

Una procedura progettuale che consente di fissare, prima della definizione del contratto, le regole per un percorso dell'opera chiaramente individuato

## ANALISI DI RISCHIO NELLA PROGETTAZIONE DI UNA GALLERIA

Pietro Lunardi\*  
Alessandro Focaracci\*\*

La messa a punto e lo sviluppo dell'approccio noto come ADECO-RS per la progettazione e la costruzione di opere in sotterraneo consentono oggi di impostare criteri di valutazione del rischio del progetto. Questi risultano molto utili per la valutazione delle alee di rischio su un progetto esecutivo, indispensabili in tema di project financing. Infatti con la procedura proposta, oltre a valutare le alee di un progetto in termini di tempi e costi di costruzione, è possibile individuare con chiarezza e in maniera critica su quali parametri geologico-geomeccanici agire, approfondendone la conoscenza per far rientrare le variazioni sui costi del progetto entro valori accettabili dagli investitori.

*Riprendiamo con piacere questo articolo dagli atti dell'ITA-AITES 2001 World Tunnel Congress poiché, mentre solitamente gli articoli negli anni "invecchiano" perdendo di originalità e di interesse, quello di questi Autori risulta ad oggi quanto mai attuale, anzi di avanguardia.*

*Attualmente, infatti, i soggetti coinvolti nella realizzazione di una grande opera infrastrutturale (Amministrazione appaltante, General Contractor, Enti finanziatori, Assicurazioni, ecc.) vivono un momento nel quale la gestione efficiente dell'iter realizzativo impone sempre più di ricorrere a procedimenti rigorosi, che consentano di valutare aprioristicamente le alee di rischio gravanti sul progetto, di capire quali fattori di rischio potrebbero incidere più pesantemente sulla realizzazione dell'opera, di quantificare l'efficacia degli eventuali approfondimenti volti a ridurre l'importanza di detti fattori. L'approccio proposto dagli Autori, pur nella semplificazione adottata per una più immediata comprensione, rappresenta uno strumento fondamentale e imprescindibile per poter gestire un progetto complesso quale quello di una grande infrastruttura comprendente opere in sotterraneo. Il banco di prova realizzato sulla nuova tratta ferroviaria AV/AC Bologna-Firenze, uno dei più importanti general contracting al mondo per dimensione e complessità, dimostra chiaramente la sua validità. Gli eccellenti risultati ottenuti a consuntivo in termini di contenimento dei tempi e dei costi nell'ambito di quanto preventivato (l'avanzamento dei lavori è al 95%) e il continuo affinamento in corso d'opera per una gestione dinamica del budget della commessa dimostrano, ancora una volta, che è possibile gestire una grande opera infrastrutturale complessa, che si sviluppa per il 90% in galleria, alla stessa stregua di altre opere di Ingegneria più tipiche del settore industriale.*

**D**a alcuni anni si è assistito a una crescente evoluzione tecnologica nel campo delle opere in sotterraneo che ha consentito di sviluppare approcci progettuali e costruttivi tali da permettere di valutare, con notevole precisione, tempi e costi di costruzione.

E' il caso, in particolare, dell'approccio conosciuto come ADECO-RS che, negli ultimi anni, in Italia è stato applicato alla progettazione e alla costruzione di grandi opere in sotterraneo: una fra tutte l'attraversamento appenninico della tratta ad Alta Velocità ferroviaria tra Bologna e Firenze.

In questo caso, nonostante la grandiosità dell'opera - oltre 90 km di gallerie in contesti geologico-geomeccanici anche molto difficili per il 50% dei lavori - si può verificare che lo scostamento, rispetto alle previsioni per ciascuna sezione tipo applicata, è di pochi punti percentuali. Si può quindi affermare che, anche per le opere in sotterraneo, si è raggiunto quel livello di affidabilità delle previsioni tipica delle altre opere di Ingegneria civile.

In tema di "project financing", l'opera in sotterraneo può quindi essere rapportata ad altre opere, valutando vantaggi, svantaggi e rischi di costruzione. In particolare, riferendosi alla valutazione dei rischi di un progetto di opere in sotterraneo, grazie ai nuovi approcci, oltre a garantire sicurezza operativa e l'applicazione dei criteri di assicurazione di qualità secondo le Norme ISO 9000, è possibile condurre analisi preliminari sulle possibili variazioni di tempi e costi di costruzione, con tutti i possibili scenari ipotizzabili.

Ciò, a nostro avviso, non è possibile adottando metodi che si riferiscono a classi di scavo o a classi geomeccaniche. Infatti, in questi casi la principale alea di rischio non sta nella scelta dei parametri o nelle incertezze geologiche, ma principalmente nella scarsa applicabilità di tali classificazioni a tutti i tipi di terreno e nelle eccessive soggettività nell'attribuzione della classe di scavo in fase costruttiva e del passaggio alla sezione tipo corrispondente.

Occorre invece riferirsi a procedimenti di progettazione che consentano una gestione di tutte le incertezze connesse al progetto e che, sulla base dei parametri più probabili, permettano, attraverso metodi matematici, di calcolare il comportamento tenso-deformativo della galleria (al fronte e al contorno del cavo). Solo in questo modo, in qualsiasi fase di progettazione, è possibile valutare, in funzione dell'affidabilità dei parametri conoscitivi, la differenza che c'è tra il progetto

più probabile e quelli più pessimistico o più ottimistico. Ciò può essere iterato fino alla validazione finale del progetto. In corso d'opera, il comportamento previsto in progetto potrà essere valutato misurando i parametri tenso-deformativi reali per confrontarli con quelli di calcolo e poter verificare gli scostamenti rispetto ai valori medi previsti ed eventualmente suggerire i correttivi e le tarature più opportune, al fine di rientrare nelle previsioni progettuali.

Nella presente memoria, adottando metodi di valutazione probabilistica [1], si vogliono fornire criteri, oltre che per valutare i rischi di un progetto, per individuare quali parametri geologico-geomeccanici sia opportuno precisare per far rientrare la possibile variazione in termini di tempi e di costi entro campi più accettabili dagli investitori.

Il metodo proposto può essere schematizzato in cinque fasi distinte:

a) Acquisizione dei dati geologico-geomeccanici di superficie o derivanti da prove in sito o in laboratorio per caratterizzare gli ammassi rocciosi da attraversare;

b) Suddivisione del tracciato in zone aventi caratteristiche geologico-geomeccaniche e idrogeologiche omogenee (tratte a comportamento geomeccanico omogeneo) (Gruppi 1-2-3-4-5) e localizzazione dei contatti, dei sovrascorrimenti e delle discontinuità di origine tettonica che in seguito saranno per semplicità indicate con il nome di faglie;

c) Scelta dei parametri geotecnici più significativi da attribuire a ogni singola zona per la valutazione del comportamento tenso-deformativo della galleria;

d) Attribuzione della categoria di comportamento a ogni tratta definibile omogenea e scelta delle sezioni tipo più probabili. Si definiscono inizialmente le funzioni che esprimono l'influenza dei parametri più significativi sui costi e sui tempi e si crea una tabella suddivisa secondo le tratte definite al punto b), per ciascuna delle quali vengono calcolati costo e tempo di realizzazione;

e) Rappresentazione grafica dei risultati ottenuti (somma dei tempi e dei costi necessari per realizzare le singole tratte) in uno *scattergram* tempi-costi contenente cinquecento progetti della galleria (numero più che sufficiente affinché l'analisi sia attendibile).

Tali attività possono essere ricondotte alle principali fasi del momento della progettazione previste dall'approccio ADECO- RS.

## 2. La fase conoscitiva

In questa fase sono raccolte le informazioni circa le principali caratteristiche geomeccaniche degli ammassi rocciosi raggruppati secondo criteri omogenei.

Lo studio deve essere condotto con la finalità di valutare ed elaborare tutti i dati dei rilievi e delle prove eseguite nel corso delle campagne di indagine.

Più in dettaglio, i dati saranno ottenuti attraverso le seguenti prove: rilievi geologici, rilievi geostrutturali da affioramento, rilievi geostrutturali con sonda televisiva, rilievi geologico-tecnici, stratigrafie di dettaglio, prove geomeccaniche di laboratorio, prove geomeccaniche in sito, rilievi e prove geofisiche.

Al fine di avere sufficienti informazioni sulla disposizione e sulle caratteristiche di faglie e sovrascorrimenti, fondamentali per una più precisa valutazione delle tratte omogenee, si prevede un'attenta analisi geostrutturale lungo lo sviluppo superficiale della discontinuità esaminata in relazione alla sua lunghezza e al numero di affioramenti.

Lo scopo è quello di disporre di un numero sufficiente di valori-campione dell'inclinazione delle faglie e dei sovrascorrimenti sia in pianta rispetto alla normale all'asse della galleria (o rispetto al Nord, e in tal caso si parla di immersione) sia in sezione rispetto all'asse della galleria.

In generale, un campione di dati raccolti è caratterizzato da errori dovuti al numero limitato di elementi del campione, al tipo di campionamento e alla misura delle grandezze in sito o in laboratorio.

E' possibile ricavare il numero  $n$  di elementi da rilevare in modo da avere un errore campionario nella stima della media  $\mu$  non superiore all'errore  $\varepsilon$  (Figura 1).

Supponiamo ad esempio di avere un numero di cinque elementi campionati (cinque angoli:  $x_1 = 10^\circ$ ,  $x_2 = 15^\circ$ ,  $x_3 = 20^\circ$ ,  $x_4 = 25^\circ$ ,  $x_5 = 30^\circ$ ) di cui si calcola la media ( $\mu_x = 20^\circ$ ) e la deviazione standard ( $\sigma_x = 7,90$ ).

Per poter affermare con una probabilità del 95% che la media campionaria ( $\mu_x = 20^\circ$ ) dista dalla media  $\mu$  (incognita) della popolazione per non più di uno scostamento  $\varepsilon = 1$  si calcola il numero  $n$  di elementi da campionare come segue:

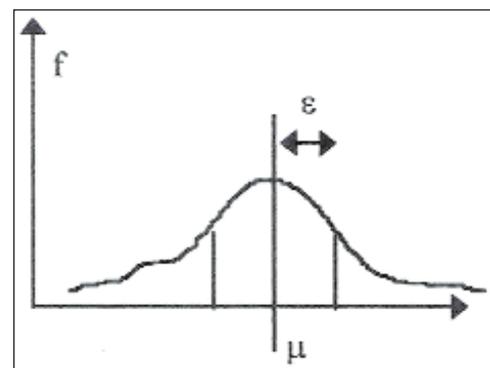


Figura 1 - La distribuzione delle medie campionarie

Per poter affermare con una probabilità del 95% che la media campionaria ( $\mu_x = 20^\circ$ ) dista dalla media  $\mu$  (incognita) della popolazione per non più di uno scostamento  $\varepsilon = 1$  si calcola il numero  $n$  di elementi da campionare come segue:

$$P\left[|\mu_x - \mu| < \varepsilon\right] \geq 1 - \frac{\sigma_x}{\varepsilon^2 n} \geq 1 \quad (1)$$

cioè, nel caso in esame:

$$P\left[|20 - \mu| < 1\right] \geq 1 - \frac{7,9}{n} \geq 0,95 \Rightarrow n = 158 \quad (2)$$

E' possibile ripetere lo stesso calcolo fissando la probabilità  $P$  e variando l'errore  $\varepsilon$  ed analogamente fissando l'errore  $\varepsilon$  e facendo variare la probabilità  $P$ . Naturalmente il numero  $n$  aumenta notevolmente se la probabilità  $P$  si avvicina al 100% ( $P = 98\%$ ;  $\varepsilon = 1$  comporta  $n = 395$ ) e si riduce se l'errore aumenta ( $P = 95\%$ ;  $\varepsilon = 2$  comporta  $n = 39,5$ ). Nel caso particolare in cui  $P = 90\%$  ed  $\varepsilon = 2$ , saranno necessari un numero  $n = 19,7$  di valori campionati.

Per il calcolo della deviazione standard, nel caso in cui la distribuzione discreta degli elementi del campione in esame sia approssimabile a una distribuzione uniforme, si ha:

$$\sigma = \sqrt{\frac{n^2 - 1}{12}} \quad (3)$$

Quando la varianza  $\sigma^2$  della popolazione non è nota e la distribuzione può ritenersi approssimativamente normale, si sostituisce ad essa la sua stima ottenuta mediante lo stimatore corretto:

$$\sigma^2 = S_n^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (X_i - \mu_x)^2 \quad (4)$$

Infine, nei casi di distribuzione discreta della popolazione diversa dalle precedenti, sono necessarie formule appropriate ricavabili in letteratura. Dalle informazioni derivate dalle indagini sopra menzionate, unitamente alle conoscenze già disponibili in letteratura sulla zona in esame, è possibile procedere alla suddivisione dell'intera galleria in zone aventi caratteristiche geologico-geomeccaniche analoghe, stabilendone una lunghezza media e individuando la posizione previ-

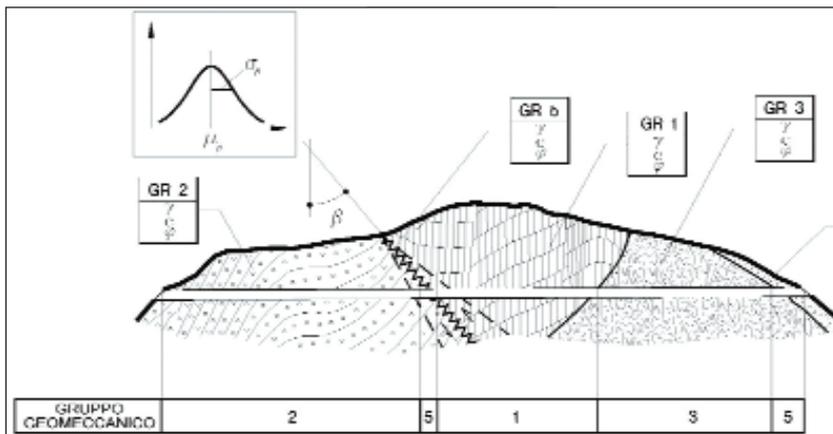


Figura 2 - La fase conoscitiva

sta delle faglie, dei sovrascorrimenti e dei contatti (Figura 2). Si sono ritenuti più significativi, ai fini dell'analisi di rischio in esame, i seguenti parametri: la disposizione delle faglie e dei sovrascorrimenti (le loro inclinazioni in pianta e in sezione), il numero dei sondaggi a chilometro e, dal punto di vista geomeccanico, il modulo di deformabilità  $E$ , la coesione  $C$ , l'angolo di attrito  $\phi$  oltre alla copertura  $H$ , al peso del terreno  $\gamma$  e al coefficiente di Poisson  $\nu$ . La variazione dell'estensione di queste zone dipende dalla diversa collocazione di faglie, sovrascorrimenti o contatti geologici, che è legata al parametro che chiameremo  $L_{faglia}$  ed è data da:

$$L_{faglia} = \text{MAX} ( 2L_{\beta}, 2L_{\alpha} ) + \text{Zona di disturbo} \quad (5)$$

dove la Zona di disturbo è quella definita dal Geologo a seguito dei rilievi superficiali e con

$$x = \frac{\frac{D}{2}}{\text{tg}(90^{\circ}-\beta)}$$

$$y = \frac{\frac{D}{2}}{\text{tg}\alpha} \quad (6)$$

indicati nelle Figure 3 e 4.

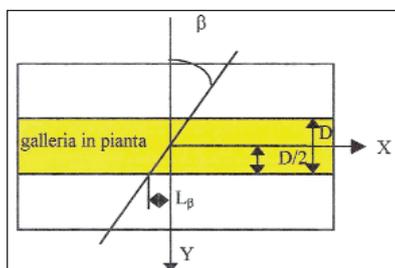


Figura 3

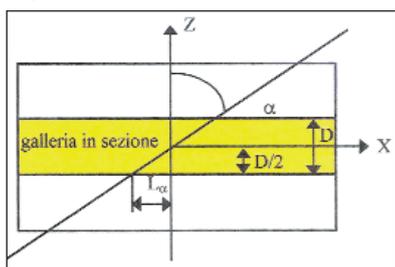


Figura 4

$$\alpha = \text{RiskNormal} ( \mu_{\alpha}; \sigma_{\alpha} ) \quad (7)$$

dove  $\sigma_{\alpha}$  è la deviazione standard relativa all'inclinazione nel piano (x,z) della faglia, del sovrascorrimento e del contatto che delimita la tratta. Il valore di  $\sigma_{\alpha}$  è definito in base ai rilievi geostrukturali eseguiti in ogni lineamento tettonico intersecante la galleria (faglie, sovrascorrimenti e contatti stratigrafici presenti lungo il profilo per ogni galleria in esame o in una sua parte). Per ogni struttura geologica in contatto stratigrafico si valuta il campo di variabilità dell'inclinazione nel piano (x, z) in modo tale da poter stabilire il valore medio di tale inclinazione e lo scostamento massimo da tale valore ( $\sigma_{\alpha}$ ).

La funzione normale RiskNormal deriva dall'utilizzo del programma @Risk ma ciò non esclude la possibilità di utilizzare altri programmi che analogamente fanno uso di funzioni probabilistiche.

L'angolo  $\beta$  si esprime con una distribuzione normale del tipo:

$$\beta = \text{RiskNormal} ( \mu_{\beta}; \sigma_{\beta} ) \quad (8)$$

dove  $\mu_{\beta}$  è l'inclinazione media e  $\sigma_{\beta}$  è un valore ragionevolmente cautelativo di deviazione standard ricavabili dal campionamento geostrukturale descritto in precedenza.

A questo punto sono fatte variare le lunghezze non nulle definite in precedenza (punto b) paragrafo 1) sottraendovi la metà delle lunghezze  $L_{faglia}$  che delimitano ogni singola tratta (a sinistra e a destra):

$$\text{Lunghezza variata} = \text{Lunghezza media} - \frac{L_{faglia \text{ sx}}}{2} - \frac{L_{faglia \text{ dx}}}{2} \quad (9)$$

### 3. La fase di diagnosi (previsioni di comportamento tenso-deformativo del nucleo-fronte)

All'interno di ogni zona geomeccanicamente omogenea si opera la suddivisione in tratte appartenenti alla medesima categoria di comportamento tenso-deformativo in base ai parametri sopra definiti.

Per prima cosa si analizzano i campionamenti dei diversi parametri geomeccanici, per una stessa zona omogenea, si associano ad essi delle distribuzioni normali e si definiscono le medie e le deviazioni standard.

A questo punto, utilizzando i valori medi dei diversi parametri, è possibile stabilire quali siano le coperture medie in corrispondenza delle quali si ha il passaggio tra le diverse categorie di comportamento tenso-deformativo del nucleo-fronte ( $H_{1media}$  tra A e B ed  $H_{2media}$  tra B e C con  $H_{2media} > H_{1media}$  in quanto al crescere della copertura aumenta lo stato tensionale e la stabilità del nucleo-fronte peggiora).

Queste due altezze medie possono essere calcolate dal Progettista mediante formule analitiche (teoria delle linee caratteristiche), oppure con un adatto codice numerico agli elementi finiti (FEM).

Note  $H_{1media}$  e  $H_{2media}$ , è possibile suddividere le zone geomeccanicamente omogenee in tratte di lunghezza media (espressa come % della lunghezza totale della corrispondente zona e indicata come % media) caratterizzate dalla medesima categoria di comportamento tenso-deformativo (categorie A, B o C) (Figura 5).

Infine, la % variata della lunghezza della sottotratta a comportamento del nucleo-fronte omogeneo risulta esprimibile attraverso la seguente funzione normale:

$$\% \text{Variata} = \text{RiskNormal} ( \% \text{media}; \sigma_{A,B,C} ) \quad (10)$$

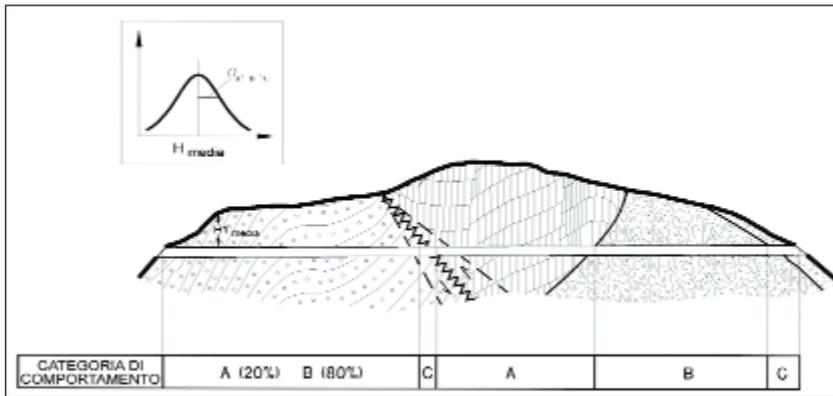


Figura 5 - La fase di diagnosi

dove % media è il valore sopra definito e  $\sigma_{A,B,C}$  è la deviazione standard dipendente dalla variabilità dei parametri geomeccanici ritenuti più significativi: E, C,  $\phi$ .

Vediamo ora il metodo attraverso il quale è stata definita tale deviazione standard. Dall'equazione

$$R_{CM} = \frac{2 \cdot C}{\text{tg}(45^\circ - \frac{\phi}{2})} \quad (11)$$

è possibile ricavare un unico parametro (la resistenza a compressione monoassiale in sito  $R_{CM}$ ) dai due parametri  $\phi$  e C di partenza.

Dal campo di variazione di E e di  $R_{CM}$  si possono ricavare le rispettive medie ( $\mu_E, \mu_R$ ) e deviazioni standard ( $\sigma_E, \sigma_R$ ).

Al fine di ottenere un'unica deviazione standard ( $\sigma_{TOT}$ ), funzione delle deviazioni standard di E e di  $R_{CM}$ , si è ipotizzata la proporzionalità diretta sotto indicata:

$$\sigma_{TOT}^2 = \sum_i W_i^2 \cdot \sigma_i^2 \quad (12)$$

dove  $\sigma_i$  sono le  $\sigma_E, \sigma_R$  e dove  $W_i$  sono i pesi attribuiti a tali deviazioni standard, che per semplicità sono stati considerati pari a uno. Infine si calcola  $\sigma_{A,B,C}$  tenendo conto della  $\sigma_{TOT}$ , di un coefficiente K e del numero di sondaggi a chilometro:

$$\sigma_{A,B,C} = \frac{K_1}{K_2} (\sigma_{TOT}) \quad (13)$$

dove:

$K_1 = n^\circ$  di parametri incerti (in tal caso E e  $R_{CM}$ );

$K_2 \leq 1$  = funzione del numero di indagini (a discrezione del Progettista).

#### 4. La fase di terapia (previsioni di intervento)

Ad ogni tratta a cui è attribuita la medesima categoria di comportamento tenso-deformativo si associano le sezioni tipo previste, individuando gli interventi di stabilizzazione del nucleo-fronte e del cavo più idonei e la loro variabilità al variare del comportamento della galleria.

Per ogni tratta si possono individuare anche più sezioni tipo con interventi che abbiano una diversa efficacia sul controllo dei fe-

nomeni deformativi del nucleo-fronte e della cavità. La loro estensione può essere espressa come percentuale della tratta considerata (Figura 6).

Occorre, infine, calcolare la percentuale variabile con distribuzione normale delle lunghezze delle sottotratte entro le quali si adotta la medesima sezione tipo.

Con riferimento al procedimento relativo al caso precedente si adotta un'analoga funzione normale:

$$\% \text{Variata sezione tipo} = \text{RiskNormal}(\% \text{ media sezione tipo}; \sigma_{\text{sezione tipo}}) \quad (14)$$

dove: % media sezione tipo dipende dalla posizione e dall'estensione della zona plasticizzata (attraverso l'analisi delle linee caratteristiche o utilizzando un'analisi agli elementi finiti) e dall'estensione del solido di carico e perciò dai diversi tipi di intervento che risultano necessari per la stabilità e la deviazione standard  $\sigma_{\text{sezione tipo}}$  risulta uguale alla  $\sigma_{A,B,C}$ .

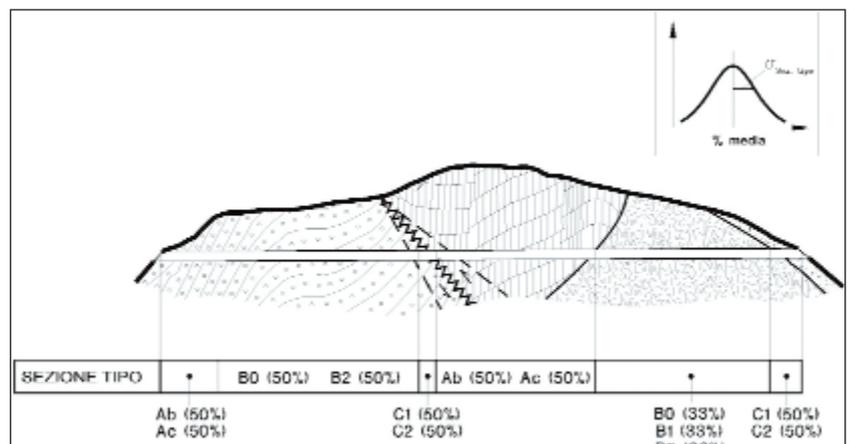


Figura 6 - Fase di terapia

#### 5. Sintesi dell'analisi svolta

La Tabella 1, nella pagina seguente, rappresenta la sintesi dell'analisi svolta. In basso a destra compaiono i risultati, ovvero il costo e il tempo necessari per realizzare tutta la galleria considerata o una sua parte. Nell'esempio considerato i fronti di scavo sono due (a partire dai due imbocchi) e i metri scavati da tali fronti sono stati contraddistinti con colorazioni diverse in quanto si è voluta evidenziare la prevista presenza di gas (righe in colore più chiaro). Questo comporta l'adozione di coefficienti riduttivi della produzione giornaliera (ad esempio 0,75 nella corrispondente colonna 11). Il discorso è del tutto analogo qualora sia prevista la presenza di acqua o altre forme di inconvenienti che comportano un rallentamento dei lavori di scavo. La tabella consta di un numero di righe variabile in funzione del numero di tratte a comportamento geomeccanico omogeneo individuate (sono considerate tratte a comportamento geomeccanico omogeneo anche le faglie e i sovrascorrimenti), in funzione del Gruppo di appartenenza di tali tratte (le tratte corrispondenti alle zone di faglia e ai sovrascorrimenti sono caratterizzate dal Gruppo 5) e delle sezioni tipo previste nelle stesse. Ad esempio, la prima tratta è caratterizzata dal Gruppo 2 ed è estesa quattro righe in quanto si ipotizza l'adozione di sezioni tipo Ab, Ac, B0 e B2. La seconda tratta della Tabella 1 è una zona di faglia ed è pertanto contraddistinta dal Gruppo 5 (il peggiore). Tale tratta occupa due righe in quanto le sezioni tipo previste in tal caso sono C1 e C2. Complessivamente le tratte sono sei e le righe sono quattordici.



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Tratta	Lung.	L.@risk	Gruppo	Categoria di comportamento	%	Sez. Tipo	%	L.S. Tipo	Costo /m
1	1778	1753	2	A	20	Ab	50	175,3	16,5
1	1778	1753	2	A	20	Ac	50	175,3	17,5
1	1778	1753	2	B	80	B0	50	701,2	18
1	1778	1753	2	B	80	B2	50	701,2	23
2	0	50	5	C	100	C1	50	25	32
2	0	50	5	C	100	C2	50	25	34
3	888	863	1	A	100	Ab	50	431,5	16,5
3	888	863	1	A	100	Ac	50	431,5	17,5
4	990	934	3	B	100	B0	33,3	311,33	18
4	990	934	3	B	100	B1	33,3	311,33	20
4	990	934	3	B	100	B2	33,3	311,33	23
5	0	56	5	C	100	C1	50	28	32
5	0	56	5	C	100	C2	50	28	34
6	0	0	5	C	0	C1	100	0	32
	L.tot 3656	L.@tot 3656							

Tabella 1

Procediamo ora con la descrizione del contenuto delle diverse colonne.

1. Suddivisione del tracciato complessivo (fase b, paragrafo 1) in tratte a comportamento geomeccanico omogeneo (Gruppi da 1 a 5 riportati nella colonna 4);
2. Lunghezza media in metri delle singole tratte della colonna 1 considerando, al momento, i contatti, i sovrascorrimenti e le faglie di lunghezza nulla localizzati in precedenza (fase b);
3. La lunghezza delle faglie, dei sovrascorrimenti e dei contatti si definisce per semplicità come  $L_{faglia}$  così come calcolato nel par. 2;
4. Gruppi 1-2-3-4-5 a comportamento geomeccanico omogeneo;
5. Comportamento tenso-deformativo del nucleo-fronte (categoria di comportamento): A (nucleo-fronte stabile), B (nucleo-fronte stabile a breve termine), C (nucleo-fronte instabile);
6. Percentuale variabile della lunghezza della tratta a comportamento omogeneo del nucleo-fronte con distribuzione normale centrata sul valore medio (% media) e con deviazione standard ( $\sigma_{A,B,C}$ ).
7. Sezioni tipo adottate (Ab, Ac, B0, B1, B2, C1, C2, C3, C4) entro le diverse sottotratte a comportamento del nucleo-fronte omogeneo;
8. Percentuale variabile con distribuzione normale delle lunghezze delle ulteriori sottotratte entro le quali si adotta la stessa sezione tipo.
9. Lunghezze in metri nelle quali si realizzano le stesse sezioni tipo;
10. Costi a metro lineare delle sezioni tipo espressi dalla funzione:

$$Costo / m = (n_1 \cdot costo medio / m) \cdot \left( \frac{n_2 \cdot costo medio / m \cdot produzione media giorn.}{produzione giorn.} \right)^{(15)}$$

dove  $n_1$  e  $n_2$  tengono conto, rispettivamente, dell'incidenza dei materiali e della manodopera sul costo della sezione tipo.

11. Avanzamento giornaliero del fronte in metri (produzione prevista in base ai dati in letteratura) espresso tramite una distribuzione uniforme che tiene conto della variabilità degli interventi nelle sezioni tipo.

Nelle celle si inserisce la funzione:

$$RiskUniform(a; b) \quad (16)$$

secondo cui esiste la stessa probabilità che si verifichino tutte le produzioni comprese nell'intervallo (a,b). La funzione è moltiplicata per

un coefficiente che tiene conto di eventuali ridotte produzioni (per esempio per presenza di acqua in pressione, gas, ecc.). Un esempio di produzioni giornaliere per le diverse sezioni tipo è riportato in Tabella 2:

12. Costi necessari per realizzare con la corrispondente sezione tipo i metri di galleria contenuti nella colonna 9;

13. Tempo necessario per scavare la lunghezza indicata nella colonna 9 adottando la corrispondente sezione tipo.

A questo punto si procede all'applicazione della procedura Monte Carlo alla distribuzione normale che meglio approssima la variabilità delle inclinazioni delle faglie, dei sovrascorrimenti e dei contatti. La stessa procedura è applicata anche alla distribuzione normale adottata per determinare la suddivisione delle tratte a comportamento geomeccanico omogeneo in sottotratte (esprese come % della lunghezza complessiva della tratta) caratterizzate dallo stesso comportamento tenso-deformativo del nucleo-fronte (categorie A, B, C). Infine, la stessa procedura è applicata alla distribuzione uniforme associata alla produzione media giornaliera.

La procedura, e quindi il calcolo del tempo e del costo complessivi per realizzare l'opera o una sua parte, è ripetuto per un numero n di volte mediante l'esecuzione di una macro come

Sezioni tipo	Intervallo (a; b) di produzioni giornaliere (m)
Ab	3,5 - 4
Ac	3 - 3,5
B0	2 - 2,5
B1	1,75 - 2,25
B2	1,5 - 2
C1	1,3 - 1,5
C2	1,2 - 1,4
C3	1,1 - 1,3
C4	1 - 1,2

Tabella 2

quella riportata di seguito:

```
' Galleria A Macro
'
Dim i As Integer
Worksheets ("foglio1"). Activate
For i = 1 To 500
    Calculate
    Range ("N15"). Select
    Selection.Copy
    Cells (i + 1, 16). Select
    Selection.Paste Special Paste: = xlValues, Operation: = xlNone,
    SkipBlanks: = _
    False, Transpose: = False
Next i
End Sub
```

Segue ora una breve dimostrazione di come il numero n di reiterazioni assunto sia tale da garantire risultati non affetti da eccessiva approssimazione. Harr (1987), occupandosi dell'applicazione della procedura Monte Carlo per ricostruire le possibili superfici di scivolamento dei pendii, supponendo che la distribuzione normale fosse nota con un margine di errore pari a  $\epsilon$ , ottenne una relazione del tipo:

$$n = \left( \frac{h_{\alpha/2}^2}{4\epsilon^2} \right)^m \quad (17)$$

dove  $\alpha$  è l'affidabilità sulla stima di  $n$  e  $h_{\alpha/2}$  è data da:

$$h_{\alpha/2} = \Psi^{-1} \left( \frac{1 - \alpha}{2} \right) \quad (18)$$

con  $\Psi$  ricavabile da tabelle associate alla distribuzione normale. Infine  $m$  è il numero di variabili prese in considerazione.

Considerando, per esempio, una sola variabile ( $m = 1$ ) con margine di errore sulla conoscenza della distribuzione normale di partenza del 5% ( $\epsilon = 0.05$ ) e con affidabilità attribuita al valore  $n$  che si otterrà pari al 95% ( $\alpha = 0.05$ ), si perviene a  $h_{\alpha/2} = 1,96$  da cui deriva  $n = 384$ .

La scelta di operare con  $n = 500$  consente dunque di procedere con sufficiente garanzia di correttezza. Il risultato dell'analisi è rappresentato da uno *scattergram* costi-tempi contenente tanti punti quante sono le reiterazioni, ciascuno dei quali rappresenta un diverso possibile progetto derivante dall'applicazione della procedura Monte Carlo (Figura 7).

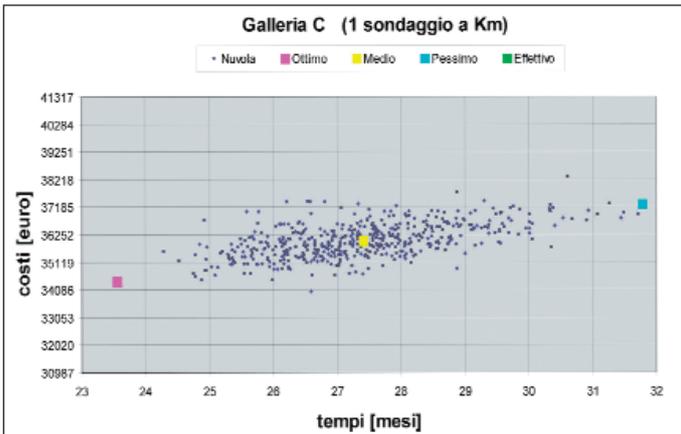


Figura 7 - Scattergram tempi/costi per la galleria C

Il progetto più probabile risulta quello meno distante dal punto medio (al centro della nuvola), che non coincide necessariamente con uno dei 500 punti rappresentati in figura.

## Conclusioni

L'analisi di rischio proposta consente di valutare, in campo probabilistico, quale tra tutti i progetti possibili sia il più probabile in termini di tempi e di costi realizzativi, sia relativamente l'opera completa sia ad una sua parte e quale sia lo scarto rispetto agli scenari più ottimistici e quelli più pessimistici. Si tengono in conto i parametri geologici e geotecnici ritenuti significativi per la progettazione di una galleria per giungere alla definizione di una nuvola costituita da un numero di punti ritenuto significativo, ciascuno dei quali rappresenta un diverso progetto della galleria in esame.

Lo scopo è quello di arrivare a un progetto che, per ogni zona di galleria geomeccanicamente omogenea, individui tratte a più probabile comportamento tenso-deformativo omogeneo entro le quali è possibile distribuire le sezioni tipologiche più probabili individuate dal Pro-

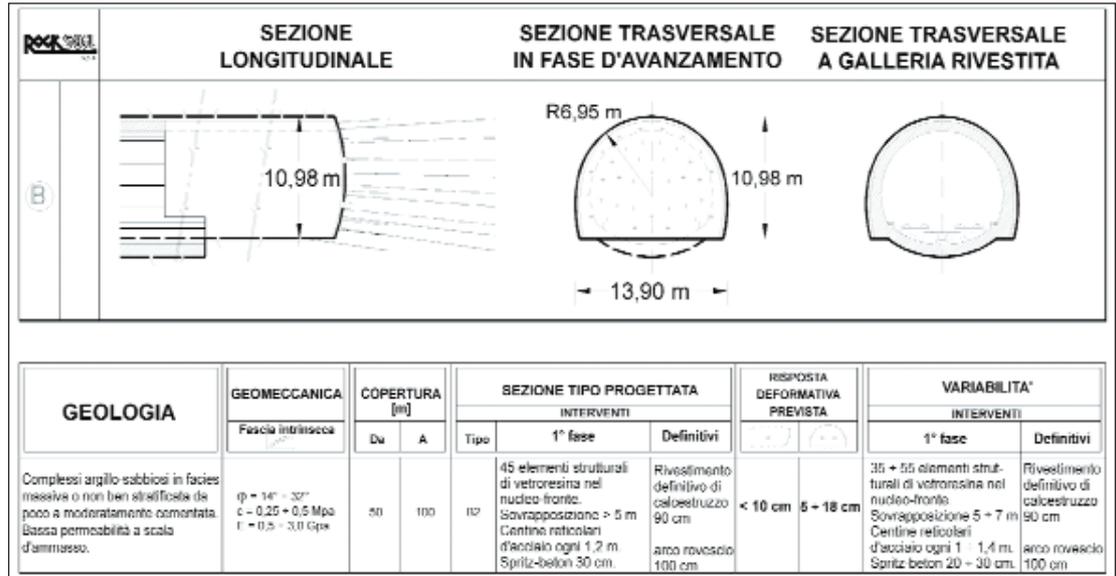


Figura 8 - La sezione tipo B2 e relativa variabilità

gettista sulla base delle condizioni geomeccaniche e di comportamento tenso-deformativo della galleria. Ciò che può variare in corso d'opera sono le caratteristiche geologiche e geomeccaniche dell'ammasso entro un campo di valori previsti. Può variare inoltre il comportamento tenso-deformativo del nucleo-fronte e del cavo al quale occorre rispondere con diversi interventi da porre in opera, sia nell'ambito di una stessa sezione tipo, sia variando la sezione tipo tra quelle possibili previste per una stessa tratta omogenea (Figura 8). La combinazione di tutti i possibili scenari, da quelli più pessimistici a quelli più ottimistici, fornisce un insieme di progetti in cui il progetto medio è anche il più probabile che si realizzi. Quindi, valutando e combinando tutti i possibili scenari che vengono individuati nelle diverse fasi di progettazione, si potranno ottenere gli scarti (in termini di tempi e costi) tra il progetto medio e quelli più ottimistico e più pessimistico. Se lo scarto è accettabile dal punto di vista degli investitori si possono ritenere accettabili le informazioni alla base del progetto stesso. Altrimenti occorre ripercorrere ogni fase della progettazione per capire quali parametri che influenzano il progetto siano da affinare per ridurre il divario tra i diversi progetti ed ottenere, quindi, variazioni più contenute.

\* Professore Ingegnere

\*\* Professore Ingegnere

## BIBLIOGRAFIA

- Lunardi P., Bindi R., Focaracci A., 1993. Technical and financial planning of underground works. The ADECO-RS method", Acts of 6th European Forum on Cost Engineering. Milan, May 13-14.
- Lunardi P., Focaracci A., 1998 "Quality Assurance in the Design and Construction of Underground Works", International Congress on "Underground Construction in Modern Infrastructure", Stockholm, 7-9 June 1998.
- Einstein H. H., 1998 The Decision Aids for Tunnelling (DAT) - Creating the Basis for Risk Assessment in Tunnelling - (Conference on Reducing Risk in Tunnel Design and Construction - Basel, Switzerland, December 1998).
- Lunardi P., Focaracci A., 1999 "The Bologna to Florence high speed railway line: Progress of underground works - World Tunnel Congress '99 - Oslo - 31 May-3 June 1999.
- Del Grosso A. Lunardi P., Focaracci A., Occhi L. Rizzitelli R., 1999 "Analisi di rischio nella progettazione delle opere in sotterraneo" Università degli Studi di Genova - Facoltà di Ingegneria - Ottobre 1999.
- Lunardi P. 2000 "The design and construction of tunnels using the approach based on the analysis of controlled deformation in rocks and soil" - T&T International ADECO-RS Approach - May 2000.