

## Analisi del Rischio Tecnico nelle opere in sotterraneo

Ing. Alessandro Focaracci

*Direttore Tecnico di Prometeo Engineering.it S.r.l. , Roma, Italia*

Ing. Federico Murrone

*Dirigente Tecnico Direzione Regionale ANAS Sicilia, Palermo, Italia*

### 1 Premessa

Da decenni l'attenzione del legislatore si è soffermata sul problema della verifica e validazione della qualità del progetto e, in particolare, sul problema del rispetto dei tempi e dei costi della realizzazione di grandi opere.

A seguito delle numerose variazioni della Legge Merloni (n°109 del 1994), il Decreto Legislativo n°163 del 2006 ha riorganizzato il quadro normativo ed ha rafforzato l'importanza della validazione del progetto da parte del Responsabile del Procedimento, inserendo anche una nuova figura che, a supporto del Rup, verifica e controlla il progetto per garantire i requisiti minimi di appaltabilità e conformità alle norme, nonché la riduzione dei rischi connessi al rispetto dei tempi e dei costi di realizzazione dell'opera.

All'interno di questo quadro normativo s'inserisce il metodo ART, un'analisi dell'opera che può essere vista come un supporto tecnico della fase di valutazione del progetto poiché rispetta pienamente alcune delle principali finalità e modalità dell'attività di verifica riportate nell'articolo 27 dell'allegato XXI al D.Lgs. n°163, il quale fa riferimento, oltre all'a coerenza e completezza del quadro economico e alla qualità dell'opera, anche alla "*minimizzazione dei rischi di introduzione di varianti e di contenzioso*" e alla "*possibilità di ultimazione dell'opera entro i termini previsti*".

*Il metodo ART, che analizza l'opera dal punto di vista contrattuale e finanziario e del controllo dei tempi e dei costi, ha lo scopo di fornire un'ottica più concreta della progettazione delle gradi opere come quelle in sotterraneo.*

Ai fini di illustrare il metodo ART e le possibili applicazioni, di seguito si presenta un caso pratico di impiego dell'ART nell'ambito del progetto di una grande opera in sotterraneo, in particolare della galleria naturale "Caltanissetta" (lungo la S.S. n° 640 "di Porto Empedocle"), in cui ANAS S.p.A. ha sentito la necessità di confrontare in termini di riduzione del rischio geologico-geotecnico, la soluzione di Progetto Esecutivo con quella di Variante.

### 2 Introduzione

Nell'ambito dei lavori di realizzazione dell'itinerario Agrigento – Caltanissetta – A19, S.S. n° 640 "di Porto Empedocle", è prevista la realizzazione della galleria naturale denominata Caltanissetta, composta da due canne lunghe 3.877,53 m (carreggiata sx) e 3.917,50 m (carreggiata dx). Il progetto esecutivo prevedeva l'esecuzione mediante scavo meccanizzato utilizzando una TBM di diametro 13,40 m. Il progetto inoltre prevedeva la realizzazione di piazzole di sosta poste ad un interasse di circa 600 m, eseguite tramite un successivo scavo di allargo in tradizionale.

Nell'ottica di ottimizzare il progetto della galleria è stata predisposta dal Contraente Generale una Variante Tecnica Migliorativa, ai sensi dell'art. 176 comma 5 del D.Lgs. 163/06, che riduce i tempi di esecuzione dell'opera e soprattutto le alee d'incertezza connesse allo scavo in sotterraneo, migliorando infine la sicurezza in fase di esercizio della galleria. La variante migliorativa prevede di utilizzare una TBM con diametro di scavo da 15,08 m, così da avere una corsia di emergenza continua e, nel contempo, eliminare i cameroni di allargo da realizzare con scavo in tradizionale per accogliere le piazzole di sosta. La variante è stata corredata da un apposito studio di analisi del rischio

tecnico ad essa connessa, che ha confrontato la soluzione di progetto esecutivo con la soluzione in variante proposta. L'ANAS ha approvato la perizia nel dicembre 2013.

Al fine di confrontare, dal punto di vista dell'opportunità realizzativa, la soluzione del tunnel da  $\phi$  13,40 m e quella con TBM da  $\phi$  15,08 m, si è adottata una metodologia già impiegata in importanti lavori in cui le opere in sotterraneo hanno un peso preponderante. In questi casi le incertezze intrinseche del modello geologico – geotecnico possono avere un notevole peso sui risultati finali in termini di tempi di realizzazione e costi di costruzione.

Nel presente articolo è illustrata la procedura del metodo “ART”, mostrando la sua applicazione dando una sintesi dei risultati delle analisi di rischio tecnico condotte sulle due ipotesi progettuali precedenti, al fine di individuare le alee di rischio in termini di tempi e costi di esecuzione che presentano le due diverse soluzioni.

Nella costruzione di opere in sotterraneo, più che in ogni altra opera d'ingegneria, è sentita la necessità di conciliare due esigenze contrapposte:

- certezza nei tempi e nei costi di realizzazione, commisurata all'impegno finanziario che l'opera comporta,
- flessibilità nella fase attuativa, a causa delle forti incertezze sulla natura del sottosuolo che insistono sull'opera.

Oggi le metodologie di scavo tradizionale a piena sezione e, soprattutto, l'impiego di scavo meccanizzato, hanno consentito di industrializzare sempre di più le operazioni di costruzione di un'opera in sotterraneo anche in presenza di ammassi eterogenei, ma rimangono sempre delle alee d'incertezze sui tempi e costi strettamente connesse alle incertezze sulle conoscenze dell'ammasso interessato dallo scavo.

La metodologia “ART” ha trovato conferma anche nelle nuove NTC 2008 per le opere in sotterraneo (par 6.7.1), in cui si afferma che il progetto deve specificare e adeguatamente giustificare “... eventuali interventi di stabilizzazione [...] da adottare sul fronte e sulle pareti di scavo che dovranno essere definiti e quantificati con riferimento alle condizioni medie di progetto previste, indicando altresì le relative variabilità”. Le variabilità degli interventi si traducono in variabilità di tempi e costi del progetto da considerare nella fase di contrattualizzazione. Tali alee di incertezze possono essere valutate attraverso l'applicazione dell'analisi di rischio tecnico del progetto che consente, in modo iterativo e sulla base delle conoscenze al momento disponibili, di poter considerare tutti i fattori di rischio che possono modificare i tempi e costi di esecuzione.

### 3 Metodologia d'analisi

La presente metodologia di analisi del rischio, attraverso l'analisi e la valutazione dei suoi principali fattori, definisce i contorni delle alee sui tempi e costi di esecuzione dell'opera in sotterraneo, fornendo uno strumento di supporto per la scelta fra più ipotesi progettuali e per individuare i parametri geologico-geomeccanici o di tipo tecnologico da precisare o approfondire per far rientrare la possibile variazione in termini di tempi e di costi entro campi accettabili, sia per la stazione appaltante che per l'esecutore.

Il metodo proposto si sviluppa nelle seguenti fasi:

- a) Acquisizione e valutazione dei dati geologico-geomeccanici derivanti dalle indagini geognostiche in sito e in laboratorio condotte, integrate da dati di letteratura, per caratterizzare gli ammassi rocciosi da attraversare e individuare tutte le situazioni non escludibili nella realtà.
- b) Individuazione e valutazione dei fattori di rischio che si possono riscontrare lungo il tracciato dell'opera e suddivisione del tracciato in zone aventi caratteristiche geologico-geomeccaniche e idrogeologiche omogenee.
- c) Analisi statistica dei singoli parametri geotecnici più significativi per ogni singola zona, con le relative variabilità definite dalle specifiche funzioni di distribuzione di probabilità.
- d) Attribuzione, ad ogni tratta omogenea, della categoria di comportamento tenso-deformativo più probabile (definito dal valore medio della distribuzione di probabilità) in funzione delle possibili variabilità delle grandezze caratteristiche; applicazione del “metodo delle curve

caratteristiche”, inserendo nei calcoli analitici i parametri geotecnici d’ingresso come delle variabili aleatorie ognuna descritta da una funzione di distribuzione di probabilità.

- e) Scelta delle sezioni tipo più probabili con la relativa variabilità: per ciascuna di queste vengono calcolati i campi dei costi e dei tempi di realizzazione;
- f) Rappresentazione grafica dei risultati (tempi e costi necessari per realizzare le singole tratte) in uno *scattergram* tempi-costi, riferito a tutti i possibili progetti ottenuti combinando le situazioni non escludibili riscontrate dalle analisi di cui ai punti precedenti.

#### **4 Analisi dei dati geologici degli ammassi interessati dall’opera in sottterraneo**

L’analisi svolta si basa sull’attenta valutazione di tutti gli elementi geologico-geotecnici desumibili dalle indagini fino ad oggi condotte, integrate da dati di letteratura. Questo ha permesso di avere un quadro dei più probabili fattori di rischio che potranno generare situazioni più o meno gravose rispetto a quelle ipotizzate in progetto.

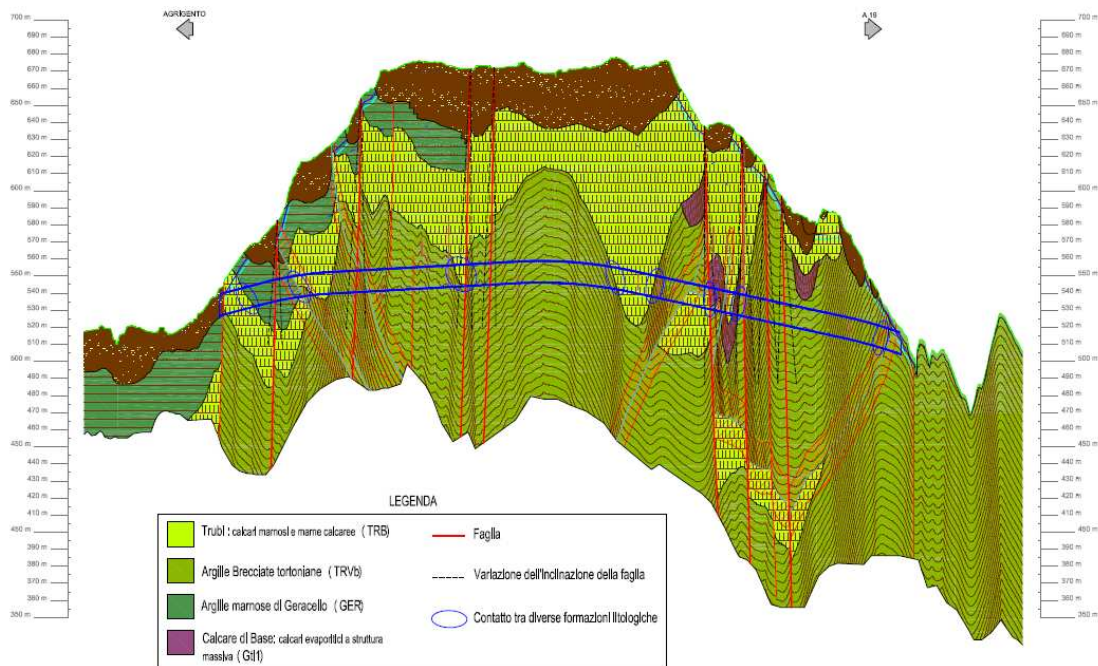
Di seguito si riporta una sintesi delle principali formazioni che interessano direttamente il tracciato della galleria, rilevate dall’analisi congiunta degli studi geologici, geotecnici, geomeccanici ed idrologici effettuati in occasione delle varie fasi progettuali. La galleria si sviluppa prevalentemente in sottterraneo e lo scavo interessa principalmente le seguenti formazioni:

- “Brecce Argillose” (TRVB, Tortoniano): accumuli sedimentari a struttura caotica, eterogeneamente costituiti da argille brecciate in una matrice siltosa, marne e trovanti litoidi di natura prevalentemente quarzarenitica.
- “Trubi” (TRB, Pliocene inferiore): costituiti da un’alternanza ritmica di biomicriti, marne e calcari ricchi in plancton calcareo. Tali litotipi presentano colore variabile dal bianco al giallo e al bruno risultando per lo più privi di frazione terrigena.
- “Argille marnose di Geracello” (GER, Pliocene inferiore): dalla tipica colorazione grigio–azzurra con intercalazioni di sottili livelli siltosi; nella parte alta della formazione si osserva un progressivo aumento della frazione sabbiosa con passaggio graduale alle sabbie gialle della formazione sovrastante.
- “Calcari di base” (GTL1, Messiniano): calcari biancastri o grigiastri in strati e banchi massicci; banconi calcarei che presentano un aspetto brecciato. La natura di questa tessitura può essere imputata a collasso da dissoluzione di minerali o d’interstrati evaporitici e/o a processi meccanici di tipo gravitativi.

#### **5 Analisi dei fattori di rischio**

A partire dai dati geologico – geomeccanici il progetto deve tener in conto i fattori di rischio tecnico presenti nella realizzazione dell’opera in sottterraneo che possono essere raggruppati nelle seguenti categorie:

- I. fattori di tipo geologico;
- II. fattori di tipo geotecnico – geomeccanico;
- III. fattori legati al controllo delle deformazioni;
- IV. fattori legati alle tecnologie utilizzate.



**Figura 1. Profilo Geologico**

## 5.1 Fattori di tipo geologico

I fattori di rischio di tipo geologico sono connessi agli aspetti litologici, morfologici, tettonico-strutturali ed idrogeologici degli ammassi attraversati. Essi sono principalmente legati alla possibile intercettazione di zone di faglia o di pieghe, quali sinclinali o anticlinali, caratterizzate da porzioni di ammasso alterato, alla presenza di stati tensionali di coazione, alla possibilità di trovare acqua in pressione, all'intercettazione di zone con basse coperture, alle specifiche caratteristiche delle zone di imbocco. Inoltre, sia nelle zone di imbocco che nelle zone con bassa copertura, si potrebbe riscontrare la presenza di acqua percolante, in condizioni meteoriche avverse, che può deteriorare ancora di più le caratteristiche dell'ammasso.

I fattori di rischio sopraelencati possono incidere, anche in maniera significativa, sul comportamento del cavo e, quindi, sugli interventi di stabilizzazione a breve e lungo termine della galleria o, nel caso di scavo meccanizzato, sulle velocità di avanzamento della TBM.

Lungo l'asse di progetto si denota, attraverso l'analisi delle indagini svolte sul campo e dalle ricerche bibliografiche, la presenza di importanti strutture tettoniche. Tali discontinuità sono caratterizzate, in corrispondenza delle zone di scorrimento, da fasce di materiale tettonizzato e deformato che indurrebbero a situazioni di peggioramento locale delle caratteristiche geotecniche e sensibile aumento della permeabilità.

Nel profilo geologico riportato in figura 1 sono rappresentate le maggiori zone tettonizzate che costituiscono le zone d'incertezza che possono influire sulla realizzazione.

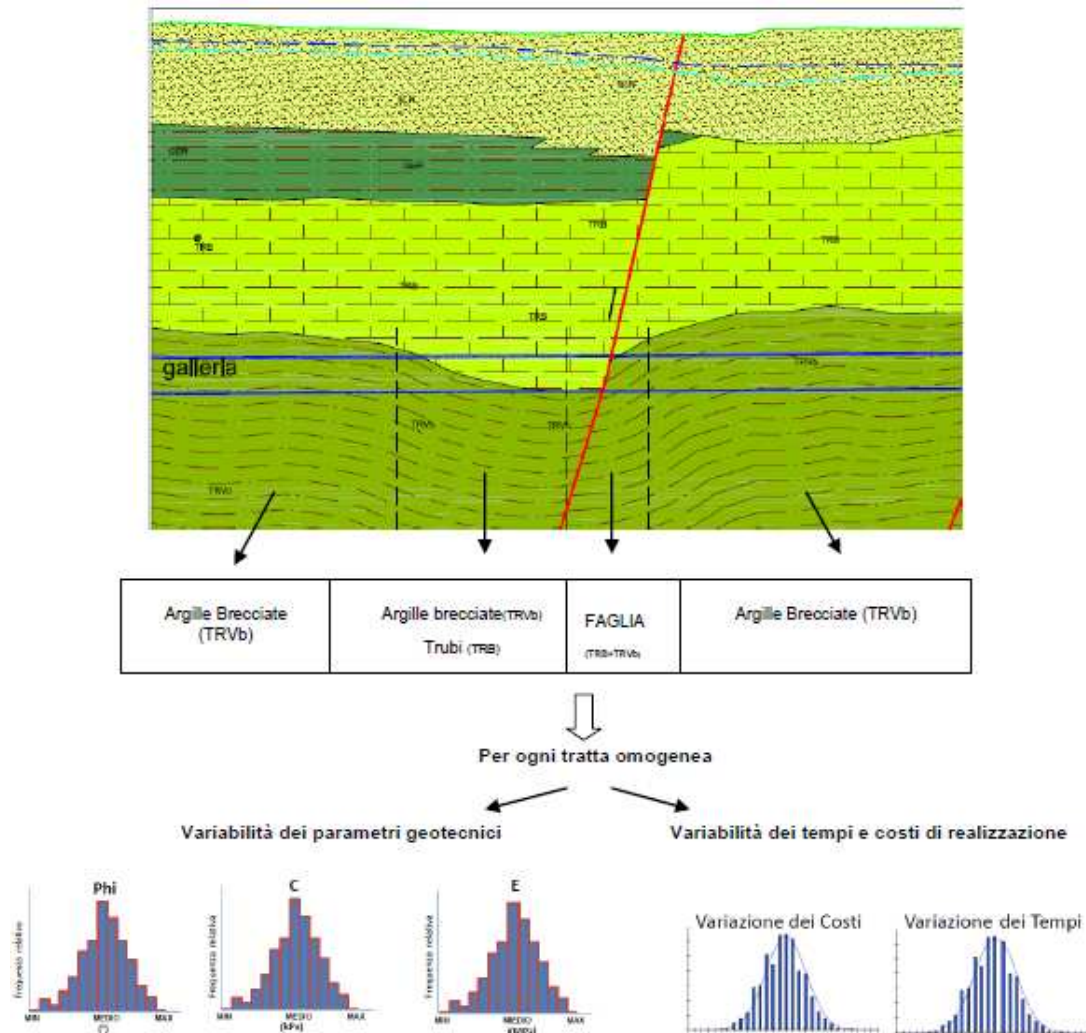
## 5.2 Fattori di tipo geotecnico – gomeccanico: variabilità dei parametri di resistenza e deformabilità

Dall'analisi dei profili gomeccanici, dalle relazioni geologiche e geotecniche di progetto esecutivo, nonché dalle analisi delle stratigrafie, sono state definite le fasce in cui il materiale attraversato dalla galleria possa avere caratteristiche di resistenza e deformabilità omogenee rispetto alle operazioni di scavo.

Sulla base dei risultati delle indagini geognostiche nonché dei dati in letteratura, sono stati definiti i range di variabilità dei principali parametri fisici e meccanici di ogni formazione interessata dallo scavo della galleria. Tale variabilità, a parità di altre condizioni, può quindi condurre a diversi scenari possibili a seconda che lo scavo avvenga in condizioni più o meno favorevoli. I valori medi ottenuti, e le relative varianze, delle caratteristiche geotecniche e gomeccaniche possono essere impiegati per analizzare

dal punto di vista probabilistico il comportamento dei materiali a seguito dello scavo, evoluzione ed entità dei fenomeni tenso-deformativi.

Perciò ogni tratta, avente caratteristiche geologiche-geomeccaniche omogenee e la stessa copertura, è caratterizzata da alcuni parametri geotecnici, ognuno dei quali è descritto da una funzione di distribuzione di probabilità (che è stata assunta conforme alla legge normale del caso, che si è dimostrata adatta al caso in esame, riguardante in sintesi la variabilità di parametri derivanti da complesse e sovrapposte operazioni di misura) per tener conto della variabilità dei valori (figura 2).



**Figura 2. Individuazione delle tratte omogenee nel profilo geologico**

In questo modo è possibile analizzare in maniera statistica la variabilità del comportamento dell'ammasso durante lo scavo, che può essere tradotta in una variabilità della velocità con cui far procedere la TBM e, di conseguenza, in una variabilità dei tempi e costi di realizzazione.

Si riportano i valori dei parametri geotecnici e delle loro variabilità definiti per ogni tratta omogenea:

**Tabella 1. Parametri geotecnici delle formazioni interessate dall'opera**

Formazione	copertura	$\gamma$	$\phi'$	$C'$	$E$	$\nu$
	m	kN/m <sup>3</sup>	°	kN/m <sup>2</sup>	MN/m <sup>2</sup>	-
TRB + TRVb	0 ÷ 10	19 ÷ 20	18 ÷ 23	5 ÷ 10	80 ÷ 130	0.3
TRB + TRVb + GER	10 ÷ 30	19 ÷ 20	18 ÷ 23	5 ÷ 10	80 ÷ 130	0.3
TRB + TRVb <u>faiglie</u>	30 ÷ 120	19 ÷ 20	18 ÷ 26	10 ÷ 40	80 ÷ 350	0.3
TRB + TRVb + GtI1	90 ÷ 100	19 ÷ 20	18 ÷ 23	0	50 ÷ 100	0.3
TRVb <u>faiglie</u>	10 ÷ 60	19 ÷ 20	18 ÷ 26	5 ÷ 30	80 ÷ 130	0.3
	60 ÷ 90	19 ÷ 20	18 ÷ 26	10 ÷ 30	80 ÷ 350	0.3

### **5.3 Fattori legati al controllo delle deformazioni**

I fattori di rischio legati al controllo delle deformazioni sono connessi soprattutto alla risposta del terreno a seguito dell'operazione di costruzione della galleria e degli interventi di stabilizzazione.

Nel quadro della presente analisi, che definisce probabilisticamente la variabilità dei parametri tecnici caratteristici di ogni tratta operativa, le deformazioni, e quindi la stabilità del fronte e del cavo, saranno tanto più prevedibili e governabili quanto più saranno ridotte le alee di incertezza sui fattori di tipo geologico, geotecnico-geomeccanico e quanto più la sezione tipo – e in questo caso la scelta della TBM – è adeguata alle caratteristiche reali dell'ammasso.

La possibilità di variare i parametri operativi della macchina sulla base dei dati di monitoraggio e della corretta gestione del progetto in fase esecutiva, ne migliorano i risultati in termini di efficacia ed efficienza.

Infine, un altro fattore importante nel controllo delle deformazioni è rappresentato dai fattori di disturbo dello stato tensionale indotto dallo scavo; per esempio due canne troppo vicine possono influenzare reciprocamente il campo di tensioni che si generano a seguito dello scavo e quindi influenzare la risposta in termini di deformazioni. Ciò è prevedibile soprattutto nelle fasi di allargamento dei cameroni, dove le operazioni di consolidamento e scavo verranno condotte in un ammasso già disturbato dal passaggio della TBM, derivandone un aumento delle alee di incertezza legate a tale tipo di lavorazione.

### **5.4 Fattori legati alle tecnologie utilizzate**

La fase di scavo turba inevitabilmente gli equilibri naturali preesistenti nell'ammasso, producendo al suo interno mutamenti di carattere tensionale, geomeccanico e idrogeologico. Dal punto di vista tensionale, il campo originario di tensioni distribuite nel volume di terreno interessato viene deviato all'esterno della cavità in avanzamento, con la conseguente formazione di zone di sovrassollecitazione in corrispondenza delle sue pareti.

Perciò uno dei fattori che più influiscono sul binomio costi/tempi realizzativi dell'opera è sicuramente la scelta della tecnologia di avanzamento, che può determinare dannosi ritardi nei tempi di consegna e costi aggiuntivi dovuti alla variabilità dei sistemi di rinforzo e miglioramento del mezzo in cui si avanza.

L'individuazione dei fattori di rischio in fase di progettazione e l'individuazione della conseguente modalità di gestione dello scavo in corso d'opera possono dare reale cognizione delle alee di rischio sia sui tempi che sui costi di esecuzione dell'opera, coerentemente con quanto previsto dalle NTC 2008 per l'applicazione del metodo osservazionale, e valutare se esse siano accettabili. In caso contrario sarà necessaria un'integrazione delle indagini geotecniche per approfondire le conoscenze dei parametri affetti da maggiore incertezza.

## **6 Descrizione delle due ipotesi progettuali analizzate**

Il progetto esecutivo della galleria Caltanissetta (figura 3) presenta una galleria a doppia canna con sezione circolare con diametro di scavo pari circa 13,40 m. Le due canne hanno interasse compreso tra 35 e 80 m e si sviluppano per una lunghezza di circa 4 km, buona parte dei quali al di sotto della città di Caltanissetta.

L'altezza di copertura per la quasi totalità del tracciato è compresa tra circa 80 e 110 m, tranne che nelle zone di imbocco dove sarà limitata ad alcune decine di metri. La sezione stradale di progetto esecutivo (PE) prevede una piattaforma larga 9,75 m, costituita da due corsie (di marcia e di sorpasso) da 3,75 m ciascuna, una banchina in sinistra da 0,50 m ed una banchina in destra della larghezza di 1,75 m.

Ogni 600 m sono previste le piazzole di sosta, da realizzare mediante l'allargamento della galleria già realizzata con la TBM previo consolidamento radiale a partire dalla sezione circolare rivestita dai conci in CLS armato.

Nella soluzione di variante approvata (figura 4) la galleria ha una piattaforma di larghezza totale pari a 11,25 m suddivisa in 2 corsie (marcia lenta e sorpasso) larghe 3,75 m, affiancate da una banchina in sinistra da 0,50 m e da una banchina in destra da 3,25 m (corsia di emergenza), continua per tutta la lunghezza della galleria.

Inoltre la variante, garantendo le condizioni di sicurezza previste dalla normativa vigente, prevede l'eliminazione delle piazzole di sosta a fronte dell'ampliamento della piattaforma stradale, come meglio specificato nella Relazione Tecnica sulla Proposta di Modifica.

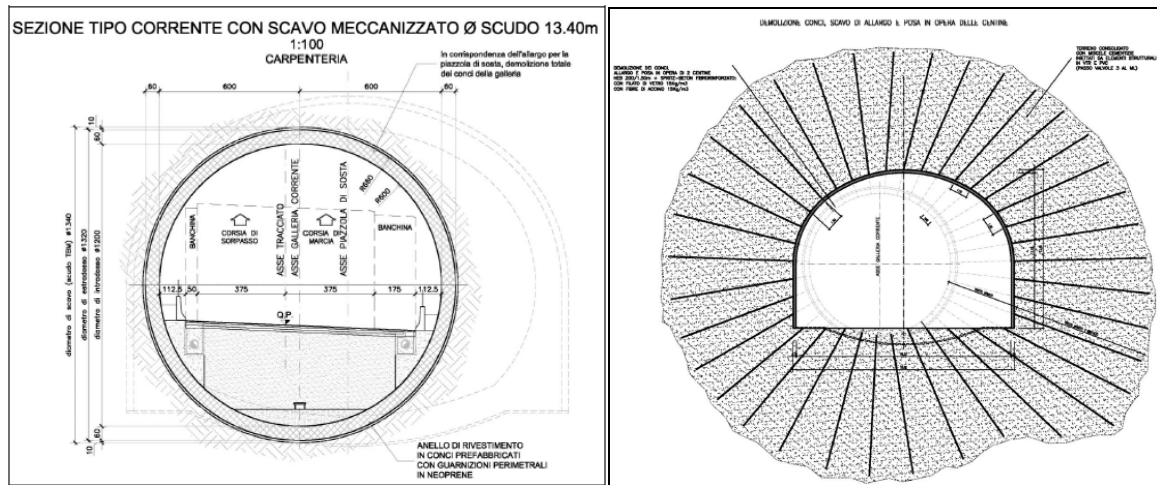


Figura 3. *sinistra*: Sezione trasversale corrente (TBM con diametro 13,4 m); *destra*: Sezione trasversale in corrispondenza del camerone (Progetto Esecutivo)

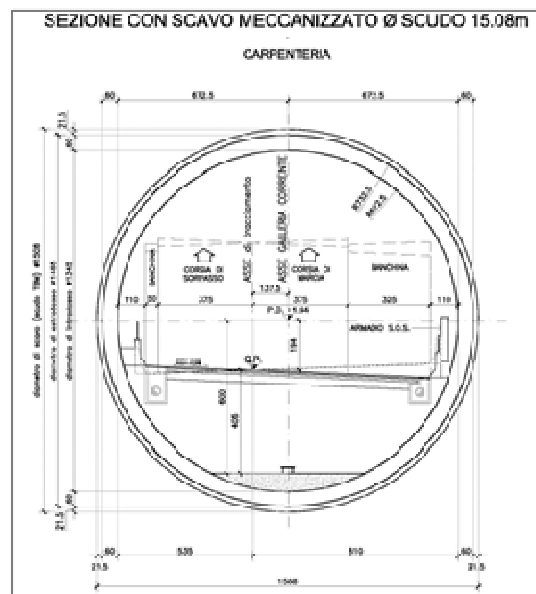


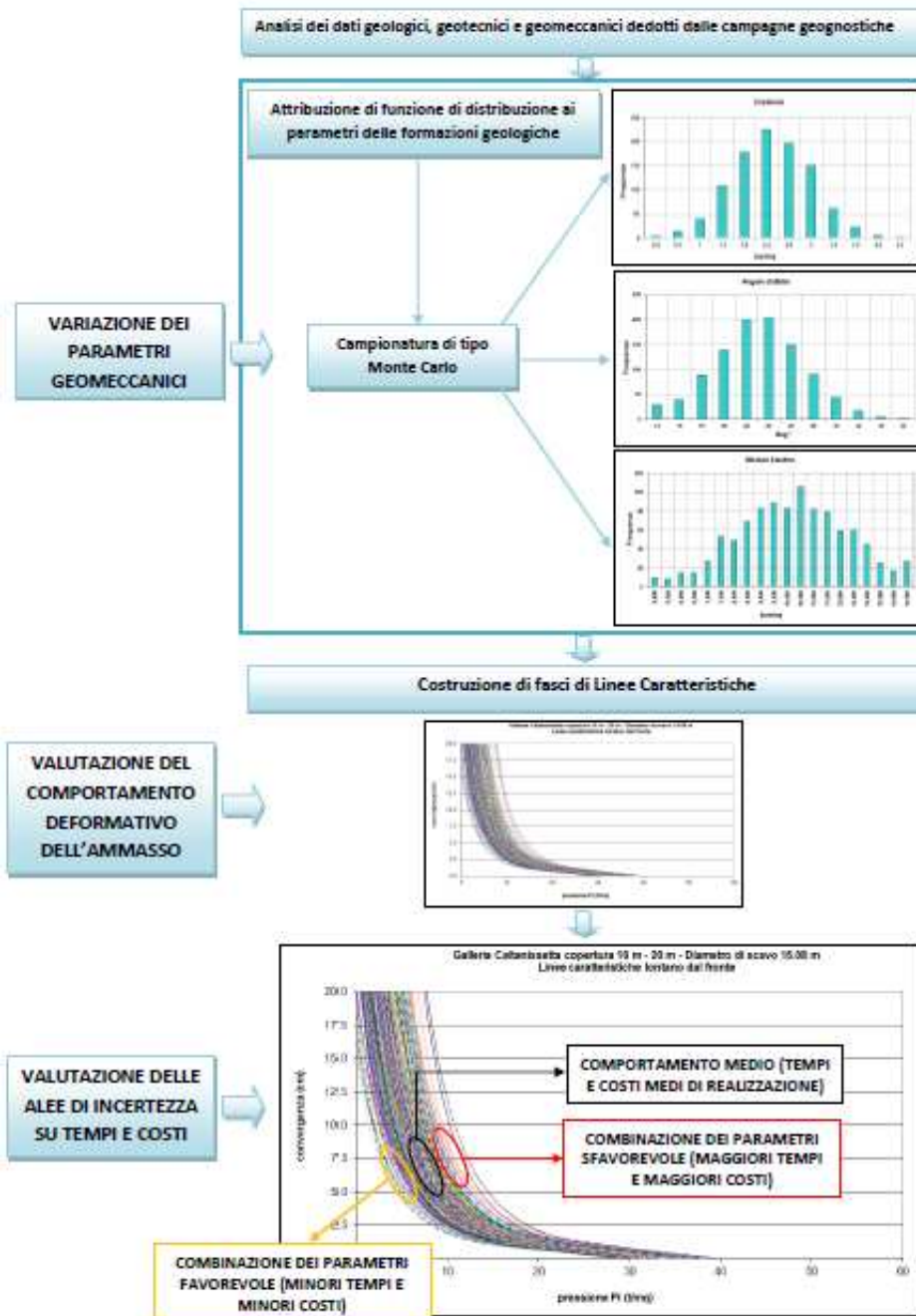
Figura 4. Sezione con scavo meccanizzato con TBM di diametro 15.08 m (Variante proposta)

## 7 Analisi del comportamento deformativo dell'ammasso nelle due ipotesi di progetto

Nel seguente paragrafo è stata analizzata la risposta deformativa dell'ammasso allo scavo per le due ipotesi di progetto in esame:

- Progetto esecutivo: scavo con TBM di diametro 13,40 m e successiva realizzazione dei cameroni di allargo con scavo tradizionale, diametro 17,40 m;
- Progetto di variante: scavo con TBM di diametro 15,08 m.

Per valutare la risposta più probabile dell'ammasso allo scavo considerando la variabilità dei parametri geomeccanici è stato ricostruito un fascio di curve caratteristiche. Tale fascio di curve, sia in prossimità del fronte che a distanza, sono state realizzate adottando la tecnica Monte Carlo e introducendo nella formulazione analitica delle curve le funzioni di probabilità che meglio approssimano le distribuzioni dei parametri degli ammassi.



**Figura 5. Schema semplificato dell'analisi**

Attraverso lo studio probabilistico è possibile individuare le combinazioni di parametri di resistenza e deformabilità che determinano le condizioni più favorevoli o sfavorevoli in termini di risposta tenso-deformativa dell'ammasso. Alle diverse risposte deformative vengono associate diverse velocità di avanzamento della fresa e i conseguenti costi.

La procedura Monte Carlo implementata permette di valutare diversi tipi di scenari, tutti possibili, che danno luogo a una distribuzione di valori di alcuni indicatori come la convergenza o la resistenza di mezzo nucleo che vengono associati a funzioni di probabilità di tempi e costi di esecuzione. Gli scenari analizzati in termini tenso-deformativi, sia per il diametro di scavo 13,40 m, sia per quello 15,08 m, sia nel caso del PE per gli allarghi delle piazzole (raggio di scavo equivalente 8,70 m), sono quelli ritenuti maggiormente significativi per lo scavo della galleria.

L'analisi delle curve caratteristiche, riportate in figura 6, evidenzia che:

- la classe di comportamento per i materiali attraversati dallo scavo nei diversi scenari ipotizzati risulta instabile;



- la differenza in termini tenso-deformativi, a parità di copertura, tra lo scavo con raggio da 6,70 m e 7,54 m è minima;
- aumentando la sezione di scavo per la realizzazione degli allarghi delle piazzole, con raggio di scavo equivalente pari a 8,70 m, si ottiene una maggiore dispersione delle curve convergenza-confinamento.

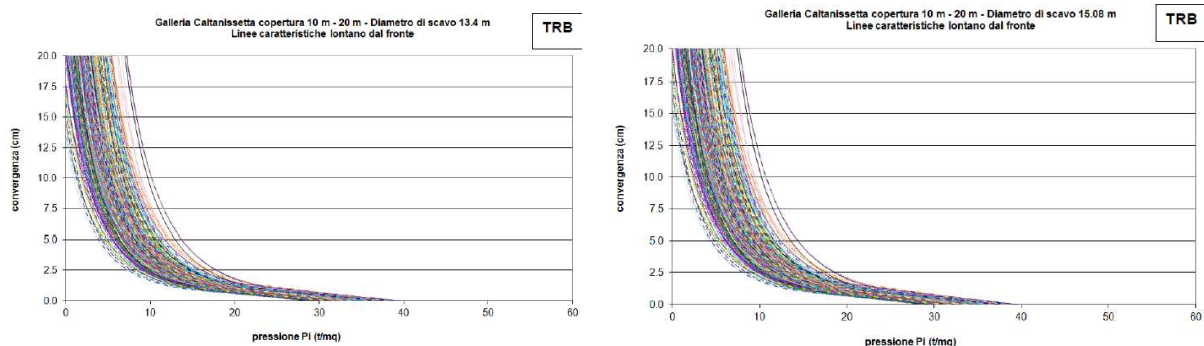


Figura 6. Confronto tra le curve caratteristiche ottenute per i due progetti

## 8 Analisi delle alee di rischio

Per entrambe le ipotesi progettuali di realizzazione della galleria Caltanissetta è stato implementato un modello di rischio facendo variare in maniera probabilistica, sulla base delle considerazioni svolte nei paragrafi precedenti, i parametri di ingresso.

In particolare, è stato condotto un approfondimento dello studio geomeccanico per individuare le variabilità della risposta deformativa dell'ammasso allo scavo, derivante dalla variabilità dei parametri geomeccanici dedotta dalle indagini geognostiche condotte. Infatti, come precedentemente detto, la variabilità dei parametri all'interno dei range dichiarati in fase di progettazione può dar luogo a diverse combinazioni degli stessi non escludibili a priori, che comportano una diversa risposta dell'ammasso allo scavo.

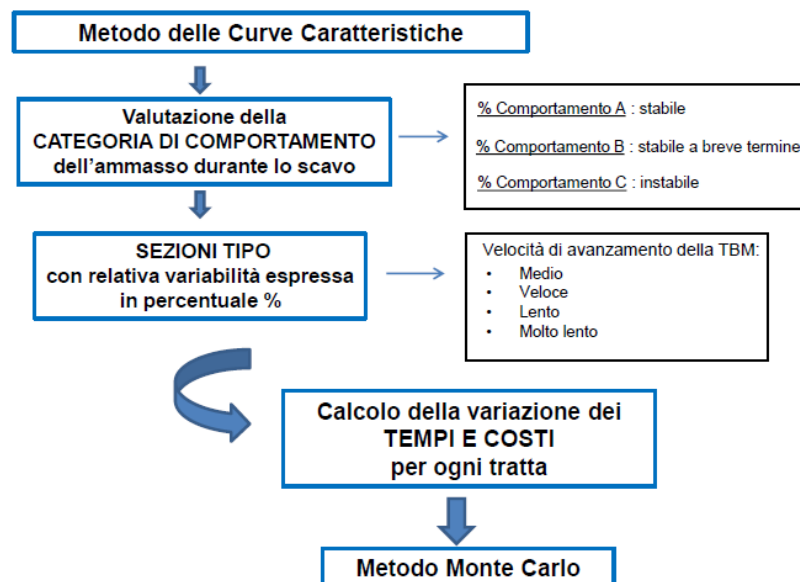


Figura 7. Schema del procedimento seguito

Nel caso di scavo meccanizzato, la TBM sarà progettata per far fronte alle diverse situazioni prevedibili in fase di progettazione, ma ovviamente la diversa risposta deformativa si traduce in una variabilità delle possibili velocità di avanzamento della TBM. Le differenti velocità di avanzamento comportano un diverso costo di avanzamento, che si traduce quindi in una variabilità dei costi e dei tempi di esecuzione della galleria.

Sulla base di tali analisi sono state determinate le variabilità sulle tratte di applicazione delle sezioni tipo di progetto nonché le variabilità sulle velocità di avanzamento previste nelle due ipotesi di

progetto. Le incertezze sopra descritte sono state inserite in un modello di rischio, già utilizzato in contesti analoghi che, attraverso il metodo Monte Carlo simulando 1000 possibili situazioni tutte a priori non escludibili, consente di valutare l'effetto delle suddette incertezze in termini di costi e tempi di esecuzione dell'opera (figura 5 e 7).

L'analisi statistica ha fornito un insieme di coppie di valori tempi / costi di esecuzione corrispondenti ad un insieme di possibili scenari alternativi a quello più probabile. I risultati delle simulazioni svolte sono stati rappresentati su dei diagrammi tempi/costi, che consentono di evidenziare il progetto medio e le due situazioni estreme: il progetto "pessimo" (quello che richiede maggiori tempi e costi) ed il progetto "ottimo" (quello che richiede minori tempi e costi).

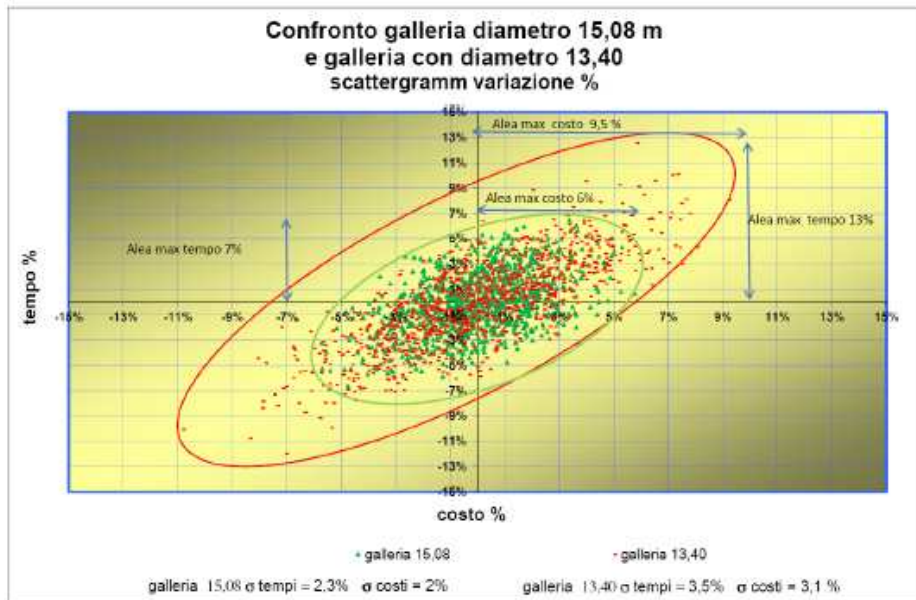


Figura 8. Confronto dei progetti in termini di variazione percentuale tempi-costi rispetto al progetto medio

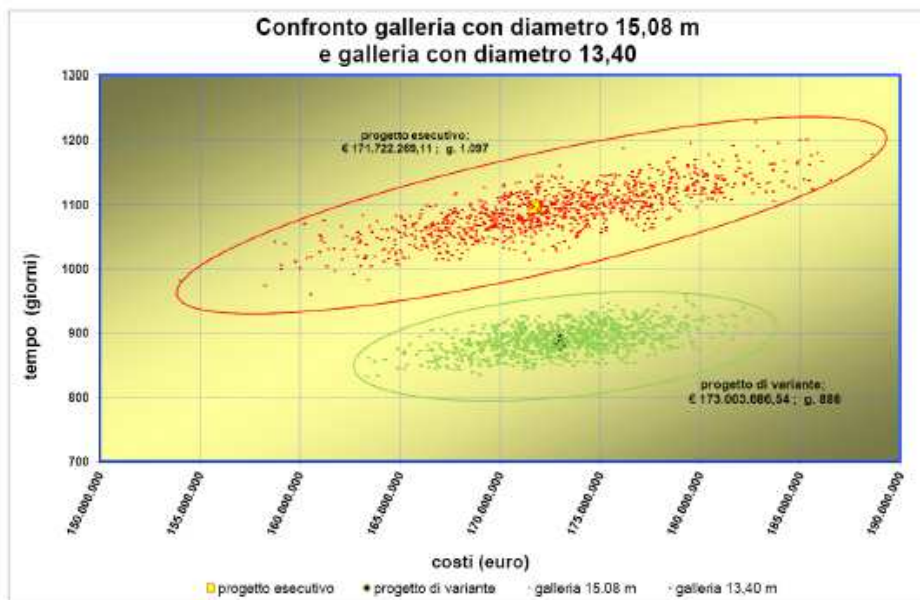


Figura 9. Confronto dei progetti in termini di variazione tempi-costi in valore assoluto

In particolare vengono rappresentate in ordinate le variazioni percentuali in termini di tempo di realizzazione ed in ascisse le variazioni percentuali in termini di costo in riferimento al progetto medio (figura 8). Per un più agevole confronto, i risultati delle due ipotesi sono stati riportati su uno scattergramm costi tempi in valore assoluto e uno scattergramm riportante le variazioni percentuali di tempi costi rispetto al progetto medio (figura 9). Il metodo inoltre consente di verificare l'effetto sulla

dimensione della nuvola della riduzione di alcuni fattori di rischio, la cui considerazione determina la non escludibilità degli scenari più lontani dal valore medio.

Dalle simulazioni effettuate si evince che:

- l'ipotesi di progetto esecutivo, che prevede una prima fase in cui vengono realizzate le due canne con scavo meccanizzato e una seconda fase in cui si realizzano gli scavi in tradizionale delle piazzole di sosta, ha una maggiore incertezza sui tempi e costi di esecuzione che può essere legata alle operazioni di consolidamento e di scavo in tradizionale, che si effettuano su un ammasso già in parte disturbato e che possono essere influenzate significativamente dalle condizioni locali dell'ammasso;
- le due soluzioni non presentano sostanziali differenze in termini di aree di incertezza per quanto riguarda lo scavo con TBM. Se si considerano le analisi svolte sul comportamento deformativo dell'ammasso con l'uso delle linee caratteristiche si vede che le differenze tra l'una e l'altra soluzione rientrano nell'ambito delle aree di incertezze connesse alla tipologia di opera.

Per concludere si evidenzia che tramite un'accurata previsione dei fattori di rischio, in fase di progettazione, si può rendere minimo il rischio residuo caratterizzante la fase di costruzione e sarà quindi possibile garantire, anche per questo tipo di opere, adeguate certezze ai capitali investiti e assicurati.

## 9 Conclusioni

L'articolo ha presentato una metodologia che scaturisce dagli indirizzi insiti nei due testi normativi di riferimento per le opere infrastrutturali:

- **D.Lgs 163/06 articolo 27 dell'allegato XXI** in cui è specificato che in fase di validazione del progetto il RUP o altri organi di vigilanza devono valurare la "minimizzazione dei rischi di introduzione di varianti e di contenzioso" e la "possibilità di ultimazione dell'opera entro i termini previsti".
- **NTC 2008** per le opere in sotterraneo, par **6.7.1**, in cui si afferma che nel progetto devono essere specificati e adeguatamente giustificati "... *eventuali interventi di stabilizzazione ... dovranno essere definiti e quantificati, ... indicando altresì le relative variabilità*". Le variabilità degli interventi si traducono in variabilità di tempi e costi del progetto di cui si deve tener conto nella fase di contrattualizzazione.
- **NTC 2008** per le opere in sotterraneo, par **6.2.4**, per opere di particolare complessità *geotecnica* "la progettazione può essere basata sul metodo osservazionale...e devono essere previste soluzioni alternative.. e definiti i relativi oneri economici..."

La metodologia di analisi di rischio tecnica (ART) illustrata, anche attraverso un esempio di applicazione ad un caso pratico, valuta gli effetti in termini di variabilità dei tempi e costi di realizzazione di un'opera in sotterraneo a causa delle incertezze connesse al grado di conoscenza ed alla complessità geologico-geotecnica del sito.

Con tale metodologia, svolta mediante un'analisi probabilistica, è stato possibile valutare e quantificare le incertezze che più incidono nella determinazione dei tempi e dei costi dell'opera (dalla variabilità dei parametri geotecnici ai diversi interventi di stabilizzazione utilizzati), ottenendo come risultato una "nuvola" di valori tempi-costi corrispondenti alle combinazioni dei possibili scenari progettuali, da quelli più sfavorevoli a quelli più favorevoli.

Con l'applicazione del metodo ART nel campo delle opere in sotterraneo risulta possibile individuare a priori le possibili combinazioni e, quindi, il progetto più gravoso e quello più economico con la relativa media. Già in fase progettuale si può decidere se i livelli di conoscenza siano adeguati o se siano necessari ulteriori approfondimenti geognostici.

Infatti, solo la prevedibilità dei fattori di rischio in fase di progettazione può rendere minimo il rischio residuo caratterizzante la fase di costruzione, rendendo possibile, anche per questo tipo di opere, garantire adeguate certezze ai capitali investiti e assicurati.

La metodologia risulta particolarmente utile per mettere a confronto soluzioni tecniche differenti sia nell'ambito di una galleria sia per diverse soluzioni di tracciato che abbiano un diverso impatto sul

contesto geologico geotecnico in cui sono inserite. Con l'ART è quindi possibile individuare la soluzione che presenta minori rischi geologico-geotecnici, valutandone l'entità e la tipologia.

In tal modo, all'analisi tecnica dell'opera si aggiunge l'analisi degli aspetti contrattuali e finanziari ad essa connessi, determinanti il buon esito complessivo dell'intervento. Tramite l'analisi ART si potrà controllare se le procedure d'esecuzione rientrino o meno nell'insieme dei progetti prevedibili, le quali possono rimanere in tutto o in parte a carico dell'impresa in funzione delle pattuizioni contrattuali assunte sulla base della consapevolezza di tale variabilità fornita dal metodo illustrato.

La necessità di adeguare il progetto in corso d'opera comporta sempre delle variazioni dei tempi e dei costi di costruzione; questa consapevolezza può servire alla stazione appaltante e all'impresa anche per svolgere considerazioni sull'impostazione contrattuale, sin dalla pubblicazione del bando di gara. Ad esempio, ad un valore medio di tempi e costi possono essere associate delle variabilità corrispondenti a tutte le prevedibili situazioni di incertezza geologica, lasciando che il ricorso all'anomalo andamento e all'imprevisto geologico sia invocato solo per situazioni effettivamente imprevedibili.

Un quadro teorico così approfondito può consentire di procedere con regole chiare, in cui i ruoli di stazione appaltante, impresa ed ente assicurativo sono definiti e coerenti con la normativa.

## 10 Bibliografia

Lunardi P., Bindi R., Focaracci A., (1993): "Technical and financial planning of underground works", Act of 6<sup>th</sup> European 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.

Focaracci A., Fiammenghi G. (2008): "Analisi del rischio tecnico; il metodo ART nelle opere in sotterraneo". Rivista "STRADE & AUTOSTRADE".

Focaracci A. (2009): "NTC 2008 per le opere in sotterraneo analisi del rischio tecnico". Convegno SIG "Adeguamenti normativi per le opere in galleria e in sotterraneo" Expo Edilizia 2009 – Fiera di Roma – 12 novembre 2009.

Focaracci A., Barbieri E. (2012): "La gestione delle controversie in cantieri di gallerie". Rivista "LE STRADE".

Codice degli Appalti – Decreto Legislativo n°163 d el 2006.

Norme Tecniche per le Costruzioni – NTC 2008.

Eurocodice 1 – Basis of design and actions on the structures.

Eurocodice 7 – Geotechnical Design.