underground Works (IGD, 1997), during the design process of an underground project it is important to have a clear distinction between geomechanical classes or groups, behavior categories, and technical classes, the last being directly associated with the different project solutions (in terms of typical sections of excavation and support). This paper provides a new insight into these basic concepts highlighting some important updates about the geomechanical characterization by means of the Geological Strength Index (GSI), as well as the classification of the response of the ground to the excavation. In particular, for the geomechanical classification the attention is focused on the requirement of a new approach to quantitatively assess GSI, taking also into account the gradual "desertion" by Dr. E. Hoek of the well-known derivation of the index (GSI) via the RMR-System of Bieniawski or Q-System of Barton. In particular, the approach recently proposed by Cai et al. (2004) is discussed and an innovative procedure is also explained, matching the quantitative assessment of the GSI with the probabilistic approach. For characterising ground responses, a logic scheme for the general classification of the behavior of the excavation is presented, combining adequately the results of stress analysis and geostructural analysis. The occurrence of the typical instability phenomena is visualized in a matrix in which a behavioural classification system based on radial deformation at tunnel face and the extent of the plastic zone is compared with the well-known RMR-System. On the basis of the identified behaviors, the required design actions can be rationally derived and adequate stabilization measures thus selected (i.e. the technical classes established). The application of the proposed, sequential and integrated approach is explained by practical examples showing the complete path through the different design steps recommended in the IGD.