

final published version.

This document has made accessible through PORTO, the Open Access Repository of Politecnico di Torino (<http://porto.polito.it>), in compliance with the Publisher's copyright policy as reported in the SHERPA-ROMEO website: <http://www.sherpa.ac.uk/romeo/issn/1093-9687/>

## **INDAGINI PRELIMINARI NELLA COSTRUZIONE DI GALLERIE: ANALISI DELLA LETTERATURA TECNICA**

### **PRELIMINARY INVESTIGATION FOR TUNNELLING: TECHNICAL REVIEW**

### **TRAVAUX DE RECONNAISSANCE PREALABLE DANS LA CONSTRUCTION DE TUNNELS: REVUE DE LA LITTERATURE SPECIALISEE**

**Prof. Ing. Daniele Peila**

*Dipartimento di Ingegneria del Territorio, dell'Ambiente e delle Geotecnologie - Politecnico di Torino  
CNR – Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria - Sezione di Torino*

#### **RIASSUNTO**

L'articolo illustra e discute l'importanza delle indagini preliminari nella progettazione delle gallerie tenendo conto della necessità ormai imprescindibile nella pratica progettuale moderna di sviluppare una corretta risk analysis del progetto, sulla base delle indicazioni proposte e presentate nella letteratura tecnica. Il confronto delle indicazioni fornite dalle più aggiornate linee guida internazionali e un'ampia disamina di casi applicativi permettono di mettere in luce gli aspetti chiave per la pianificazione delle indagini preliminari sia nel caso di scavo convenzionale sia meccanizzato.

#### **ABSTRACT**

The paper analyses and discusses the importance of preliminary investigations for tunnel design, as reported and discussed in technical literature, taking into account the risk management procedures. The information provided by the most recent international guidelines and an analysis of case histories allow to highlight the key factors for investigation planning both for conventional and mechanized tunnelling

#### **RESUME**

Dans cet article on soutiens l'importance des travaux de reconnaissance préalables pour le projet de tunnels comme il est discuté et rapporté dans la littérature technique spécialisée, en tenant aussi compte de procédés nommés «gestion du risque».

La comparaison des indications données par les plus récentes lignes-guides et l'analyse de «case-histories» permettent d'expliquer les aspects-clé pour parvenir au planning des travaux de reconnaissance préalables soit pour ce qu'il concerne l'excavation à l'explosif, soit pour ce qu'il concerne l'excavation mécanisée.

#### **Parole chiave**

Gallerie, indagini, prove di laboratorio, scavo meccanizzato, analisi di rischio

#### **Key words**

Tunnels, investigations, laboratory testing, mechanized excavation, risk analysis

#### **Mots-clé**

Tunnels, travaux de reconnaissance préalables, essai de laboratoires, excavation mécanisée, gestion du risque

## 1. INTRODUZIONE

La progettazione e la costruzione di una galleria richiede una complessa serie di decisioni, prese dal Committente, dal Progettista, dal Costruttore e dalla Direzione Lavori ciascuna delle quali ha una grande influenza sul risultato finale. Queste decisioni sono condizionate da molteplici fattori spesso non soggetti ad un controllo nè totale nè parziale da parte dei vari “attori” coinvolti e che possono variare nel tempo in funzione dell’evolvere delle conoscenze preliminari e dello sviluppo delle varie fasi del progetto e della costruzione. Le esperienze riportate in letteratura tecnica, consentono di trarre le seguenti considerazioni (Pelizza, 2000; Peila, 2005):

- la costruzione di gallerie si è sostanzialmente basata, più di ogni altra attività di costruzione, su criteri osservazionali: ciò perché nelle costruzioni in sotterraneo non vi è nessun altro fattore così decisivo come il cambiamento delle condizioni del terreno. I metodi osservazionali, che per loro natura sono soggetti all’esperienza, consentono certamente di adattare il progetto alle condizioni geologico-tecniche che si incontrano, sgravando, quindi, in parte il progettista da molte responsabilità; per contro tale adattabilità, di per se stessa, va a scapito della garanzia di previsione dei tempi e dei costi di costruzione, facendo nascere difficoltà, talora gravi, per il Committente in merito alla previsioni di spesa e di ricavo e quindi in merito al reperimento delle risorse finanziarie ed allo sviluppo di analisi costi-benefici;
- i continui miglioramenti nell’affidabilità della tecnologia di indagine e di elaborazione delle informazioni “geo” preliminari rendono fattibile l’acquisizione corretta di dati consistenti ed affidabili. Per altro, la conoscenza preventiva, completa e deterministica del profilo geologico-geotecnico e dei correlati dati geomeccanici, resta un’illusione nella maggioranza dei casi e, in particolare, nelle gallerie lunghe e profonde;
- la costruzione delle gallerie deve essere oggetto di una progettazione tecnica e strutturale. Conseguentemente, poiché, i fenomeni di instabilità delle gallerie sono anche determinati dalle operazioni di scavo (meccanizzato o tradizionale), di rinforzo e di sostegno e dalla sequenza realizzativa, il progetto deve necessariamente valutare l’influenza del metodo di costruzione che deve essere scelto sulla base dall’ottimizzazione tra le varie alternative;
- lo scavo meccanizzato integrale è in grande sviluppo nel mondo e il settore sta sviluppando macchine sempre più grandi e potenti, sempre più facili da installare, smontare e trasportare, in grado di operare in condizioni di “mixed face” o duali (in grado cioè di scavare la galleria in condizioni di geologia variabile in varie tratte) e verso macchine in grado di applicare pressioni al fronte sempre più elevate (Pelizza, 2004). Lo scavo meccanizzato richiede però investigazioni, indagini e studi specifici che devono essere accuratamente calibrati stante la maggior “rigidezza” del sistema macchina-galleria rispetto allo scavo convenzionale;
- la realtà della costruzione delle gallerie è sempre stata tutt’altro che deterministica a causa di:
  - incertezze di tipo geologico, idrogeologico e geotecnico/geomeccanico;
  - incertezze nell’attuazione delle tecniche costruttive previste in progetto ed impossibilità di messa in opera dei sostegni secondo lo schema teorico considerato in progetto (anche con i più sofisticati modelli numerici);
  - incertezze nella scelta delle tecnologie di scavo e costruzione più adatte in relazione ai vincoli esterni (fisici, ambientali, sociali);
  - incertezze sul grado di affidabilità di macchine ed attrezzature anche in relazione alla loro disponibilità (macchine nuove o macchine usate);
  - incertezze relative al comportamento della manodopera e del tempo di apprendimento delle maestranze dell’uso della tecnologia specifica;
  - incertezze relative alla gestione operativa del cantiere e delle maestranze;
  - incertezze determinate dai vincoli territoriali ed ambientali e delle procedure amministrative ad essi connessi;
  - incertezze sulla capacità tecniche dell’impresa appaltante.

In sostanza nel passaggio dal progetto alla costruzione permangono (e permarranno) sempre rischi

di varia natura ed entità, i quali devono essere valutati preventivamente in modo che il Progettista possa limitare le probabilità del rischio di verificarsi, il Committente possa munirsi dei finanziamenti adeguati o possa richiedere, se del caso, un approfondimento delle indagini nonché predisporre documenti contrattuali che consentano la gestione e la ripartizione dei rischi tra i vari attori, infine il Costruttore possa compiere una scelta tecnologica appropriata e fare un'offerta ragionata in sede di gara.

Il progettista dunque deve trovare la migliore alternativa tra varie opzioni costruttive, le quali hanno differenti implicazioni in termini di rischi tecnici, operativi ed economici. Il progetto deve perciò essere sviluppato secondo la *“filosofia del dubbio”* (Pelizza, 1997a, 2000) in quanto nella gran maggioranza dei casi esiste sempre più di un sistema di costruzione che può essere adottato e quindi deve essere possibile confrontarli criticamente.

Da quanto detto risulta evidente la grande importanza sia delle indagini preliminari, le quali devono essere in grado di fornire i dati necessari, sia di una corretta risk analysis basata sulla comprensione dei rischi geo-ingegneristici – e non solo - che potranno essere incontrati e sull'individuazione delle misure atte a prevenirli o a fronteggiarli, come chiaramente espresso da Gugliemetti et al. (2007) *“Formal Risk Management has become an important tool in many technical fields and being more widely accepted by the tunnel and underground industry. It is now becoming more common for underground projects to systematically and continually conduct formal risk management evaluations at all design stages of planning, design, construction and operation of underground projects”*. Conseguentemente la quantificazione del rischio, nel passato demandato unicamente *“all’esperienza”* del Progettista e del Costruttore, deve essere valutato quantitativamente utilizzando gli strumenti di analisi statistica disponibili e non più solo in modo qualitativo, approccio quest'ultimo esplicitamente criticato fin dal 1997 nel *“Geotechnical Baseline Reports for Underground Construction. Guidelines and Practices”* redatto dal Technical Committee on Geotechnical Reports of the Underground Technology Research Council (USA): *“Occasionally, when explaining the basis for design, practitioners described the uncertainties, involved, and appropriately used “fuzzy” terms appropriate for their discussion but vague when considered as a baseline. This vagueness in turn led to disputes”* ed ancora *“Improvements are needed to overcome the following shortcomings in contractual interpretative reports:*

- *baselines may not adequately describe the condition to be expected;*
- *baseline statements are often indefinite, too broad, ambiguous or qualitative, resulting in disputes over what was indicated in the contract;*
- *baselines may present conditions that are more adverse than indicated by data, or be just plain arbitrary and unrealistic, without discussion or explanations for such apparent discrepancies;*
- *the effect of means and methods of construction on ground behaviour are not well described”*.

## **2. SCOPI E GESTIONE DELLE INDAGINI “GEO” PREVENTIVE NELLA COSTRUZIONE DELLA GALLERIE**

Ponendo l'attenzione sul problema delle investigazioni preventive, le ragioni di incertezza precedentemente descritte obbligano il progettista a costruire un'immagine del sottosuolo che è *“virtuale”*. Stante il fatto che su quest'immagine saranno basati i risultati del progetto, gli studi e le indagini preliminari vanno sviluppati per avvicinare il più possibile l'immagine virtuale alla realtà e per precisare quali sono gli eventuali motivi di scostamento (Pelizza, 2000). Gli obiettivi principali che devono essere quindi conseguiti con il corretto sviluppo delle indagini preliminari sono (Parker, 1996; 1999):

- sviluppare un sufficiente livello di comprensione della geologia regionale e della idrogeologia per quel che riguarda sia la fase progettuale sia la fase costruttiva;
- definire le proprietà fisiche e meccaniche dei terreni e delle rocce ed il comportamento della falda, in rapporto allo scavo ad un approfondimento adeguato alle varie fasi progettuali;
- contribuire alla definizione della fattibilità del progetto nonché evidenziare le possibili

- condizioni “geo” particolari, che si possono incontrare durante lo scavo (Comin, 2002);
- fornire i dati necessari per il confronto tra le varie alternative di scavo e di sostegno;
- minimizzare le incertezze dei valori delle caratteristiche dei terreni o delle rocce;
- fornire i dati necessari per la previsione del comportamento del cavo e del fronte in seguito alle operazioni di scavo e di sostegno;
- stabilire una base geologica e geotecnica definitiva per l'appalto, in modo che, se saranno incontrate condizioni “geo” inaspettate, sia possibile gestirle amministrativamente in modo corretto ed equo per tutti gli attori coinvolti nella costruzione;
- migliorare le condizioni di sicurezza del cantiere e delle maestranze in sede costruttiva (Patrucco e Sorlini, 2003; Lamont, 2006);
- fornire esperienze di scavo mediante gallerie esplorative e sperimentali (se i fondi del progetto lo permettono o lo giustificano);
- fornire i dati necessari per la preparazione delle stime di costo, produttività e tempi, in sede decisionale da parte del Committente.

Pertanto le indagini preliminari hanno grande rilevanza per il Progettista e sono assolutamente fondamentali per il Committente e per il Costruttore nella definizione e nella gestione dei contratti, per la scelta delle tecnologie nonché per l'esecuzione dei lavori in condizioni di sicurezza, nel rispetto dei tempi e dei costi contrattuali. Esse devono cioè essere uno strumento in grado di minimizzare le incertezze e consentire lo sviluppo di un progetto più non semplicemente basato su un approccio deterministico, ma necessariamente fondato sull'uso di tecniche statistiche anche nello sviluppo dei calcoli strutturali (Oreste e Peila, 1995; Kalamaras, 1996; Peila et al., 1997; Russo et al., 1999; Diamantidis, 2001; Oreste, 2001; 2006; Hoek et al., 2008) come è anche previsto negli Eurocodici (Frank et al., 2004; Vrouwenvelder, 2008; Ellingwood, 2008).

Conseguentemente è possibile concludere che:

- è sempre interesse del Committente realizzare una campagna di indagini completa ed esaustiva, ed includere i dati ricavati nei documenti di contrattuali di appalto in modo preciso e non in forma sintetica;
- è interesse del Committente definire, già nell'ambito dei documenti contrattuali, una precisa suddivisione dei rischi spettanti alle parti in causa. L'assunzione di responsabilità nel caso di variazioni delle condizioni geologiche previste permette una risoluzione rapida di controversie evitando l'insorgenza di arbitrati o cause legali;
- i dati geologici e geotecnici inseriti nei documenti contrattuali devono essere affidabili, precisi e non riportati in forma sintetica;
- la campagna di indagini “geo” deve essere sviluppata con mezzi ed in tempi adeguati, permettendo anche la registrazione completa dei parametri variabili nel tempo e tarata adeguatamente in relazione se lo scavo è meccanizzato o convenzionale (Pelizza e Peila, 1993; Progetto Nazionale Normativa Opere in Sottterraneo, 1997; BTS, 2004b; Carrieri, 2000);

l'uso del foro pilota o di gallerie esplorative deve essere valutata con attenzione in rapporto ai benefici possibili ed ai tempi e costi esecutivi. Non si deve comunque dimenticare che il cunicolo pilota (scavato nella maggioranza dei casi con una TBM) è una galleria che richiede essa stessa di essere progettata con indagini adeguate (Lunardi, 1986).

## **2.1 Indicazioni sull'entità e sullo sviluppo delle indagini preliminari**

Le variazioni delle condizioni del sottosuolo, rispetto a quanto previsto in sede progettuale, sono una delle maggiori cause di incremento (e di variazione in corso d'opera) dei costi e dei tempi di costruzione di gallerie (Carter, 1982). Nel passato sono stati perciò sviluppati numerosi tentativi empirici per definire i valori ottimali di spesa delle indagini preliminari rapportati al costo complessivo dell'opera (Pelizza ed al., 1997b) (Tabella I). L'uso di tecniche statistiche di analisi ha consentito di superare queste semplificazioni, anche se i valori percentuali indicati restano comunque un valido punto di riferimento. Tra le ricerche volte a quantificare l'entità ottimale delle indagini preliminari riveste particolare importanza lo studio sviluppato dal USNC/TT (1984) che ha

verificato i rapporti tra le indagini e l'insorgenza di contenziosi tra il Committente e il Costruttore, analizzando la documentazione progettuale tecnica, amministrativa e legale di numerosi progetti di gallerie scavate negli USA, ed ha evidenziato che la variazione delle condizioni geologiche riscontrate durante la realizzazione, rispetto a quelle preventivate, costituiva l'elemento più spesso invocato nell'insorgere di contenziosi e che la differenza tra i costi costruttivi e quelli previsti in progetto era la minore quando la lunghezza lineare dei sondaggi per metro di galleria era maggiore di 0.6 e i fondi spesi per le indagini superava il 3% del costo di costruzione preventivato.

### 3. RISK MANAGEMENT NELLA COSTRUZIONE DI GALLERIE

La progettazione di opere in sotterraneo e gallerie ha tradizionalmente seguito un approccio deterministico mentre, nella realtà, sia la fase di progetto sia la fase di costruzione hanno sempre presentato un certo margine di incertezza, che non potrà mai essere completamente evitato per la presenza di (Pelizza, 2000; Lombardi, 2001; Hoek, 1998, 2001, 2008; Yoo, 2006):

- un rischio geologico, legato all'adeguatezza delle informazioni ottenute attraverso le indagini, alla capacità di riconoscere il comportamento del mezzo e di prevederne le singolarità;
- un rischio progettuale, legato alle difficoltà del progetto di adattarsi alle condizioni geomeccaniche realmente incontrate, a difetti di costruibilità, all'esperienza del progettista ed a vincoli contrattuali;
- un rischio costruttivo, legato alla scelta di tecniche costruttive non adatte, all'occorrenza di instabilità, all'esperienza dell'impresa ed a vincoli contrattuali;
- un rischio operativo legato a difetti di funzionalità delle attrezzature, a cattiva organizzazione del cantiere, alla manutenzione, ad incidenti, a problemi ambientali e a conflitti con parti terze (Della Valle, 2002);
- un rischio finanziario legato a fattori sociali e politici, alla non chiara assunzione di responsabilità tra i vari attori, ai contenziosi sulla sicurezza delle maestranze (ITA, 2001; Dix e Smith, 2006).

In linea generale la conoscenza del mezzo geologico può essere insufficiente per i seguenti fattori (Pelizza e Grasso, 1998): difficoltà e complessità geologica; profondità della galleria; limiti imposti ai fondi destinati all'indagine; piano di indagini definito in modo aprioristico rispetto al metodo di scavo; indagini eseguite in un'unica fase anziché in fasi successive e quindi poter concentrare le investigazioni nelle zone critiche e indagini molto limitate in fase di costruzione, specialmente quando implicano un'interruzione dell'avanzamento. Pertanto, anche le indagini devono essere pianificate sulla base di una efficace conoscenza e gestione dei rischi. Negli anni '80 l'incertezza geologica, veniva gestita attraverso l'uso deterministico delle classificazioni tecniche degli ammassi rocciosi e, durante la costruzione, veniva attivato l'aggiornamento sistematico dei profili geologici e il metodo osservazionale diventava così un processo di progettazione, basato: sul controllo della costruzione attraverso un attento monitoraggio di parametri chiave definiti a priori come per esempio gli spostamenti del cavo; sull'attivazione di contromisure predefinite e sull'eventuale revisione della soluzione progettuale (CIRIA, 1997; Barla, 2009).

Negli anni '90 si è invece cominciato ad introdurre i concetti di incertezza, probabilità e valutazione del rischio geologico (Duddeck, 1987; ITA/AITES, 1988) con l'uso sistematico del "risk management" (Kovari, 2002, ITA/AITES 2004, Heijboer et al., 2004; Guglielmetti et al., 2007). Il risk management diviene così una componente integrata del progetto ed influisce sulla pianificazione e sullo sviluppo delle indagini preventive, come ottimamente sintetizzato da MuirWood (2000) *"Once the fundamental information is obtained to permit particular forms of construction to be considered, question of uncertainty and how these may be effectively reduced, must dominate the strategy for further site investigation, the criterion being that the cost of additional s.i. must more than compensate the value of the expected reduction in cost of construction, which of course will include the cost of uncertainty"*.

Grazie a questi strumenti è possibile valutare la vulnerabilità del progetto nei confronti di eventi indesiderati (eventi che possono avere delle conseguenze negative o produrre un danno) e quindi

attivare una adeguata “politica” di gestione del rischio predefinendo le responsabilità per la gestione e la mitigazione dei rischi residui cioè “rischi che sono stati ritenuti ammissibili secondo chiari concetti di valutazione e perciò sono stati accettati” (Kovari, 2002).

La consapevolezza che né il progetto né la costruzione di una galleria sono esenti da rischi è anche testimoniata dal fatto che tutte le più recenti linee guida sulla progettazione delle gallerie sottolineano l'importanza della “risk analysis” o ne richiedono l'applicazione:

- “*Linee guida per la progettazione, l'appalto e la costruzione di opere in sotterraneo*” (Progetto Nazionale Normativa Opere in Sotterraneo, 1997) che descrivono quale deve essere lo sviluppo organico delle indagini preliminari geologiche e geotecniche e ribadiscono l'importanza della valutazione probabilistica dei tempi e dei costi di costruzione: “*Attraverso adeguati programmi di calcolo, sviluppare l'elaborazione probabilistica dei parametri progettuali al fine di fornire una previsione dettagliata, in termini di tempi e costi, delle fasi realizzative dell'opera ed inquadrare tale previsione nel ventaglio delle possibilità legate all'incertezza dei parametri di progetto*”;
- *Norme SIA 198 e SIA 199* sviluppate dalla Société Suisse des Ingénieurs et des Architectes (1993) che precisano i contenuti dei rapporti geologici, in particolare la norma SIA 199 elenca le condizioni di rischio che devono essere considerate mentre la norma SIA 198 indica quale deve essere la ripartizione contrattuale dei rischi;
- “*Geotechnical Baseline Reports for Underground Construction. Guidelines and Practices*” redatto dal Technical Committee of Geotechnical Reports of the Underground Technology Research Council (USA) e sponsorizzato dall'ASCE e dall'American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers (1997) che, oltre a descrivere i contenuti del “*Geotechnical Baseline Report*”, ribadisce che “*Underground projects, including any construction involving subsurface excavation, presents many risks, all of which must be assumed by either the owner or the contractor. The greatest risks are associated with the materials encountered and their behaviour during excavation and installation of supports. Definition and allocation of these risks is the focus of the GBR*”;
- “*Guidelines for tunnelling risk management. Final Report*” (2004) sviluppato dall'ITA/AITES che fornisce una linea guida per la preparazione del “*risk assessment*” nonché identifica e classifica le principali tipologie di rischio;
- “*Report on a review of recent tunnel failures associated with closed face tunnelling machines*” sviluppato dalla British Tunnelling Society (BTS, 2003a) che analizza due collassi occorsi nel corso dello scavo con EPB nel UK indicando i fattori potenziali di rischio che si consiglia di prendere in considerazione nello scavo con EPB;
- “*Quality in Tunnelling. Final Report*” (2004) sviluppato dall'ITA/AITES che ribadisce l'importanza di una corretta risk analysis anche per la gestione della qualità nelle gallerie. In particolare si afferma che “*The expected geological/ground conditions should be clearly described in the contract. If the encountered conditions during construction are different, the contract should describe the procedure for the verification of changed conditions and who will, then, undertake the responsibility*”;
- “*Long tunnels at great depth. Final report*” (2003) sviluppato dall'ITA/AITES che, con specifico riferimento alle gallerie lunghe e profonde, sottolinea l'importanza delle analisi costi-benefici e delle analisi di rischio per il progetto delle indagini preliminari;
- “*Recommendation du GT 32: Risques géotechniques*” sviluppato dall'AFTES (2004b) che hanno l'obiettivo di limitare le situazioni conflittuali dovute alla gestione del rischio: “*il est de l'intérêt de tous dans le domaine des travaux souterrains delimitier les situations conflictuelles liées à la gestion contractuelle des aléas géotechniques rencontrés en cours de travaux*”. Nel rapporto viene presentata una lista delle condizioni di rischio correlate alle caratteristiche geotecniche, in rapporto ai metodi di scavo delle gallerie.
- “*Tunnelling lining design guide*” redatto dalla “*British Tunnelling Society*” and “*The Institution of Civil Engineering*”(BTS, 2004b) che fornisce un' analisi per lo svolgimento delle indagini

preliminari ed evidenza che “*the role of site and ground investigation in the minimization and management of risk and the use of resultant information in correct tender documentation*”;

- “*A code of practice for risk management of tunnel works*” sviluppato dalla The International Insurance Group, (2006) che ha l’obiettivo di “*promote and secure best practice for the minimization and management of risks associated with the design and construction of tunnels, caverns, shafts and associated underground structures including the renovation of existing underground structures*”.

In conclusione si può quindi affermare che il rischio nella costruzione delle gallerie deve essere gestito e controllato mediante adeguate analisi preliminari e che i danni conseguenti all’evento indesiderato devono essere contrattualmente condivisi tra i vari attori o trasferiti da un attore all’altro, ma non possono essere assolutamente trascurati perché solo se: “*se un certo rischio è stato determinato correttamente (conoscenze tecniche) e classificato quale rischio residuo secondo criteri legittimi, allora nel caso in cui il danno dovesse manifestarsi non ci saranno state mancanze da parte dei responsabili*” (Kovari, 2002).

### **3.1 Risk management ed indagini preliminari**

La base di partenza per lo sviluppo delle indagini preliminari è il concetto che “*if you do not know what you are looking for in a site investigation, you are not likely to find much of value*” (Glossop, 1968). Il progetto delle indagini preliminari deve quindi essere sviluppato a partire dalla conoscenza delle condizioni di rischio che dovranno essere affrontate e quindi cosa si deve investigare con maggiore attenzione (Soldo, 1998) e tenere conto dell’influenza di tali condizioni sulle tecniche di scavo che si prevede saranno adottate (Tabella II)

Questo processo progettuale non può prescindere da una gestione dei rischi mediante approcci di calcolo che possono essere sia qualitativi sia quantitativi (ITA; 2001; Yoo, 2006). Molto efficaci qualora si voglia analizzare le connessioni causali che portano ad un evento negativo è l’utilizzo dell’albero degli eventi (figura 1) mentre per confrontare differenti opzioni, in condizioni di incertezza, è possibile ricorrere a alberi decisionali (figura 2).

L’innovazione maggiore in questo settore, è comunque stata introdotta con l’utilizzo sistematico delle tecniche di analisi statistica (ITA WG2, 2004; Innaurato et al., 2004, Grasso et al., 2001; Betaz et al., 2001; Lunardi e Focaracci, 2001; Kalamaras et al., 2000; Russo et al., 2000; Dudt J., 1999, Innaurato e Peila, 1996), le quali consentono di ottenere diagrammi dei tempi e dei costi di costruzione in funzione del livello delle informazioni preliminari evidenziando in modo chiaro i miglioramenti che possono essere ottenuti con il loro approfondimento. Tra gli approcci statistici più utilizzati possiamo ricordare il DAT “*Decision Aids for Tunnelling*” (Einstein et al. 1992, Einstein, 1996; Grasso et al., 2001; Guglielmetti et al., 2007) che consente di analizzare statisticamente sia le incertezze geologiche e geotecniche sia i metodi di costruzione (figure 3, 4 e 5)

### **3.2 Aspetti particolari delle gallerie lunghe e profonde**

Se per le gallerie corte o medie (qualche km) sotto coperture non elevate (da qualche decina di metri a qualche centinaio di metri) i mezzi di investigazione classici (sondaggi, pozzi, indagini geofisiche, rilievo geologico di superficie) abbinati ad adeguate analisi di rischio permettono di soddisfare le esigenze progettuali in termini soddisfacenti non è così nel caso delle gallerie lunghe e/o profonde.

Le estrapolazioni a grande profondità delle condizioni geologiche osservate in superficie portano necessariamente a basarsi su ipotesi geologiche o geomeccaniche che possono dimostrarsi errate. Queste opere sono inoltre usualmente localizzate al di sotto di aree montane e quindi in presenza di infrastrutture di superficie limitate e con una ridotta conoscenza geologica, geotecnica ed idrogeologica degli ammassi rocciosi.

Più profonda è la galleria più grandi sono le incertezze geologiche, più alte sono le probabilità di incontrare condizioni “ostili” allo scavo o “impreviste” e più alti sono i costi per l’esecuzione delle indagini. Al riguardo, il WG 17 dell’ITA/AITES (2003) identifica le seguenti condizioni “ostili”: presenza di un alto stato tensionale naturale; possibile grande deformazione plastica degli ammassi;

possibile rischio di colpi di tensione in rocce molto resistenti; possibili fenomeni di swelling o creep delle rocce argillose; presenza di un'alta pressione dell'acqua e/o di grandi venute d'acqua in galleria; presenza di faglie, spesso associate a rocce con bassa resistenza meccanica e presenza di alta pressione d'acqua (Anagnostou e Kovari, 2005; Ramoni e Anagnostou, 2007); presenza di alte temperature; possibili spostamenti di faglie attive per effetto di eventi sismici; presenza di fasce rocciose tettonizzate e fratturate con caratteristiche geomeccaniche scadenti e comportamento anisotropo che possono richiedere pre-trattamenti in avanzamento; possibili impatti di tipo ambientale sulle acque sotterranee e sui grandi acquiferi e sottolinea la fondamentale importanza dei sondaggi e delle esplorazioni in avanzamento suggerendo, anche, di utilizzare metodi di analisi multicriteria per il “decision making”.

Le indagini preliminari che vengono indicate come rilevanti in questo documento sono: analisi delle fotografie aeree e delle immagini satellitari; sviluppo della cartografia dell'area a scala adeguata; sviluppo di mappe geologiche, geomorfologiche, geologico-strutturali, idrogeologiche e dei rischi naturali lungo il corridoio previsto per la realizzazione della galleria; perforazione di sondaggi, indagini in sito ed il laboratorio sulle rocce ed indagini geofisiche; sviluppo di un modello tridimensionale del sottosuolo; a cui, in sede di progettazione esecutiva, si devono aggiungere indagini specifiche alla quota della galleria con gallerie esplorative, perforazioni a grande profondità e perforazioni deviate.

A titolo di esempio si possono citare:

- le campagne geognostiche sviluppate tra il 1990 ed il 2000 per il progetto Torino-Lione (Gallarà, 2002) comprendente i sondaggi relativi alle gallerie di base e di Bussoleno, che ammontano ad oltre 64km;

- il caso della faglia de “La Umbria” che doveva essere attraversata dalla galleria di Guadarrama (Spagna) dove per l'impossibilità di realizzare, per motivi ambientali, un pozzo di accesso e una galleria dal quale consolidare la zona di faglia, gli studi preliminari (costituiti da studi geologici di superficie e di geologia strutturale per una larghezza di 3km attorno al tracciato; da una tomografia elettrica dalla superficie, da prove cross-hole e tomografie sismiche da cinque sondaggi verticali con profondità di 200-280m e da un sondaggio deviato con prelievo di campioni geologici e geotecnici e da prove geofisiche nei fori di sondaggio) sono stati particolarmente approfonditi e prolungati nel tempo ed hanno interessato una lunghezza di oltre 900m di tracciato. In questo caso durante gli scavi si è utilizzato un sistema sismico di investigazione in avanzamento rispetto alla TBM ed il cantiere era preparato alla realizzazione, se necessario, di una galleria di by-pass per eventuali consolidamenti (Mendaña, 2004)

- le investigazioni nella zona della Piora per la realizzazione della galleria di base del traforo del Gottardo dove per lo studio approfondito di questa zona ritenuta critica in vista della costruzione del traforo di base (Dubt, 1997), negli anni dal 1993 al 1998 sono stati realizzati un cunicolo di sondaggio lungo circa 5.5km situato a 350m sopra il livello della futura galleria con termine a circa 50m dall'inizio della sacca della Piora circa 900m di cunicoli di esplorazione in prossimità della sacca e 7 perforazioni sub-orizzontali od inclinate, con lunghezze comprese tra 200m e 1070m (Kovari e Descoeurdes, 2001; Fabbri, 2005);

- le investigazioni per la progettazione del traforo di base del Brennero dove inizialmente le indagini geologiche e geomeccaniche avevano previsto l'esecuzione di investigazioni sismiche e gravimetriche, l'esecuzione di 9 sondaggi profondi e oltre 540km<sup>2</sup> di rilevamento geologico di superficie mentre nella seconda fase finalizzata all'interpretazione dei risultati sotto il punto di vista dell'ottimizzazione del tracciato e della sua valutazione dal punto di vista geologico-ingegneristico sono stati eseguiti oltre 200 sondaggi di cui 30 spinti a grande profondità fino a 1351m con prove geofisiche lungo l'intero sondaggio e specifiche prove in foro nonché con il prelievo di campioni e l'esecuzione di prove di laboratorio (Skuk et al., 2009) a cui è seguita l'esecuzione di un cunicolo pilota esplorativo scavato con TBM (Skuk, 2009)

### 3.2.1 Perforazioni profonde e perforazioni deviate

Nel caso di gallerie profonde è evidente che le perforazioni di sondaggio devono essere di particolare lunghezza e quindi, queste perforazioni (verticali o inclinate) possono essere realizzate utilizzando tecniche di tipo petrolifero o minerario e permettono la determinazione delle caratteristiche mineralogiche delle rocce grazie all'analisi dei detriti di perforazione nonché consentono l'esecuzione di specifiche indagini nel foro.

Le perforazioni deviate sono invece realizzate mediante tecniche di tipo petrolifero che consentono di deviare la direzione del sondaggio, di renderlo circa orizzontale, in modo tale da sondare in asse alla futura galleria (Gallarà, 2002; Pliego, 2002; AFTES, 2004a). Un sondaggio di questo tipo è caratterizzato da un tratto rettilineo verticale o inclinato usualmente realizzato con una perforazione a distruzione ed un successivo tratto sub-orizzontale con recupero di carota (AFTES, 2004a).

Sfruttando le perforazioni di sondaggio profonde è possibile determinare numerose grandezze fisiche legate alle caratteristiche geologiche e geomeccaniche dei terreni attraversati anche grazie a indagini di tipo geofisico (AFTES, 2004a; Cravero et al., 2000; Sambuelli et al. 2004) come sintetizzato in Tabella III.

A titolo di esempio si citano le indagini geognostiche e geofisiche sviluppate per gli studi di fattibilità del traforo del Brennero (Comin, 2002) che hanno previsto nove sondaggi fino alla quota della futura galleria e l'esecuzione di prove in foro nei punti più significativi dal punto di vista geologico: misure della falda acquifera, della conduttività, radioattività e della presenza di gas; rilievo con sonda televisiva; misurazione delle variazioni del diametro del foro; misure di gamma ray naturale; log sonici; gamma-gamma log; log di temperatura; log di conduttività; log dei parametri idrochimici; log strutturale con sonda televisiva acustica; prove idrauliche (Lugeon test, ecc.) e prelievi di campioni di acque e relative analisi.

Particolarmente importanti sono le misure dello stato tensionale in sito (quindi da eseguirsi in perforazioni di sondaggio) le quali possono essere suddivise in metodi di rilascio e metodi di ripristino (Rossi, 1994). Recentemente un notevole impulso è stato dato al miglioramento delle tecniche di ripristino con lo sviluppo del metodo di fatturazione idraulica su fratture preesistenti (AFTES, 2004a; Valentino, 2005). Questo metodo, denominato HTPF, ha il vantaggio di essere svincolato dall'ipotesi che la direzione del foro coincida con una delle direzioni principali del tensore degli sforzi agente, pertanto consente la valutazione lo stato di sollecitazione qualunque sia l'orientazione del foro nel quale si eseguono le prove, perché il metodo non prevede l'induzione di fratture di neoformazione ma è basato sulla valutazione delle pressioni di riapertura di fratture già esistenti. Eseguendo la misura su discontinuità naturali diversamente orientate è possibile effettuare una stima dello stato di sollecitazione tridimensionale nel massiccio. Altre innovazioni nel settore delle misure dello stato tensionale sono legate il sovracarotaggio di celle deformometriche triassiali incollate fondo foro secondo una geometria tridimensionale (Gulli, 2005).

### 3. INDAGINI NEL CASO DI SCAVO CON TBM

Nel caso di uso di TBM da roccia per lo scavo di gallerie a grande profondità ed in particolare per lo scavo di gallerie esplorative in condizioni "geo" di grande incertezza, oltre alle indagini preliminari già discusse, rivestono grande importanza le investigazioni in avanzamento (Pelizza, 2005). Infatti se consolidamenti correttamente dimensionati (Pelizza e Peila, 1993; Oreste e Peila, 2000; Pelizza, 2005; Vielmo, 2005) permettono alle TBM di avanzare anche in condizioni limite (Grandori, 1996b; Grandori e Romualdi, 2004; Concilia, 2008) occorre però conoscere preventivamente la situazione che deve essere affrontata e la TBM deve essere predisposta per realizzare sia l'esplorazione in avanzamento sia gli interventi di consolidamento.

Conseguentemente la galleria deve essere preventivamente studiata e progettata avendo ben chiaro fin dall'inizio oltre alle caratteristiche degli ammassi le caratteristiche della TBM che la dovrà costruire.

Le "situazioni limite" (cioè "situazioni geologiche in cui la TBM stessa non può lavorare con le

*modalità esecutive per le quali è stata progettata o costruita ed il suo avanzamento per questo è fortemente rallentato od impedito*” secondo la definizione formulata da Grandori, 1996a) che più comunemente si incontrano nello scavo con TBM sono (Grandori, 1996a; Pelizza, 1998; Barla e Pelizza, 2000; Pelizza e Peila, 2001; Maidl, 2008; Ramoni e Anagnostou, 2007): limite di fresabilità; instabilità delle pareti dello scavo e/o forti convergenze; instabilità del fronte di scavo; attraversamento di faglie o fasce milonitizzate; forti venute d’acqua; fasce di rocce a bassa resistenza; presenza di terreni coesivi; presenza di gas; presenza di acque e rocce ad alta temperatura e cavità carsiche. Per evitare che queste diventino “trappole per TBM” è cioè necessario che si esplori il terreno in avanzamento. Queste operazioni rallentano la produzione è quindi necessario trovare il bilanciamento ottimale, mediante lo svolgimento di una analisi dei rischi, tra il costo dell’esplorazione (che è costituito essenzialmente da mancata produzione), il rischio di intrappolamento della macchina ed i conseguenti tempi e costi per liberarla o riportarla a livelli di produzione ottimale. Questo bilanciamento è condizionato, oltre che dalla geologia da altri fattori importanti che sono:

- Le attrezzature sulla macchina per l’esplorazione cioè devono essere installate perforatrici adeguate in termini di produttività e caratteristiche tecniche;
- la capacità di esplorare con sondaggi senza fermare la produzione, il che può essere realizzato con:
  - o l’installazione di supporti per le perforatrici svincolate dal corpo macchina,
  - o l’esecuzione delle perforazioni nei tempi di fermata programmati, per esempio per le manutenzioni. La lunghezza dei fori in questo caso deve comunque ricoprire il tratto che la TBM perforerà fino alla fermata successiva più un adeguato margine (anche in questo caso il concetto di rischio deve guidare la scelta) (Foster, 1997);
  - o l’esecuzione di lunghi sondaggi da nicchie laterali rispetto alla galleria;
  - o limitazione dei sondaggi ai soli tratti maggiormente critici che quindi devono essere localizzati a priori (accettando il rischio di incontrare un’anomalia);
- uso di metodi geofisici i quali però devono essere in grado di fornire indicazioni utili in tempo utile cioè devono dare risposte in tempi compatibili con la velocità di avanzamento della TBM.

I sondaggi in avanzamento, che possono essere realizzati sia con perforazione a distruzione del nucleo e con registrazione continua dei parametri di perforazione sia a carotaggio continuo, sono stati eseguiti in molte gallerie tra cui :

- la galleria del progetto SMART (Malesia) dove sono stati usati per fronteggiare il rischio di carsismi, che erano stati anche ricercati con indagini geofisiche superficiali. In questo caso, in corrispondenza dell’arco rovescio veniva realizzato sistematicamente un sondaggio a distruzione di 40m di lunghezza. La macchina era attrezzata per l’esecuzione di consolidamenti in avanzamento (Klados e Kok, 2004);
- la galleria di Hsuehshan (Taiwan) dove sono stati utilizzati, in modo sistematico, sondaggi a distruzione in avanzamento diretti verso l’alto divergenti di 6° (Wen-Lon Cheng, 2004);
- la Galleria della Manica (Demorieux, 1997) dove sono stati utilizzati sondaggi in avanzamento sia in asse alla galleria che fuori asse. In questo caso però, a causa dei lunghi tempi di esecuzione, dovuti anche alla possibilità di incontrare di acqua in pressione e quindi all’esigenza di utilizzare attrezzature munite di preventer, i sondaggi sono stati abbandonati;
- la galleria dell’EOLE a Parigi dove i sondaggi a distruzione con registrazione continua dei parametri di perforazione venivano realizzati nelle fermate programmate della macchina attraverso speciali porte localizzate sia nello scudo, per sondaggi divergenti, che sulla testa, per sondaggi assiali) (Leca, 2000).

I metodi di indagine geofisica in avanzamento rispetto al fronte di scavo di una TBM possono essere suddivisi in elettrici/elettromagnetici, sismici e sonici (tabella IV) (Galera, 1997; Galera e Pescador, 2005; Sambuelli e Godio, 2002; Sambuelli et al. 2004).

Il metodo Bore-Tunnelling Electrical Ahead Monitoring (BEAM) è basato sulla polarizzazione

indotta nel terreno utilizzando la testa della TBM come induttore e consente di ricavare lo stato di fatturazione dell'ammasso roccioso (Galera e Pescador, 2005). Questo metodo è stato usato per l'investigazione in avanzamento nel cunicolo di emergenza Ginori affiancato alla galleria Vaglia nella tratta ad alta Velocità tra Bologna e Firenze (Marcheselli e Ludde, 2002)

I metodi sismici, tra cui i più recenti sono il TSP 203 (Tunnel Seismic Prediction) ed il TRT (Tunnel Reflection Tomography), consentono di individuare la variazione dello stato di fatturazione dell'ammasso roccioso, faglie o altre irregolarità dell'ammasso roccioso. Questi metodi hanno però il difetto di richiedere per l'esecuzione delle misure l'interruzione delle operazioni di scavo per un tempo di 1-1.5 ore per il TSP 203 e 20' per il TRT. Entrambi richiedono inoltre un tempo di elaborazione dei dati non trascurabile in rapporto alle velocità di avanzamento della macchina, conseguentemente, le informazioni che vengono ottenute con questi metodi anche se precise ed affidabili possono non essere tecnicamente compatibili con lo scavo. Il metodo TSP è stato utilizzato per le investigazioni della Zona della Piora nel Tunnel di base del Gottardo. I metodi sonici sono essenzialmente applicati nel metodo SSP, che investiga il cambio di densità del mezzo con onde soniche generate da emettitori localizzati sulla testa di abbattimento. Questo sistema non intralcia le operazioni di scavo (Galera, 1997) ed è stato applicato nella galleria sotto il fiume Elba ad Amburgo.

#### **4. INDAGINI PER LA SCELTA E LA GESTIONE DI UN METODO DI SCAVO MECCANIZZATO IN AREA URBANA**

Lo scavo di gallerie a piccola profondità in terreni sciolti e sotto il livello di falda, è oggi universalmente realizzato mediante scudi chiusi. L'uso di scudi a contropressione ha lo scopo essenziale da un lato di impedire flussi d'acqua verso la galleria e dall'altro di controllare e contenere i cedimenti della superficie del suolo e di limitare i rischi di instabilità del fronte. Il controllo del fronte consente, in generale sia di evitare specifici interventi di abbassamento della falda sia eseguire di iniezioni di consolidamento del terreno, o di congelamento (che sono limitati al presidio di preesistenze sensibili).

I criteri di scelta dello scudo meccanizzato più adatto per costruire una determinata galleria sono molteplici e possono essere talvolta in contrasto tra di loro, la Tabella V riporta sinteticamente i fattori importanti o critici (anche se certamente non esaustivi) che devono essere considerati per l'uso delle varie macchine mentre la Tabella VI illustra campi di applicabilità delle diverse tipologie di scavo meccanizzato in funzione del tipo di terreno (ITA/AITES, 2000).

Sulla base di quanto detto i principali parametri che devono essere investigati per la progettazione di uno scavo meccanizzato in terreno sono:

- la coesione del terreno stesso e la composizione granulometrica del terreno, sua variabilità lungo il tracciato e nell'ambito della sezione di scavo;
- la presenza di eventuali situazioni di fronte misto;
- i comportamenti particolari del terreno come per esempio la collosità delle argille o l'abrasività;
- la possibile presenza di blocchi o di ammassi rocciosi franosi;
- la copertura e la pressione idrostatica dell'acqua sotterranea;
- le caratteristiche chimiche delle acque sotterranee;
- l'utilizzabilità o la possibilità di messa in discarica del marino,
- i vincoli sulla superficie del suolo e le caratteristiche degli edifici ivi presenti;
- le strutture sotterranee e gli oggetti estranei che possono interferire con lo scavo.

Gli strumenti ed i metodi che devono essere utilizzati per queste indagini sono, nella gran maggioranza dei casi, già disponibili nella tecnica (Carrieri, 2000) ma la loro gestione deve, ancora una volta, avvenire solo preceduta da una completa analisi di rischio (Pelizza, 2000; Kovari, 2002; BTS, 2004a; Guglielmetti et al., 2007).

Senza entrare nel dettaglio dell'evoluzione delle varie macchine, nel seguito verranno brevemente descritte le modalità di funzionamento e come debbano essere investigate i parametri geo che maggiormente interferiscono con il loro funzionamento.

Gli Slurry Shield e gli Hydrosshield sono stati originariamente progettati per lo scavo in terreni acquiferi non coesivi. Nel tempo queste macchine hanno avuto crescenti migliorie, che le rendono applicabili a terreni con inclusioni come trovanti o addirittura sono in grado per passare fasce di roccia competente grazie all'introduzione di un frantumatore in camera di scavo e di utensili di abbattimento costituiti dai picchi e dagli utensili a disco sia nei grandi diametri ma in particolare nel settore del microtunnelling. Il mezzo di sostegno del fronte è una sospensione a bassa viscosità formato da acqua e bentonite che può formare una membrana quasi impermeabile ("*filtercake*") sul fronte. L'efficienza del sostegno del fronte esercitato dal fango bentonitico dipende essenzialmente dalla profondità della filtrazione della sospensione all'interno del terreno (Anagnostou e Kovari, 1994). Quando si utilizza questa tecnologia le caratteristiche dello slurry devono essere accuratamente progettate, tenendo conto delle caratteristiche di concentrazione e viscosità necessarie in rapporto alla geologia del tracciato ed in particolare la permeabilità del terreno, come pure la viscosità dinamica della sospensione correlata alla velocità di avanzamento della macchina (Heijboer et al., 2004). Poiché le funzioni principali dello slurry sono quelle di mantenere in sospensione il materiale scavato, di permettere l'applicazione della corretta pressione al fronte e di lubrificare e raffreddare gli utensili di scavo e la testa di abbattimento, le possibili criticità sono:

- la possibilità o meno di applicare una corretta contropressione al fronte e di creare il filtercake. Poiché questi parametri sono controllati: dalla granulometria del terreno; dal chimismo delle acque sotterranee; dalla concentrazione della bentonite nello slurry; è importante investigare (EFNARC, 2003):

- o le caratteristiche geotecniche del terreno;
  - o le caratteristiche chimico fisiche delle acque sotterranee;
  - o le caratteristiche del fango bentonitico: densità, contenuto di solidi, pH, fluidità al cono di Marsh, viscosità plastica, ecc.;
  - o la capacità dello slurry di impregnare il terreno e creare il filtercake.
- le possibili fughe di fango lungo vie sotterranee preferenziali (cunicoli o pozzi preesistenti, fratture aperte), che costituirebbero, a parte la perdita di bentonite, la ben più grave e improvvisa caduta di pressione in camera di scavo, non facilmente compensabile con il conseguente collasso del fronte. Le indagini devono prevedere la mappatura lungo il tracciato di ogni eventuale punto sensibile, attraverso sia studi della cartografia disponibile, quella recente ma anche e soprattutto quella di vecchia redazione, sia indagini geofisiche dalla superficie o in avanzamento rispetto alla testa della macchina;
  - la possibile presenza di blocchi di roccia che possano complicare l'azione della testa rotante ed essere difficilmente demolibili dal frantumatore in camera di scavo. In questo caso sono utili le investigazioni geofisiche in avanzamento.

Gli Earth Pressure Balance Shield in cui la contropressione al fronte è esercitata dallo stesso terreno scavato che, mentre la macchina avanza, viene "immagazzinato", mescolato, agitato e trattato in una camera chiusa (che è la camera di condizionamento). La pressione viene regolata estraendo dalla camera di condizionamento, in modo controllato, il terreno scavato in funzione della velocità di avanzamento (Anagnostou e Kovari, 1996; Gugliemetti et al., 2007). Universalmente si utilizza un estrattore a coclea di adeguata lunghezza: variando la velocità di rotazione della coclea varia la portata estratta e varia la pressione interna alla camera (Gugliemetti et. al 2007). Affinché tutto questo meccanismo funzioni in modo corretto, è necessario che il terreno che transita all'interno della camera di condizionamento abbia le caratteristiche di una "pasta" densa, viscosa e fluente, ma non fluida (Vinai et al., 2008).

Terreni argillosi e siltosi si trasformano facilmente in questa "pasta" con eventuale aggiunta di acqua mentre terreni sabbiosi e ghiaiosi richiedono di essere mescolati con acqua e opportuni additivi condizionatori (bentonite, filler, agenti schiumogeni e composti organici a lunga catena molecolare - polimeri) attraverso la loro iniezione al fronte e nella camera di condizionamento. E' quindi fondamentale per l'uso di macchine tipo EPB una preventiva ed approfondita conoscenza degli effetti degli agenti condizionanti sul terreno (Tabella VII).(Jancsecz et al., 1999; Milligan,

2000; Mair et al., 2003; Vinai 2004). Ciononostante, le regole d'arte e le indicazioni progettuali per impostare il corretto dosaggio degli additivi non sono ancora disponibili e inquadrabili in un contesto organico universalmente riconosciuto e verificato (EFNARC, 2005). Nella maggioranza dei casi il dimensionamento è ancora lasciato all'esperienza degli operatori il che richiede di procedere per tentativi fino ad ottenere il mix ottimale, ricerche al riguardo sono state svolte da Pena (2003); Borghi et al. (2003); Mair et al. (2003); Merrit e Mair (2006), da Schwenzfeier (2000) e da Peila et al. (2007, 2009) e Vinai et al., (2008). Questi studi sono tutti mirati all'individuazione di procedure di prova che possano realisticamente rappresentare il comportamento del terreno condizionato in camera di scavo e quindi fornire indicazioni agli operatori sui dosaggi ottimali degli agenti condizionanti in funzione delle caratteristiche geotecniche dei terreni. Tra le tipologie di prove utilizzate si devono lo slump test (Peila et al., 2009) per la sua semplicità operativa che lo rende facilmente applicabile anche in cantiere, e le prove di estrazione con coclea da una camera in pressione (Merrit e Mair, 2006; Vinai et al.2008) che, invece, descrive nel modo migliore il funzionamento di una macchina tipo EPB.

## 5 CONCLUSIONI

E' scontato, e perfino banale, affermare che le indagini preliminari servono, sia in fase di progettazione sia in fase di costruzione, anzi, che sono essenziali per la progettazione di una galleria. Possono però essere molto difficili da eseguire ed interpretare correttamente, in particolare proprio nei casi in cui servirebbero di più, cioè nelle gallerie lunghe e profonde e nelle gallerie in area urbana. Conseguentemente si è costretti a limitarle e ci si deve accontentare di un certo ammontare di informazioni, ovviamente avendo impiegato per ottenerle le migliori tecniche e tecnologie disponibili ben sapendo che non sono esaustive. Il problema fondamentale è quindi riuscire a decidere in modo razionale ed ingegneristico quando fermarsi o, meglio ancora, di che livello di approfondimento accontentarsi cioè, per dirla in termini contrattuali, definire qual'è il livello di accettazione del rischio residuo e come deve essere condiviso tra i vari attori coinvolti. Questo risultato può essere ottenuto solo grazie al miglioramento della capacità interpretativa fornita dai metodi statistici della "risk analysis". L'uso sistematico di moderni metodi di analisi di rischio, infatti, consente non solo di quantificare i benefici ottenibili con le indagini in termini di riduzione dei tempi e dei costi di scavo e di sapere dove e con quali finalità approfondire le indagini stesse, ma anche di facilitare la gestione contrattuale dei rischi residui riducendo, conseguentemente, l'insorgenza di contenzioni e contribuendo a rendere la gestione della fase costruttiva meno conflittuale.

E' quindi auspicabile che l'impiego di questi metodi diventi un approccio corrente nella progettazione e gestione della costruzione di gallerie, e che questi metodi vengano costantemente migliorati a livello scientifico per ottenere sempre più affidabili risultati ai fini applicativi, dovendo inesorabilmente superare i criteri, non per tutti "comodi", del metodo osservazionale.

## BIBLOGRAFIA

- AFTES (2004a), *Apport des techniques pétrolières et minières de forage ed diagraphie à la reconnaissance des grands ouvrages souterrains*, Tunnels et ouvrages souterrains, n. 184
- AFTES (2004b), *Recommandation du GT 32: Risk geotechniques*, Tunnels et Ouvrages souterrains, n. 185
- Anagnostou G. e Kovari K. (1994), *The Face Stability of Slurry-shield-driven Tunnel*, Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 9 No. 2, 165-177.
- Anagnostou G. e Kovari K. (1996), *Face stability conditions with Earth-pressure-balanced Shields*, Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 11, No. 2, 165-173.
- Anagnostou G. e Kovari K. (2005), *Tunnelling through geological fault zones*, Int. Symp. On design, construction and operations of long tunnels, Taipei, Vol 1, 509-520
- Barla G. e Pelizza S. (2000), *TBM tunneling in difficult ground conditions*, Key Lecture, GeoEng2000, Melbourne
- Barla G. (2009), *Il monitoraggio nel progetto delle grandi opera infrastrutturali in sotterraneo*, Workshop: le attività di monitoraggio nello scavo delle gallerie profonde. La galleria di base del Brennero: il cunicolo esplorativo Aica-Mules, Torino, 23-25
- Betaz E., Peila D. e Innaurato N. (2001), *Prevision of hard rock TBM boring time*, AITES-ITA 2001 World Tunnel Congress: "Progress in Tunnelling after 2000, Milano, Vol. 2, 41-48

- Borghi X, Merritt A. e Pena M. (2003), *Easing the way-soil conditioning*, T&T International, 48-50
- BTS (British Tunnelling Society) (2003a), *The joint code of practice for risk management of tunnel works in the UK*, British Tunnelling Society, London
- BTS (British Tunnelling Society) - Closed Face Working Group (2003b), *Report on a review of recent tunnel failures associated with closed face tunnelling machines*, British Tunnelling Society, London
- BTS (British Tunnelling Society) (2004a), *Sinkholes in Singapore*, T&T, 40-42
- BTS (British Tunnelling Society and ICE) (2004b), *Tunnel Lining Design Guide*, Thomas Telford, London
- Carrieri G. (2000), *Preparation of the report "Guidelines for the selection of TBM's" Recommendation and guidelines for TBMs*, ITA-AITES WG. 14, Lausanne
- Carter T.G. (1992), *Prediction of uncertainties in geological engineering and rock mass characterization assessments*, MIR 1992, Torino
- CIRIA (1997), *Tunnelling – Improved Contract Practice*, CIRIA, London
- Chiriotti E., Grasso P. e Xu S. (2003), *Analisi del rischio: stato dell'arte ed esempi*, Gallerie e Grandi Opere Sotterranee, n. 69, 20-44
- Clayton C.R.I. (2001), *Managing Geotechnical Rock. Improving Productivity in UK Building and Construction*, ICE, London, Thomas Telford, London
- Collomb D., Kalamaras G., Vignat P. e Bochon A. (2001), *LGT Lyon-Turin – Modelisation probabiliste de l'incertitude sur les couts et la durée de réalisation du tunnel de base Maurienne-Ambin*, AITES-ITA 2001 World Tunnel Congress: "Progress in Tunnelling after 2000, Milano, Vol. 3, 531-538
- Comin C. (2002), *Le indagini geognostiche per il progetto preliminare della galleria di base del Brennero*, Convegno su: "Le indagini geologiche e geotecniche propedeutiche alla costruzione delle opere sotterranee sia civile che minerarie", GEAM, Modena
- Concilia M., 2008, *TBM Tunnelling*, materiale didattico del corso di Master in Tunelling and Tunnel Boring Machines, Torino, 2008
- Cravero M., Iabichino G., Godio A. e Sambuelli N. (2000), *Metodologia per controlli e misure di tipo geomeccanico e geofisico per lo scavo meccanizzato di gallerie*, MIR 200, Torino
- Della Valle N. (2002), *Gestione e pianificazione delle fasi costruttive di gallerie scavate con TBM*, Gallerie e Grandi Opere Sotterranee, n. 68, 20-30
- Demorieux J.M. (1997), *Reconnaissances a l'avancement a partir du TBM*, UN/ITA Workshop on Gibraltar strait fixed link: "Characterisation on TBM for tunnelling flysches", Tarifa
- Diamantidis D. (2001), *Probabilistic assessment of existing structures*, RILEM Publications SARL Cedex France
- Dix A. e Smith M. (2006), *A systematic framework for the contractual apportionment of construction risk*, ITA/AITES Open Session, Seoul
- Duddeck H. (1987), *Risk assessment and risk sharing in tunnelling*, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 2, 315-317
- Dudt J. (1999), *Risk Assessment for tunnel construction cost and time*, 3<sup>rd</sup> UN/ITA Workshop Gibraltar strait fixed link, Rabat
- Einstein H.H., Halabe V.B., Dudt J. e Descoedres F.P. (1982), *Decision Aids in Tunnelling - Principal and practical application*. Swiss Federal Office of Transportation – Project AlpTransit, Lausanne
- Einstein H.H., (1996), *Risk and Risk Analysis in Rock Engineering*, Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 11, N.2, 141-155.
- EFNARC (2001), *Specification and Guidelines for the use of specialist products for Soft Ground Tunnelling*, Farnham (UK)
- Ellingwood B.R. (2008), *Structural reliability and performances-based engineering*, Proceeding of the Institution of Civil Engineers, ICE, 161, issue SB4, 199-208
- Eusebio A. (1994), *Traforo di valico Stura-Tinée. Sondaggio Geognostico di S. Anna di Vinadio*, Gallerie e grandi opere sotterranee, n. 44, 70-71
- Fabbri D. (2005), *Experiences from the ground probing in the Gotthard-Base tunnel*, ITA/AITES Training Course, I edition, Istanbul
- Foster J.R. (1997), *Gibraltar Strait Crossing. Characterization of TBM*, UN/ITA Workshop on "Characterization for tunnelling flysches", Tarifa
- Fruguglietti A., Guglielmetti V., Grasso P., Carrieri G. e Xu S., (1999), *Selection of the right TBM to excavate weathered rocks and soils*, ITA World Tunnel Congress '99: "Challenges for the 21<sup>st</sup> Century", Oslo, 839-847.
- Frasnk R., Bauduin C., Driscoll R., Kavvadas M., Krebs Ovesen N., Orr T. e Schuppener B. (2004) *Designer's guide to EN 1997-1. Eurocode 7: Geotechnical design – General rules*, Thomas Telford
- Galera J.M. e Pescador S. (2005), *Métodos geofísicos no destructivos para predecir el terreno por delante de las tuneladoras*, Gibraltar Strait crossing: IV UN-ITA Workshop, Madrid
- Galera J.M. (1997), *Sonic soft ground probe system adapted to TBM*, UN/ITA Workshop on "Characterization of TBM for tunnelling flysches", Tarifa
- Gallarà F. (2002), *Le indagini "geo" per il traforo di base nel nuovo collegamento ferroviario Torino-Lione*, Convegno su "Le indagini geologiche e geotecniche propedeutiche alla costruzione delle opere sotterranee sia civile che minerarie", GEAM, Modena

- Glossop R. (1968), *The rise of geotechnical and its influence on engineering practice*, Géotechnique, n. 18, 107-150
- Grandori R. (1996a), *Avanzamento meccanico in condizioni estreme. Scelta del tipo di TBM e sue caratteristiche*, 3° Symp. Européen de la construction des tunnels, Berna, 50-57.
- Grandori R. (1996b), *The universal TBM in the year 2000. Technical aspects and contractor consideration*, Gallerie e grandi opere sotterranee, SIG, n. 50, 38-48.
- Grandori R. e Romualdi P. (2004), *The Abdalajis tunnel (Malaga-Spain). The new Double Shield Universal TBM challenge*, Int. Congress on Mechanized Tunnelling: challenging case histories, Torino
- Grasso P., Kalamaras G.S., Xu S. e Mahtab A. (2001), *Project financing for long and deep tunnels: an approach based on risk analysis*, World Tunnel Congress: "Progress in Tunnelling after 2000", Milano, 3, 539-546
- Grasso P., Collom D., Vignat P., Bochon A. (2002), *Base Tunnel Maurienne-Ambin: probabilistic estimation of construction time and cost for various project. Planning and configuration alternatives considering geologic and geomechanical uncertainties*, Convegno su "Le indagini geologiche e geotecniche propedeutiche alla costruzione delle opere sotterranee sia civile che minerarie, GEAM, Modena
- Gulli D. (2005), *Stima dello stato di sollecitazione in ammassi rocciosi: analisi delle tecniche di misura e sviluppo di un prototipo di cella deformometrica triassiale*, Tesi di Dottorato, Politecnico di Torino (non pubblicata)
- Guglielmetti V., Grasso P., Mathab A. e Xu S. (2007) *Mechanized Tunnelling in Urban Area*, Taylor & Francis
- Jancsecz S., Krause R., Langmaack L. (1999), *Advantages of soil conditioning in shield tunnelling: Experiences of LRTS Jzmir*, ITA/AITES World Tunnel Congress, Oslo, 865-875.
- Kalamaras G.S., Brino L., Carrieri G., Pline D. e Grasso P. (2000), *Application of Multicriteria Analysis to Select the best Highway Alignment*, Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 15, N.4, 415-420.
- Kalamaras G.S. (1996), *A probabilistic approach to rock engineering design: application to tunnelling*, Milestones in Rock Engineering –The Bieniawski Jubilee Collection, Balkema, Rotterdam, 113-135
- Klados G. e Kok Y.H. (2004), *Selection and performance of TBM in Karstic Limestone – SMART case*, Int. Congress on Mechanized Tunnelling: challenging case histories, Torino, 151-164
- Kovari K. (2002), *La sicurezza del sistema nel campo della costruzione di gallerie in aree urbane – L'esempio della galleria del Zimmerberg*, Gallerie e Grandi Opere Sotterranee, n. 68, 31-46
- Kovari K. e Descoeders F. (2001), *Tunnelling Switzerland*, Swiss Tunnelling Society, Zurich
- Herrenknecht (2001), *Mixeshield*, Swanau (Germania)
- Heijboer J., van den Hoonaard J. E van de Linde F.W.J. (2004), *The Westershelde Tunnel. Approaching Limits*, Balkema
- Hoek E. (1998), *Geotechnical risks on large civil engineering*, Congr. of IAEG, Vancouver
- Hoek E. (2001), *Big tunnels in bad rock*, Journal of geotechnical and geoenvironmental engineering, 726-740
- Hoek E., Carranza-Torres C., Diedrichs M. e Chrkum B. (2008), *The 2008 Kersten Lecture. Integration of geotechnical and structural sedign in tunnelling*, 56th Annual Geotechnical Engineering Conference, Minneapolis
- Lamond D. R. (2006), *Occupational Health & safety. Risk Management in tunnel works*. ITA/AITES Open Session, Seoul
- The International Tunnelling Insurance Group (2006), *A code of practice for risk management of tunnel works*, [http://www.imia.com/downloads/external\\_papers/EP24\\_2006.pdf](http://www.imia.com/downloads/external_papers/EP24_2006.pdf), (last access 29/09/2009)
- Innaurato N. e Peila D. (1996), *Statistical Analysis of TBM performances*, AFTES, Journées d'Etudes Int. de Chambéry
- Innaurato N., Lucentini M., Oreste P. e Brino L. (2004), *TIME-TBM: un metodo per la valutazione probabilistica dei tempi di avanzamento delle TBM nei grandi trafori di base alpini*, Gallerie e Grandi Opere Sotterranee, 73, 25-43
- ITA/AITES WG on General Approaches to the design of tunnels (1988), *Guidelines for the design of tunnels*, Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 3, 237-249
- ITA/AITES WG 14 (2000), *Recommendations and Guidelines for Tunnel Boring Machine*, ITA/AITES, Lausanne
- ITA/AITES (2001), *Open Session on "Risk assessment for project financing"*, Tribune, N. 20
- ITA/AITES WG 2 (2004), *Guidelines for tunnelling risk management*, Tunnel and Underground Space Technology, n. 19
- ITA/AITES WG 16 (2004) *Quality in tunnelling. Final Report*, Tunnel and Underground Space Technology, n. 19
- ITA/AITES WG 17 (2003), *Long Tunnel at Great Depth - Final Report*, ITA/AITES, Lausanne
- ITALFERR (1995), *Linee Guida per la progettazione, la costruzione ed il collaudo di nuove opere ferroviarie in sotterraneo*, Roma
- Legget R.F. e Hatheway A.W. (1988), *Geology and Engineering*, McGraw-Hill, New York
- Lombardi G. (2001), *Geotechnical risks for project financing in non-urban areas*, Tribune, N. 20, 19-23
- Leca E. (2000), *Investigation ahead of the face*, EUPALINOS 2000 General Report, AFTES
- Lunardi P. (1986), *Lo scavo delle gallerie mediante cunicolo pilota*, MIR 1986, Torino
- Lunardi P. e Focaracci A. (2001), *Risk assesment in tunnelling design*, AITES-ITA 2001 World Tunnel Congress: "Progress in Tunnelling after 2000, Milano, Vol. 3, 547-559
- Lunardi P. (2001), *Progetto di gallerie secondo l'approccio basato sull'analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli*, Quarry and Construction, supplemento
- Maidl B., Schmid L., Ritz W. e Herrenknecht M. (2008) *Hardrock Tunnel Boring Machines*, Ernst & Sons
- Mair R., Merritt A., Borghi X., Hiroshi Y. e Toshifumi M. (2003), *Soil conditioning for clays soils*, T&T International, 29-33

- Merritt, A. e Mair, R.J. (2006), *Mechanics of tunnelling machine screw conveyor: model tests*, Geotechnique, Vol. 56, pp. 605-615.
- Marcheselli P.P. e Ludde M. (2002), *Esplorazione geologico-tecnica in tempo reale davanti alla testa fresante di TBM*, Convegno su: "Le indagini geologiche e geotecniche propedeutiche alla costruzione delle opere sotterranee sia civile che minerarie", GEAM, Modena
- Mendaña F. (2004), *Double shield tunnellers in the construction of the Guadarrama tunnels*, Int. Congress on Mechanized Tunnelling: challenging case histories, Torino, 207-224
- Milligan G. (2000), *Lubrication and soil conditioning in Tunnelling, Pipejacking and Microtunnelling*, Rapporto interno del Geotechnical Consulting Group, London
- Muir Wood A. (2000), *Tunnelling: Management by design*, E&FN Spon, London
- Oggeri C. (2004), *Relevant features for tunnelling control by quality procedures*, Gallerie e Grandi Opere Sotterranee, 73, 44-50
- Oreste P.P. (2001), *Un nuovo approccio per il dimensionamento dei sostegni di gallerie su base probabilistica*, Gallerie e grandi opere sotterranee, 63, 66-81
- Oreste P. (2006), Correlated probabilistic analysis of the excavation times and costs in tunneling, *Journal of mining science*, 42 (3)
- Oreste P.P. e Peila D. (1995), *Analisi dell'influenza delle incertezze dei parametri geotecnici sul fattore di sicurezza di rivestimenti delle gallerie*, Geoingegneria Ambientale e Mineraria, n. 2-3, GEAM, Torino, 101-108
- Oreste P.P. e Peila D. (2000), *I consolidamenti come mezzo per permettere lo scavo meccanizzato di gallerie*, MIR 2000, Torino, 217-274
- Parker H. (1996), *Geotechnical Investigations*, Tunnel Engineering Handbook, Kluwer Publishers, Boston, 46-79
- Parker H. (1999), *Geotechnical Investigations*, Int. Symp. on "Ground Challenge & Expectation in Tunnelling Projects", Cairo
- Patrucco M. e Sorlini A. (2003), *Workers safety conditions in urban underground construction: Risk evaluation, management and monitoring as applied in northern Italy*, GEOINGEGNERIA AMBIENTALE E MINERARIA, XI (1), 93-100
- Pelizza S. e Peila D. (1993), *Indagini preventive, misure e controlli in corso d'opera*, La realizzazione delle Grandi opere in sotterraneo, SIG, Verona
- Pelizza S. e Peila D. (1993), *Soil and rock reinforcements in tunnelling*, Tunnelling and Underground Space Technology, n.3, Pergamon Press, 357-372
- Pelizza S. (1997a), *Introduzione al Progetto Strategico Gallerie*, Rapporto Conclusivo del Progetto Strategico Gallerie, CNR, 3-11
- Pelizza et al., (1997b), *Analisi delle indagini preventive geologiche, geotecniche e idrogeologiche e delle procedure operative per lo scavo di gallerie e loro influenza sui tempi e costi operativi*, Rapporto Conclusivo del Progetto Strategico Gallerie, CRN, Torino, 105-142
- Pelizza S. (1998), *Selection of TBMs*, Workshop on Selection of Tunnelling Methods, ITA World Tunnel Congress '98, Sao Paulo (Brazil)
- Pelizza S. and Grasso P. (1998), *Tunnel collapses: are they unavoidable?*, World Tunnelling
- Pelizza S. (2000), *Engineering risk in tunnelling*, Underground Construction in Germany, STUVA
- Pelizza S. e Peila D. (2001), *Rock TBM Tunnelling*, Jubilee Volume in celebration of 75<sup>th</sup> anniversary of K. Terzaghi's "Erdbaumechanik", Ed. Technische Universität Wien.
- Pelizza S. (2004), *Introductory lecture*, Int. Congress on Mechanized Tunnelling: challenging case histories, Torino,
- Pelizza S. (2005), *Position Paper n. 3*, Ground Treatment, Gibraltar Strait Crossing: IV UN-ITA Workshop, Madrid
- Peila D., Oreste P.P. e Camerotto A. (1997), *Analisi dell'influenza delle incertezze dei parametri geotecnici sul dimensionamento dei rivestimenti di gallerie*, Rapporto Conclusivo del Progetto Strategico Gallerie, CNR
- Peila D. (2005), *Indagini Preliminari nella costruzione di gallerie*, Workshop SIG "L'innovazione tecnologica nella costruzione e realizzazione di gallerie", Infrastructura, Torino, 1-40
- Peila D.; Oggeri C.; Vinai R. (2008), *Screw conveyor device for laboratory tests on conditioned soil for EPB tunneling operations*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 133 (12), pp. 1622-1625
- Peila D., Oggeri C., Borio L., (2009), "Using the slump test to assess the behaviour of conditioned soil for EPB tunneling", *Environmental & Engineering Geoscience*, XV (3), 167-174
- Pena M. (2003), *Soil conditioning for sands*, T&T International, July, 40-42
- Pigorini A., Puccinelli M., Caldini S. e Giovannini R. (2004), *Linea ferroviaria Pontremolese tra progetto e costruzione: superamento di passaggi difficili sulla via per Parma (parte prima)*, Gallerie e grandi opere sotterranee, n. 72, 62-80
- Piego J.M. (2002), *Marine geological Investigations for the study of the Gibraltar Strait Rail Tunnel*, Convegno su "Le indagini geologiche e geotecniche propedeutiche alla costruzione delle opere sotterranee sia civile che minerarie", GEAM, Modena
- Poma A. e Polimenti S. (1999), *Galleria "Dei Quattro Venti". Criteri di scelta progettuale per lo scavo meccanizzato in zona urbana*, Gallerie e Grandi Opere Sotterranee, n. 57, 27-38
- Progetto Nazionale Normativa Opere in Sotterraneo (1997), *Linee guida per la progettazione, l'appalto e la costruzione di opere in sotterraneo*, Gallerie e Grandi Opere Sotterranee (allegato)

- Ramoni M. e Anagnostou G. (2007), The effect of advance rate on shield loading in squeezing ground, ITA/AITES World Tunnel Congress 2007, Prague, Vol. 1, 673-677
- Rossi P.P. (1994), *Criteri di indagine e controllo per il progetto e la realizzazione di gallerie*, Convegno “Le gallerie nei tracciati stradali e ferroviari”, Bologna
- Russo G., Xu S., Valdemarin F. e Grasso P. (1997), *Valutazione probabilistica dei tempi e dei costi di costruzione di una galleria con il sistema DAT*, Rapporto Conclusivo del Progetto Strategico Gallerie, CRN, Torino, 120-128
- Russo G., Kalamaras G.S., Xu S. e Grasso P., (1999), *Reliability analysis of tunnel-support systems*, 9th Int. Congress on Rock Mechanics, Parigi
- Russo G., Kalamaras G.S., Origlia L., Grasso P. (2000), *A probabilistic approach for characterizing the complex geologic environment for design of the new Metro do Oporto*, ITA 2000 W.T.C. Progress in Tunnelling after 2000, SIG, STS, pp. 463-470.
- Sambuelli L., Godio A., Socco V., Dall’Ara A., Vaira G. e Deidda G. (2004), *Metodi Geofisici per la caratterizzazione degli ammassi rocciosi*, MIR 2004, Torino, 47-89
- Sambuelli L. e Godio A. (2002), *Indagini geofisiche in avanzamento per la costruzione di gallerie*, Convegno su “Le indagini geologiche e geotecniche propedeutiche alla costruzione delle opere sotterranee sia civile che minerarie, GEAM, Modena
- Sakurai S. (1997), *Lessons learned from field measurements in tunnelling*, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 12, 453-460
- Schwenzfeier A. (2002), *Control of earth pressure balance confinement*, EUPALINOS 2000, AFTES, Paris
- SIA (1993), *Norma SIA 198 – Travaux souterrains*, Société Suisse des ingenieurs et des achitectes, Zurich
- SIA (1998), *Norma SIA 199 – Etude du massif encaissant pour les travaux souterrains*, Société Suisse des ingenieurs et des architectes, Zurich
- Skuk S., Brandner R. e John M. (2009), *Geology and geomechanics*, Workshop: le attività di monitoraggio nello scavo delle gallerie profonde. La galleria di base del Brennero: il cunicolo esplorativo Aica-Mules, Torino, 16-19
- Skuk S. (200), *Monitoring of the exploratory tunnel*, Workshop: le attività di monitoraggio nello scavo delle gallerie profonde. La galleria di base del Brennero: il cunicolo esplorativo Aica-Mules, Torino, 28-29
- Soldo L.(1998), *L’importanza delle indagini preliminari nella progettazione di opera in sotterraneo*, Tesi di dottorato, Politecnico di Torino, (non pubblicata)
- Soldo L., Eusebio A., Grasso P.G., Pelizza S. (2005), *Preliminary geological studies for the design of great civil infrastructures*, GEOLINE 2005, Lyon
- Stein D. (2005) *Trenchless technology for installation of cables and pipelines*, Stein and Partners, Germany
- Tseng Y.Y., Wong S.L., Chu B. e Wong C.H. (1998), *The Pinglin Mechanized Tunneling in difficult Ground*, 8<sup>th</sup> Congr. of IAEG, Vancouver (Canada), 21-25 September, 6 pages.
- TCGR/UTRC (1997), *Geotechnical Baseline Reports of Underground Construction. Guidelines and Practices*, ASCE
- USNC/TT (1984), *Geotechnical site investigations for underground projects*, National Research Council, Washington, D.C.
- Valentino D. (2005), *Misurazione dello stato tensionale negli ammassi rocciosi: la tecnica della fratturazione idraulica. Progettazione e realizzazione di un innovativo strumento di misura*, Tesi di Dottorato, Politecnico di Torino, (non pubblicata)
- Vielmo I. (2005), *Grouting ad drainage treatment with relevant boring layouts*, Gibraltar Strait crossing: IV UN-ITA Workshop, Madrid
- Vinai R; Oggeri C; Peila D. (2008), *Soil conditioning of sand for EPB applications: a laboratory research*, Tunnelling and Underground Space Technology, 23, 308-317
- Vinai R; Oggeri C; Peila D., Pelizza S. (2006), *Condizionamento con schiuma dei terreni per applicazioni EPB: sperimentazione mediante un nuovo apparato di laboratorio*, Gallerie e Grandi Opere Sotterranee, 78, 39-47
- Vrouwenvelder T. (2008), *Reliability, responsibility and reality in structural engineering*, Proceeding of the Institution of Civil Engineers, ICE, 161, issue SB4, 209-214
- Wagner H. (2006), *Risk management at the limits of conventional tunnelling –Analysis of the state of the art*, Key note lecture, ITA/AITES World Tunnel Congress 2006, Seoul
- West G., Carter P.G., Dumbleton M.J. e Lake L.M. (1981), *Site investigation for tunnels*, Int. J. Rock Mech. In. Sci., n. 18, 345-367
- Wen-Lon Cheng (2004), *Hsuean Tunnel and TBM*, Int. Congress on Mechanized Tunnelling: challenging case histories, Torino, 13-20
- Yoo W. (2006), *Korean risk management practices: a contractor’s perspective*, ITA/AITES Open Session, Seoul

## Ringraziamenti

L’autore desidera ringraziare gli Ingg. L. Borio, N. Della Valle, G. Iabichino, G. Kalamaras, C. Oggeri, R. Vinai ed il Dott. L. Soldo per aver generosamente condiviso le loro opinioni ed aver discusso le loro opinioni al riguardo delle tematiche affrontate in questo lavoro.

Un ringraziamento particolare va ai Proff. S. Pelizza, N. Innaurato e M. Patrucco per i loro preziosi suggerimenti.

# FIGURE

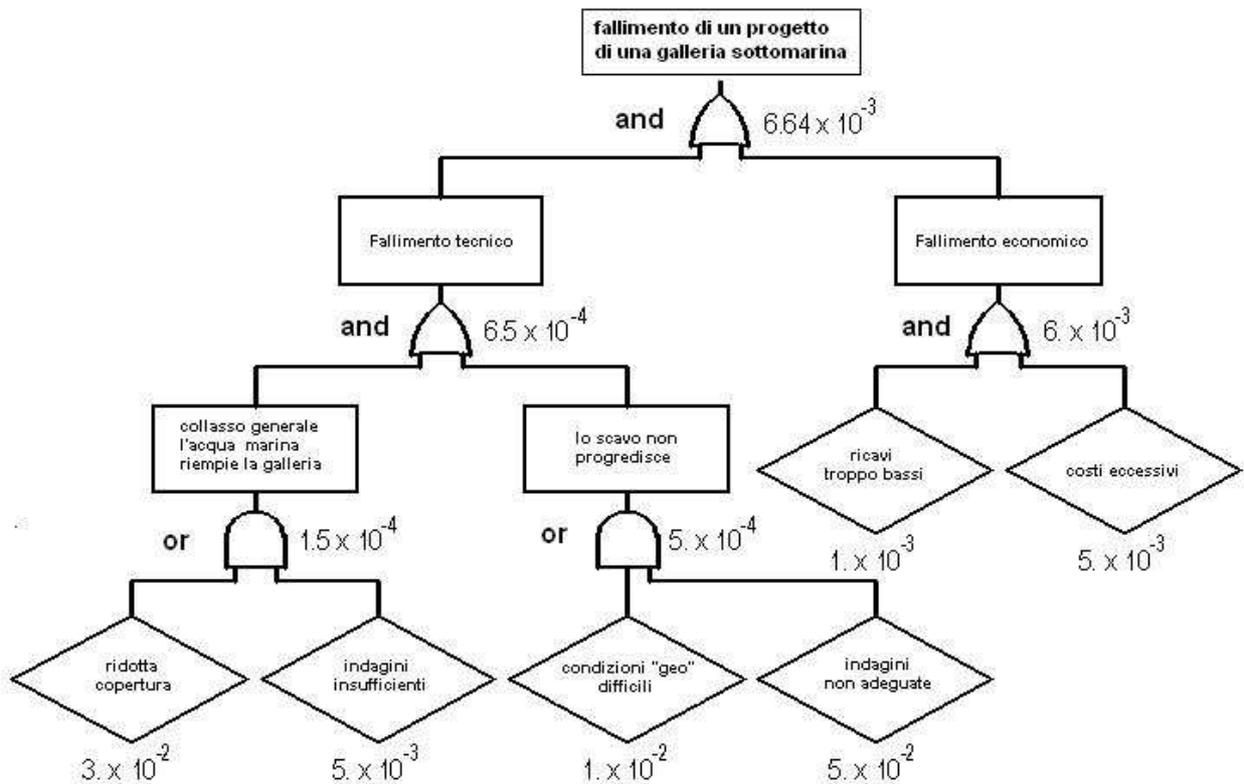


Figura 1 – Esempio di un albero di eventi per la valutazione delle probabilità di un collasso in una galleria sottomarina (tradotto da ITA WG2, 2004)

Figure 1 – Example of an event tree for the evaluation of the collapse probability of a tunnel below the sea (translated from ITA WG2, 2004).

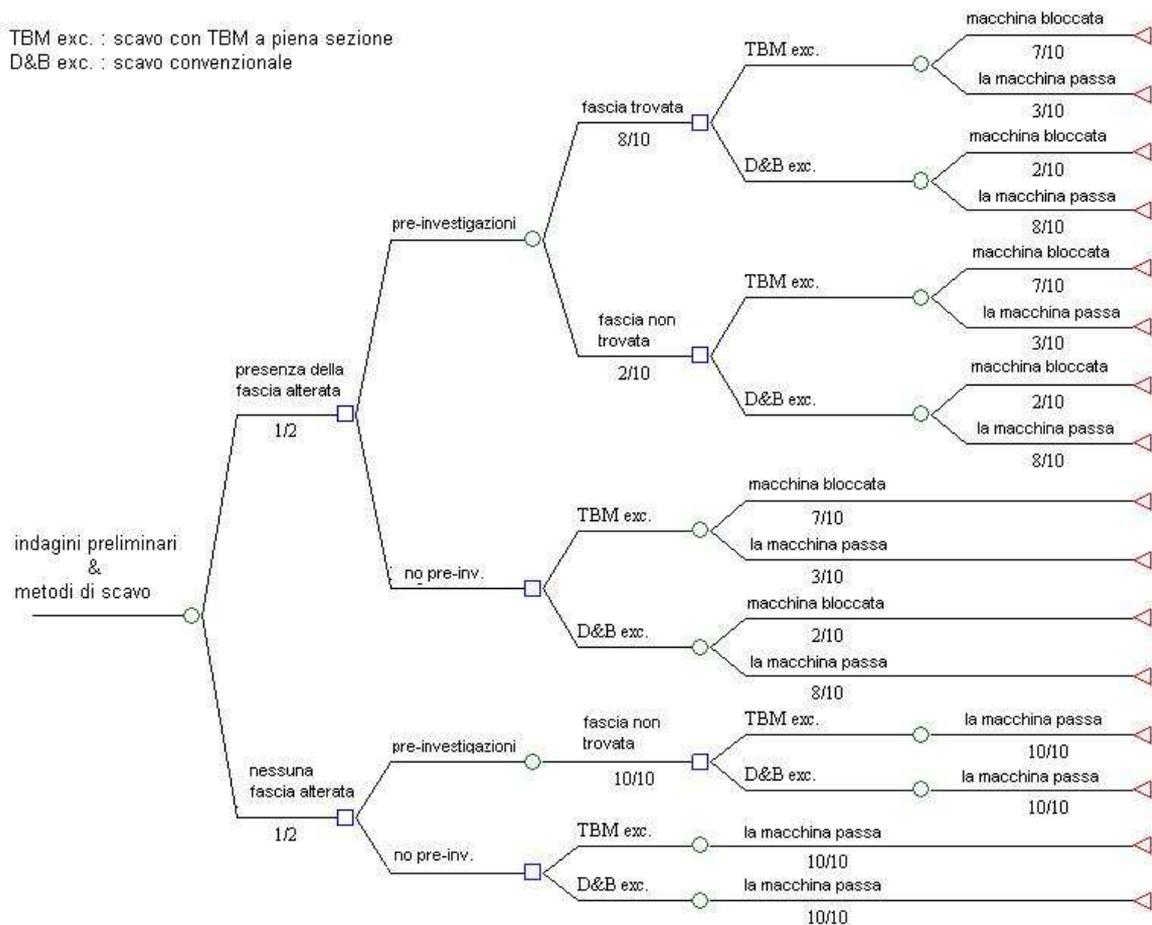


Figura 2 – Esempio di un albero decisionale per la valutazione dell'opportunità o meno di sviluppare indagini preliminari in funzione della presenza o meno di una fascia fortemente alterata (ITA WG2, 2004)

Figure 2 – Example of a decision tree for the evaluation of the need of preliminary investigations in relation to the presence of a altered zone (ITA WG2, 2004).

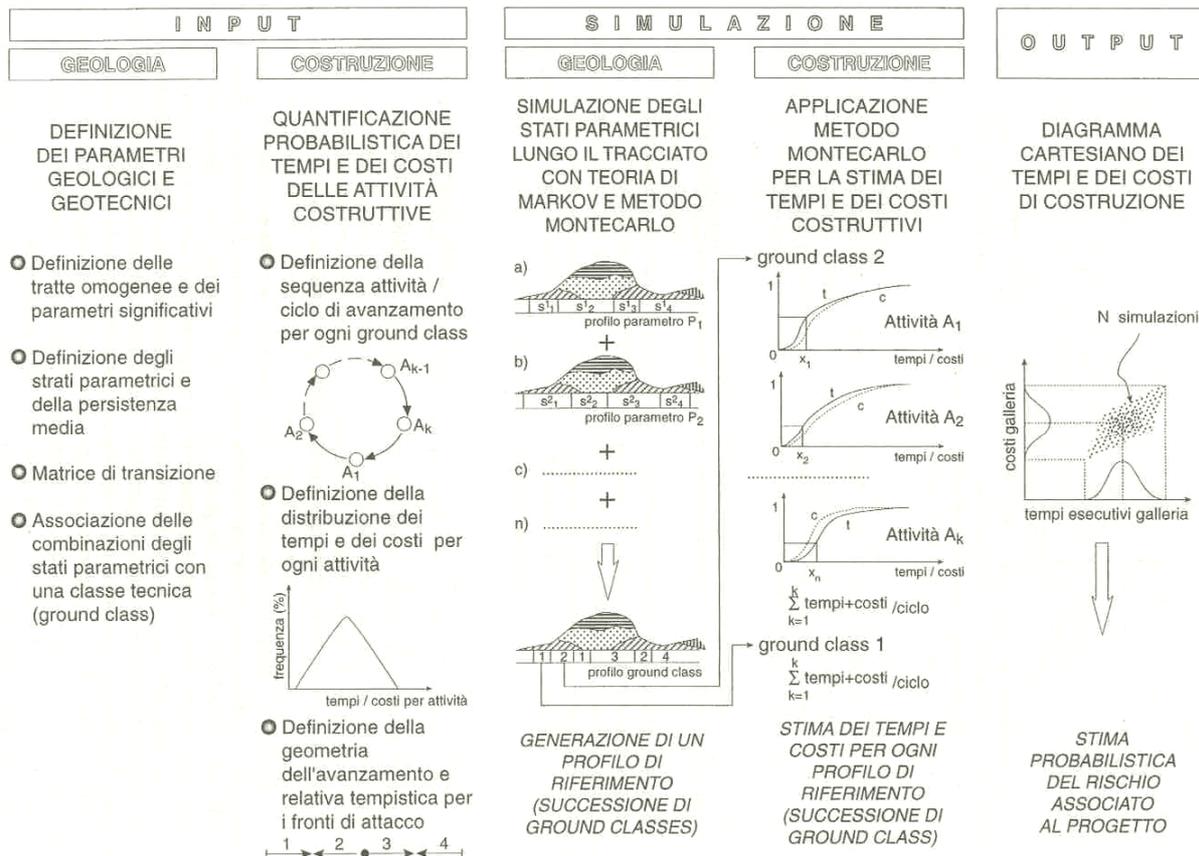
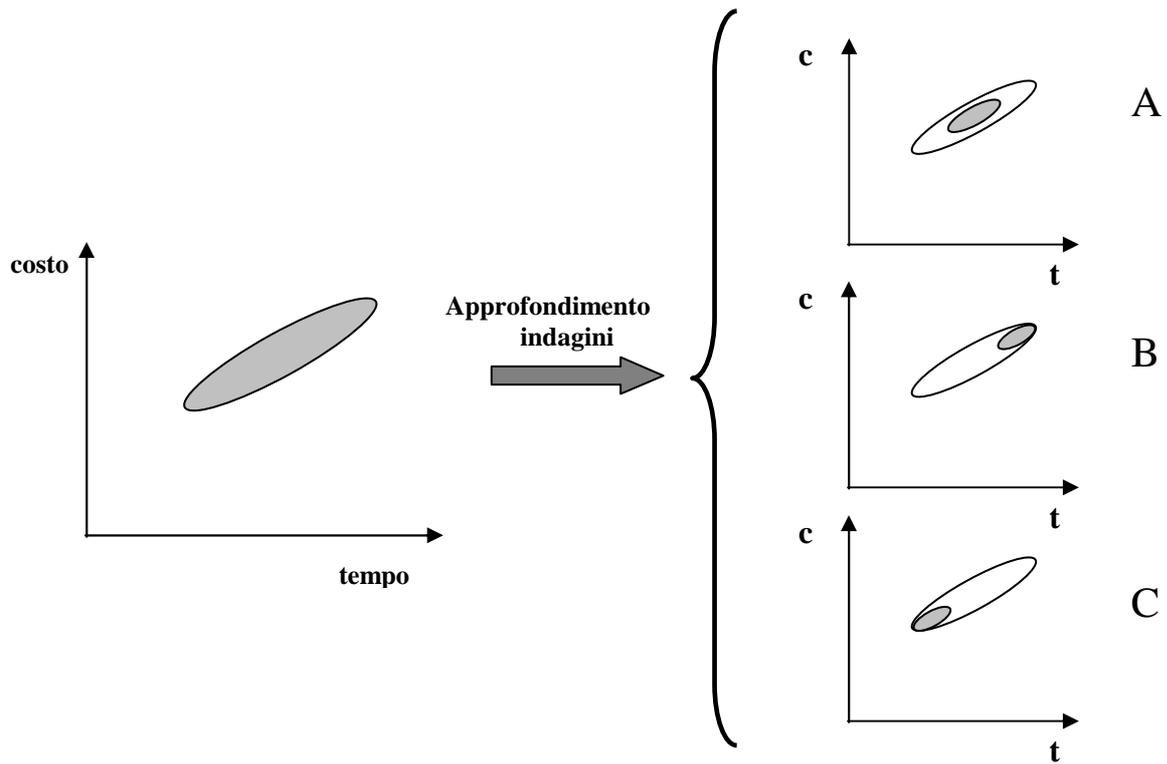


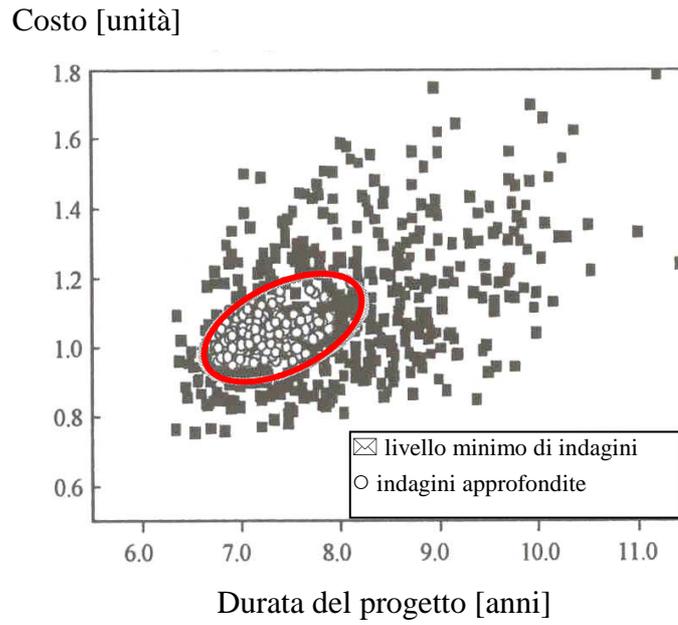
Figura 3- Schema operativo del Decision Aids for Tunnelling (Russo et al., 1997). Lo schema mostra che partendo da dati di input costituiti dalle informazioni “geo” e dalle varie classi costruttive, mediante un procedimento statistico sia per la simulazione della geologia sia per la simulazione delle fasi di costruzione è possibile risalire alla distribuzione dei costi-tempi.

Figure 3 - Operational scheme of Decision Aids for Tunnelling (Russo et al., 1997). The scheme shows that starting from the input data based on “geo” information and from the various construction classes based on a statistical analysis for the simulation of the geology and of the construction phases is possible to obtain the distribution of construction time and costs.



*Figura 4 – Diagramma che rappresenta la distribuzione dei punti (tempo-costo) calcolati con un approccio statistico e come questo si modifica con l'approfondimento delle indagini. L'esempio evidenzia che l'approfondimento delle indagini non necessariamente tende a ridurre l'area del diagramma in modo simmetrico (caso A) ma sempre comunque ne riduce la dispersione.*

*Figure 4 – Scheme the represent the distribution of the points (time vs cost) computed with a statistical approach and how it varies with the increasing of the investigations. The example shows that the increasing of the investigations always reduces the dispersions of the points but not ilall the cases in a symmetrical way as example( A ).*



*Figura 5 – Esempio dei risultati di un’analisi DAT confrontando due diversi livelli di indagine (Grasso et al., 2001)*

*Figure 5 – Example of the results of a DAT analysis where two different levels of investigations are compared*

# TABELLE

<b>Autore</b>	<b>Costo percentuale delle indagini “geo” rispetto al costo totale dell’opera</b>
Legget e Hatheway (1988)	0.3-2.0%
West et al. (1981)	0.5-3%
Parker (1996)	0.5-3%
U.S.N.C. Tunnelling Technology (1984)	>3%
ITALFERR (1995)	1.2-2.5% (in funzione di: lunghezza della galleria, copertura, condizioni geologiche ed idrogeologiche)

*Tabella I – Valori percentuali dell’incidenza delle indagini preliminari in riferimento al costo dell’opera, suggeriti in bibliografia.*

*Table I – Cost percentages of preliminary investigations referred to the construction cost of the work as suggested in technical literature.*

COMMITTENTE	PROGETTISTA	COSTRUTTORE
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Definire obiettivi del progetto e i requisiti in termini di specifiche tecniche</li> <li>- Stabilire la tolleranza della Committenza al rischio, ossia il grado di incertezza che la Committenza é preparata ad assumersi</li> <li>- Attivare il <i>risk management</i> in fase di pre-progetto</li> <li>- <b>Stimare la vulnerabilità del Progetto al rischio, soprattutto geotecnico, ma anche finanziario, ambientale, di salute e sicurezza (ricorso ad esperti)</b></li> <li>- Identificare come, quando e da chi saranno gestiti i rischi</li> <li>- Applicare condizioni contrattuali che riflettano la distribuzione del rischio definita accettabile e che al contempo assicurino il maggiore guadagno</li> <li>- Assicurare che prima dell'inizio dei lavori siano operative procedure efficaci di <i>dispute resolution</i></li> <li>- Assicurarsi che un Risk management Plan sia adottato da Progettista e Impresa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Identificare i requisiti fondamentali del Committente/Impresa e la sua tolleranza al rischio</li> <li>- <b>Identificare i rischi a livello di <i>concept design</i> (compilare un registro dei rischi)</b></li> <li>- <b>Utilizzare tecniche di analisi del rischio per identificare, quantificare e gerarchizzare il rischio</b></li> <li>- <b>Definire una campagna di indagini adeguata al livello di rischio geotecnico del progetto</b></li> <li>- Adottare strategie di progettazione e soluzioni costruttive adeguate a gestire le incertezze mitigando i rischi non accettabili, seguendo criteri di: incertezza minimizzata; semplicità e costruibilità della soluzione; adeguamento allo stato dell'arte; ottimizzazione.</li> <li>- Riconoscere che l'approccio deterministico può essere spesso poco accurato.</li> <li>- <b>Preferire analisi di sensitività e analisi probabilistiche.</b></li> <li>- Per ogni meccanismo critico chiave definire più di una strategia difensiva (contromisure).</li> <li>- Prevedere controlli e monitoraggi durante la costruzione.</li> <li>- Quando é possibile ricorrere alla progettazione flessibile, fare del monitoraggio dei parametri ed eventi chiave il fulcro del metodo osservazionale.</li> <li>- Completare il registro dei rischi con quello dei rischi residui e comunicarlo a Committente e Impresa</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Attivare il <i>risk management</i> il più presto possibile, già nelle fasi di gara e poi di negoziazione.</li> <li>- <b>Attivare la creazione di un registro dei rischi qualora non sia stato fornito dal Committente o dal Progettista</b></li> <li>- <b>Se il contratto é di tipo <i>design &amp; build</i> fare la revisione dei rischi geologici e curare la raccolta dei dati di campo, ad esempio, adottando accorgimenti quali il pagare il subcontrattista per le indagini a percentuale di recupero piuttosto che a metri perforati</b></li> <li>- Osservare, monitorare e registrare il comportamento del mezzo e delle strutture durante la costruzione</li> <li>- Fornire i dati al Progettista e interagire per identificare criticità e, se necessario, adeguare metodi costruttivi o lo stesso progetto</li> </ul>

*Tabella II - Schematizzazione dei passi da seguire per un corretto "risk management" per i vari attori coinvolti (Chiriotti et al., 2003). Sono evidenziati in grassetto i punti più direttamente correlati alle indagini preliminari.*

*Table II – Scheme of the step to be followed for a correct risk management with reference to the various actors involved in a tunnel design (Chiriotti et al., 2003). In bold are highlighted the points that are directly correlated to preliminary investigations.*

<b>Indagine</b>	<b>Indagine Litologia</b>	<b>Individuazioni e discontinuità</b>	<b>Individuazioni e zone singolari</b>	<b>Indagine geomeccanica</b>
Misure di gamma ray naturale	■			
Misure di gamma ray selettive	■			
Indagine sonica "full wave"	■	■	■	■
Misure del diametro del foro		■	■	■
Misure simiche in foro		■	■	
Indagine con video ripresa	■	■	■	
Log sonici	■	■	■	■
Log di micro-resistività	■	■		■
Log di temperatura		■	■	
Log di conduttività		■	■	
Misure della velocità di circolazione dei fluidi nel foro con micro-mulinello		■	■	

*Tabella III – Quadro riepilogativo degli ambiti che possono essere investigati con le varie tecnologie di indagine in fori profondi nel caso di perforazione a carotaggio continuo (tradotto da AFTES, 2004a)*

*Table III – global picture of the various areas that can be investigated using the techniques for geophysical investigations (translated from AFTES, 2004a)*

<b>Metodo</b>	<b>Principio operativo</b>	<b>Penetrazione nel massiccio davanti alla macchina</b>	<b>Interferenza con lo scavo</b>	<b>Facilità di interpretazione dei dati</b>
BEAM	Elettromagnetico	2.5-4 $\Phi$	Nulla	Media
TSP-203	Sismico	10-20 $\Phi$	Elevata	Complicata
TRT	Sismico	5-15 $\Phi$	Media	Complicata
SSP	Sonico	30 $\Phi$	Nulla	Complicata

*Tabella IV – Confronto tra i metodi geofisici utilizzati per le investigazioni in avanzamento davanti a macchine di scavo (tradotto da Galera e Pescador, 2005)*

*Table IV – Comparison of the various geophysical method used for the investigations ahead of the tunnel face when a full face machine is used (translated from Galera e Pescador, 2005)*

	<b>EPBS – Earth Pressure Balance Shield</b>	<b>HS - Hydroshield</b>
<b>Contropressione al fronte di scavo</b>	Operando in materiali a granulometria grossolana con poco fine può essere necessario l'uso di abbondanti additivi (schiume, polimeri, filler) per un adeguato condizionamento del terreno e per la generazione della contropressione di stabilizzazione del fronte di scavo. Mantenendo piena la camera di scavo con materiale condizionato ed addensato viene impedito il collasso del fronte anche in caso di instabilità del terreno. Eccessive quantità di schiume favoriscono l'accumulo di bolle d'aria nella zona di calotta con conseguente decadimento della contropressione.	Può essere necessario variare la viscosità della bentonite per la formazione del cake in funzione delle mutevoli condizioni "geo" al fronte di scavo. La elevata permeabilità del terreno può essere causa di notevoli consumi o perdite di bentonite con conseguente rischio di instabilizzazione del fronte. In caso di instabilità la mancanza di materiale addensato al fronte può rendere possibile la formazione di bolle di bentonite che tendono a risalire nella torbida riducendone la capacità di contrasto nella zona di calotta.
<b>Deformazioni del fronte</b>	La qualità/quantità di schiume e/o polimeri condiziona fortemente la capacità di controllo della contropressione e quindi della stabilità del fronte.	La presenza di grandi vuoti può causare perdita di bentonite con conseguente rischio di instabilizzazione del fronte (terreni a scarsa cementazione e granulometria grossolana oppure cavità di dissoluzione od artificiali quali sondaggi non intasati, pozzi, gallerie ecc.).
<b>Cedimenti in superficie</b>	L'entità dei cedimenti in superficie è gestita attraverso sia il controllo della contropressione al fronte sia il tempestivo intasamento – man mano che si sfilava lo scudo – mediante iniezioni (longitudinali a pressione, portata e volume controllati) di apposite torbide (tendenzialmente malte) per l'intasamento del vano anulare all'estradosso dei conci.	L'entità dei cedimenti in superficie è gestita attraverso sia il controllo della contropressione al fronte sia il tempestivo intasamento – man mano che si sfilava lo scudo – mediante iniezioni (longitudinali a pressione, portata e volume controllati) di apposite torbide (tendenzialmente malte) per l'intasamento del vano anulare all'estradosso dei conci.
<b>Raggi di curvatura possibili</b>	I possibili raggi di curvatura minimi dipendono dalla lunghezza del più lungo spezzone monolitico dello scudo, dalle articolazioni dello scudo (tipo, angolo di deflessione, numero), dalla lunghezza dell'anello di conci, dal sovrastavo eseguibile (in modo orientato). Il più grande spazio anulare risultante tra profilo di scavo ed estradosso dello scudo nell'ambito della curva deve essere mantenuto vuoto di materiale rigido e resistente pena l'incastramento dello scudo stesso.	L'incremento di spazio anulare tra profilo di scavo ed estradosso scudo necessario per affrontare le curve può causare perdite di bentonite verso la parte posteriore (coda) ed eventualmente ingresso di bentonite in macchina e, quindi, in galleria.
<b>Trasporto del marino</b>	Può essere attuato con treni o con nastro trasportatore	Lo smarino è idraulico, utilizzando il fango bentonitico in circuito chiuso. È raccomandabile una doppia linea di tubi.
<b>Marino</b>	Può essere necessario prevedere il deposito temporaneo del materiale smarinato per renderlo trasportabile. Dopo tale periodo il marino può essere utilizzato (es. inerte per calcestruzzi), ma può essere necessario un impianto di lavaggio posizionato anche lontano dal cantiere, per asportare i residui indesiderati degli additivi di condizionamento.	È necessario un impianto di separazione tra bentonite e terreno scavato, posizionato all'esterno ed a distanza appropriata dall'imbocco. La bentonite esausta, per le sue caratteristiche di bassissima resistenza al taglio, è problematica da stoccare in discarica e va, per quanto possibile, riciclata.
<b>Lavoro in camera di scavo pressurizzata sotto falda</b>	È indispensabile un team di lavoro altamente qualificato per le operazioni di svuotamento della camera di scavo per entrare nella stessa, che è sotto pressione d'aria. Può essere necessario prevedere bentonite per il supporto del fronte (cake) in caso di ingresso in camera di scavo. Esiste comunque la possibilità di perdita d'aria attraverso il cake. Ove necessario, a causa dei rischi di fuga dell'aria o della necessità di pressioni eccessive, si ricorre al preventivo consolidamento e stagnatura del terreno operando dalla superficie del suolo (iniezioni; congelamento) ove possibile.	È indispensabile un team di lavoro altamente qualificato per le operazioni di svuotamento della camera di scavo per entrare nella stessa, che è sotto pressione d'aria. Può essere necessario prevedere bentonite per il supporto del fronte (cake) in caso di ingresso in camera di scavo. Esiste comunque la possibilità di perdita d'aria attraverso il cake. Ove necessario, a causa dei rischi di fuga dell'aria o della necessità di pressioni eccessive, si ricorre al preventivo consolidamento e stagnatura del terreno operando dalla superficie del suolo (iniezioni; congelamento) ove possibile.
<b>Presenza di trovanti nel terreno</b>	La dimensione massima dei trovanti condiziona la scelta del diametro coclea: ipotizzando $d_{max\ trov} = 300/350\text{mm}$ $d_{cocl} = 1000\text{mm}$ . Trovanti di dimensioni maggiori devono essere movimentati a mano (ingresso in camera di scavo e loro demolizione).	Le tubazioni di evacuazione vincolano la dimensione massima dei trovanti "smarinabili". E' possibile installare un frantumatore davanti alla griglia di ingresso della condotta di evacuazione.
<b>Testa ed utensili di scavo</b>	L'abrasività e le problematiche di intasamento sono ridotte dall'uso di schiume.	L'abrasività e le problematiche di intasamento sono ridotte dall'uso di bentonite.

Tabella V – Confronto di caratteristiche e di problematiche di impiego di EPBS e HS (Pelizza, comunicazione personale).

Table V – Comparison of the characteristics and the problem for the use of EPBS and HS (Pelizza, personal communication)



Tipologia TBM Tipo di Terreno	Valore di N nelle prove SPT	Contenuto d'acqua o permeabilità	Modalità di scavo in aperto		Modalità di scavo a contropressione (closed type)					
			Scavo meccanico		Scudi a contropressione di terra - Earth Pressure Balance Shield		Scudi a contropressione di fango Slurry shield			
					A contropressione di terra	A contropressione di fango ad alta densità				
Argille depositate	0 – 5	300% – 50%	▲	- Carenza di stabilità del fronte - Subsidenze	■	- Difficoltà in argille estremamente scadenti - Controllo del volume del terreno smarinato	-	- La contropressione di terra è maggiormente indicata	▲	- Difficoltà in argille estremamente scadenti - Necessità di impianto di trattamento dello slurry
Argille di trasporto	7 – 20	W < 50%	■	- Esistenza di falde in banchi sabbiosi - Bloccaggi nella camera di scavo	■	- Liquidità del terreno - Controllo del volume del terreno smarinato	-	- La contropressione di terra è maggiormente indicata	■	- Necessità di impianto di trattamento dello slurry
Rocce tenere (argilliti)	> 50	W < 20%	■	- Esistenza di falde in banchi sabbiosi - Usura degli utensili	-	- La contropressione di terreno con slurry è più indicata in presenza di falda in banchi sabbiosi	-	- Utilizzabile in presenza di falda in banchi sabbiosi	-	- Utilizzabile in presenza di falda in banchi sabbiosi
Sabbie sciolte	5 – 30	10 <sup>-2</sup> – 10 <sup>-3</sup> (cm/s)	☞	- Instabilità del fronte	▲	- Limitata percentuale di fini	■	- È richiesto un controllo dello scavo molto accurato	■	- È richiesto un controllo dello scavo molto accurato - Controllo della qualità del fluido bentonitico
Sabbie dense	> 30	10 <sup>-3</sup> – 10 <sup>-4</sup> (cm/s)	▲	- Instabilità del fronte - Livello della falda, permeabilità	▲	- Limitata percentuale di fini	■	- Usura degli utensili - Dosaggi degli additivi	■	- Controllo della qualità del fluido bentonitico
Sabbie ghiaiose	> 30	10 <sup>0</sup> – 10 <sup>-2</sup> (cm/s)	▲	- Instabilità del fronte - Livello della falda, permeabilità	▲	- Limitata percentuale di fini	■	- Usura degli utensili - Dosaggi degli additivi	■	- Perdita del fango bentonitico nel terreno - Frantumatore per la ghiaia - Sistema di trasporto del fluido
Sabbia e ghiaia con ciottoli	> 50	10 <sup>0</sup> – 10 <sup>-1</sup> (cm/s)	☞	- Instabilità del fronte - Frantumazione dei ciottoli - Usura degli utensili e della testa di scavo	▲	- Limitata percentuale di fini - Frantumazione dei ciottoli - Usura degli utensili e della testa di scavo - Dimensione dei ciottoli p assanti nella coclea	■	- Usura degli utensili - Frantumazione dei ciottoli - Dimensione dei ciottoli passanti nella coclea	▲	- Perdita del fango bentonitico nel terreno - Frantumatore per i ciottoli - Sistema di trasporto del fluido
Applicabilità in caso di cambiamento del tipo di terreno				È impossibile cambiare il sistema di scavo	Possibile Sono necessari impianti di iniezione di additivi	Possibile In generale è largamente applicabile per varie condizioni di terreno		Possibile In generale è largamente applicabile per varie condizioni di terreno		Possibile In generale è largamente applicabile per varie condizioni di terreno

Note: ■ Applicabile ▲ Applicabilità è condizionata da aspetti particolari ☞ Non applicabile

Tabella VI - Applicabilità delle diverse tipologie di scavo meccanizzato in funzione del tipo di terreno (tradotta da ITA/AITES, 2000).

Table VI – Field of application for various full face excavation techniques (translated from ITA/AITES, 2000).

<b>Effetto richieste</b>	<b>Criticità</b>	<b>Caratteristiche geotecniche del terreno condizionanti</b>	<b>Caratteristiche richieste all'additivo</b>	<b>Indagini geotecniche</b>	<b>Indagini globali sul terreno condizionato</b>
Uniformità della pressione del terreno condizionato nella camera di condizionamento	- Locali insufficienze di contropressione al fronte - Punti con contropressione eccessiva	Terreni con un quantitativo di fini insufficiente	- Comportamento "pastoso" ed omogeneo del terreno condizionato - Riduzione attrito interno del terreno condizionato; - Fluidificazione del terreno condizionato	- Distribuzione granulometrica - Limiti di Atterberg	- Prove per verificare la lavorabilità del terreno condizionato
Controllo del flusso dell'acqua dal terreno verso la camera di condizionamento	- Forze di filtrazione instabilizzanti del fronte - Venute d'acqua eccessive in camera di condizionamento - Difficoltà nel maneggiamento del marino	Terreni ad alta permeabilità sotto falda	- Proprietà impermeabilizzanti	- Distribuzione granulometrica - Regime idrogeologico	- Prove di permeabilità sul terreno condizionato
Garanzia di un omogeneo flusso del terreno condizionato attraverso la testa, la camera di condizionamento e la coclea	- Possibili intasamenti delle aperture della testa di scavo - Arresto dell'avanzamento e difficoltoso riavvio della macchina.	Terreni fini con presenza di argille con elevata collosità (sticky clay).	- Riduzione dell'effetto dell'addensamento dell'argilla scavata - Riduzione dell'adesione del terreno condizionato sulle parti metalliche della testa.	- Distribuzione granulometrica - Regime idrogeologico, - Mineralogia del terreno, - Limiti di Atterberg	- Prove di adesione - Prove di miscelazione del terreno condizionato
	- Difficile controllo dell'estrazione del materiale con la coclea e conseguente difficile controllo della pressione in camera di condizionamento	Terreni a granulometria grossolana senza coesione  Terreni con un quantitativo di fini insufficiente	- Comportamento "pastoso" ed omogeneo del terreno condizionato - Proprietà fluidificanti	- Distribuzione granulometrica	- Prove di estrazione controllata del terreno condizionato
Riduzione della potenza richiesta alla testa	Manutenzione ordinaria e straordinaria per sovrautilizzo della macchina a causa di una richiesta continuativa di potenza elevata	Terreni con presenza di fini a coesione elevata con tendenza alla ricompattazione in camera di scavo.	- Riduzione dell'effetto di ri-addensamento dell'argilla scavata - Riduzione dell'adesione del materiale sulle parti metalliche della testa.	- Distribuzione granulometrica, - Limiti di Atterberg	- Prove di miscelazione del terreno condizionato; - Prove penetrometriche sul terreno condizionato per quantificare la riduzione della coesione rispetto al terreno naturale
Riduzione degli attriti e dell'usura degli utensili, della testa e del sistema di smarino	- Frequente sostituzione degli utensili - Usura della coclea - Aumento della temperatura alla testa - Usura delle parti meccaniche	Terreni con un'alta percentuale di quarzo  Terreni con un alto angolo di attrito interno, sabbie e ghiaie	Riduzione dell'attrito del terreno condizionato	- Distribuzione granulometrica - Mineralogia del terreno	- Prove di taglio sul terreno condizionato

*Tabella VII – Criticità nello scavo con EPB e indagini sul terreno naturale e su quello condizionato (Peila, 2005, Vinai et al. ).*

*Table VII – Critical points in EPB tunnelling and related investigations on the conditioned and natural soil (Peila, 2005, Vinai et al. 2006)*

