

Presentazione dell'attività della commissione IAEG Italia: Raccomandazioni per la quantificazione dell'affidabilità del modello geologico applicato alla progettazione di grandi opere civili

Antonio Dematteis

SEA Consulting s.r.l.,
Via Cernaia 27, I – 10121 Torino,

1. Introduzione

La conoscenza della complessità geologica del sottosuolo è alla base di qualsiasi strategia di progettazione e di costruzione delle grandi opere di ingegneria civile, particolarmente importante risulta quindi il Modello Geologico di Riferimento (MGR), che rappresenta uno strumento di decisione necessario per progettare, affinare analisi di rischio e ottimizzare i costi di realizzazione e di esercizio delle opere.

Le strutture geologiche sono generalmente complesse e per la maggior parte non osservabili direttamente; per questi motivi è possibile affermare che nella grande maggioranza dei casi una previsione completamente affidabile delle condizioni geologiche, geotecniche e idrogeologiche dell'opera non è possibile. Nella cultura anglosassone è già chiarito da tempo (Essex, 1997) che "Mother Nature" did not create subsurface conditions in accordance with a materials properties handbook, nor do geotechnical engineers (or any other participants in the process) have magical predictive powers. The design and construction process must account for the variability of subsurface conditions, and for potential project costs associated with that variability.

Poiché l'eliminazione totale dell'incertezza non è ragionevolmente

Le strutture geologiche in natura normalmente sono complesse e per la maggior parte non possono essere osservate direttamente; per questi motivi, nella maggior parte dei casi, una previsione del tutto affidabile delle condizioni geologiche, idrogeologiche e geotecniche non è possibile. Tuttavia, la conoscenza della complessità della geologia del sottosuolo è necessaria in qualsiasi progettazione e costruzione di grandi opere di ingegneria civile. In questo senso il modello di riferimento geologico e la quantificazione della sua affidabilità, sono strumenti necessari per progettare queste opere, per ridurre i rischi e per ottimizzare i costi di realizzazione. Queste raccomandazioni sono state redatte dalla commissione tecnica della Sezione Italiana dell'International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG). Esse sono redatte ad uso di tutti gli operatori tecnici del settore, come le imprese di costruzione, i progettisti, i Committenti e gli Enti pubblici di controllo.

Parole chiave: modello geologico di riferimento, quantificazione dell'affidabilità, grandi opere, rischio geologico, rischio contrattuale.

Presentation of the activity of the IAEG Italian chapter commission on: Recommendations for reliability quantification of the geological model applied to large civil engineering projects. Geological structures are normally complex and for the major part cannot be directly observed, for these reasons in most cases, a fully reliable prediction of the geological, hydrogeological and geotechnical conditions is not possible. In the other hand, the knowledge of the complexity of subsurface geology is needed in any design and construction of major civil engineering projects. For this purpose, the Reference Geological Model and the quantification of its reliability are the decision tool required to design, to reduce risk and to optimize operational costs. These recommendations have been written by the Technical Committee of the Italian Section of the International Association for Engineering Geology and the Environment (IAEG). They are prepared for use by all the professionals in the industry, such as construction companies, designers, owners and Public Agencies.

Key words: geological reference model, reliability quantification, large civil works, geological risk, contractual risk.

Présentation des activités de la commission AIGI Italie: Recommandations pour la quantification de la fiabilité du modèle géologique appliqué à l'étude de grand ouvrages de génie civil. Les structures géologiques très souvent sont complexes et, pour la plupart, ne peuvent pas être observé directement; pour ces raisons, dans la plupart des cas, une prédiction totalement fiable conditions géologiques, hydrogéologiques et géotechniques n'est pas possible. Cependant, la connaissance de la complexité de la géologie du sous-sol est nécessaire dans toute conception et construction de grands projets de génie civil. En ce sens, le modèle géologique de référence et la quantification de sa fiabilité, sont des outils nécessaires à la conception de grands

"L'articolo riprende la presentazione avvenuta nell'ambito di Geoitalia 2011 (Torino, 19-23 settembre 2011), Sessione E1, "La geologia e l'idrogeologia applicata alle grandi opere civili", svoltasi con il patrocinio della Commissione Tecnica IAEG Italia "Reliability quantification of the Geological Model in large civil engineering projects".

travaux de génie civil, pour réduire les risques et pour optimiser les coûts de mise en œuvre. Ces recommandations ont été élaborées par le Comité technique de la section italienne de l'Association internationale de géologie de l'ingénieur et de l'environnement (AIGI). Ils sont préparés pour être utilisés par tous les professionnels du secteur, tels que les entreprises de construction, les concepteurs, les propriétaires et les organismes publics de contrôle.

Mots clé: modèle géologique de référence, quantification de la fiabilité, grands travaux, risque géologique, risque contractuel.

possibile, occorre definire un corretto approccio per la sua quantificazione.

Nel campo dell'*engineering geology* questa quantificazione è una pratica non frequente poiché di difficile realizzazione. In alcuni casi viene fornito un giudizio soggettivo, ad esempio lungo il profilo geologico sono distinte tratte con grado di affidabilità delle previsioni omogeneo. Esso è normalmente suddiviso in classi (ad es. buona, media, scarsa). Tuttavia, questa informazione sovente appare oscura e poco o per nulla utilizzabile per chi deve realizzare il progetto. Non risulta chiaro quali siano i parametri che governano questo giudizio; e più importante, non è facile capire quali conseguenze una affidabilità buona o scarsa possa avere sulla costruzione dell'opera. Queste incomprensioni possono anche portare a seri rischi di sottostima o sovrastima dei tempi e dei costi di realizzazione, a rischi ambientali o a errate scelte progettuali, metodologiche per l'esecuzione dei lavori o finanziarie legate all'opera.

Più in generale, infatti, la quantificazione dell'affidabilità del modello geologico, geomeccanico e idrogeologico rientra nel processo di analisi di rischio dell'opera, che deve essere affrontato nell'ambito di una collaborazione tra il geologo, il progettista e il committente.

Un esempio proveniente dal campo delle gallerie mostra come la quantificazione dell'affidabilità del modello geologico sia già riconosciuta quale passaggio chiave propeudeutico all'analisi di rischio. Le linee guida per la gestione del rischio in galleria (International Tunnelling Insurance Group, 2006 e ITA/AITES, 2004) prevedono di analizzare, in sequenza cronologica:

- quantificazione dell'affidabilità del modello geologico
- quantificazione dell'affidabilità del modello geomeccanico e idrogeologico
- analisi di rischio (costi/tempi) secondo un criterio economico
- individuazione punti nuove indagini (revisione del rischio)

Inoltre, questa sequenza di fasi non è un evento unico e definitivo ma è un processo di approfondimento ciclico e a stadi successivi. Esso, infatti, deve procedere di pari passo con il processo di sviluppo progettuale e deve definire il livello di affidabilità del Modello Geologico di Riferimento (MGR) in base ai dati geologici (I.s.) disponibili a ciascuno stadio di sviluppo progettuale. In realtà, ogni fase di miglioramento del MGR deve sempre precedere la corrispondente fase di approfondimento progettuale in quanto è solamente in base all'aumentato livello di conoscenze geologiche (I.s.) che è possibile meglio definire i contenuti progettuali.

L'obiettivo è di seguire, nel limite del possibile, un processo di quantificazione che possa essere ripercorribile e trasparente per tutti gli attori dei progetti (progettisti, costruttori, finanziatori, Enti di controllo).

Nella parte finale verranno analizzati anche gli aspetti di identificazione degli scenari di rischio e degli effetti di un miglioramento del MGR nella modifica delle probabilità di accadimento di ciascuno scenario.

1.1. Oggetto della raccomandazione e definizioni

“Definizione di raccomandazioni per la quantificazione dell'affidabilità del

Modello Geologico di Riferimento per la progettazione di grandi opere civili”.

Le raccomandazioni devono indicare quali sono i criteri e parametri indispensabili per valutare e documentare il grado di affidabilità del modello geologico, nonché i criteri per verificare in corso d'opera la rispondenza delle previsioni rispetto alla realtà incontrata. Esse prendono in considerazione le Norme ISO e le raccomandazioni proposte dalla *International Society for Rock Mechanics* (ISRM) e dalla *International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering* (ISSMGE).

La quantificazione deve essere fatta mediante l'applicazione di metodi ben definiti e ripercorribili. Essi possono essere, ad esempio, di tipo classificativo (come le classificazioni degli indici della roccia che comunemente si utilizzano in geomeccanica, quali RQD, RMR, ecc...), oppure di tipo probabilistico, basati sull'analisi statistica dei dati e modellazioni matematiche (numeriche). Nel quantificare l'affidabilità di un modello geologico si dovrà inoltre fare un corretto riferimento ai due concetti di affidabilità e di modello geologico.

L'affidabilità è il grado di rispondenza di un modello geologico alla realtà. In fase di progetto il grado di affidabilità sarà attribuito sulla base delle analisi eseguite e sarà verificato durante l'esecuzione dell'opera. La scala dell'analisi è sempre da definire. L'affidabilità è il contrario dell'incertezza, che si esprime in termini di esistenza, localizzazione e significato di un determinato elemento geologico presente all'interno del modello di previsione.

Il modello geologico di riferimento (MGR) è una ricostruzione concettuale dell'assetto geometrico tridimensionale e della successione temporale e spaziale degli eventi geologici che caratterizzano una determinata porzione del sottosuolo. Esso è un costrutto logico che deriva dai dati oggettivi di superficie, di sottosuolo e di laboratorio, disponibili al momento in cui viene formula-

to. Esso è però anche soggettivo, in quanto deriva dall'interpretazione del tecnico che lo formula. Il modello è soggetto ad evolvere nel tempo in funzione dei nuovi dati che via via si rendono disponibili dopo la sua formulazione. I nuovi dati possono integrarsi in modo coerente o giustificare una revisione fino ad arrivare ad una sua vera e propria riformulazione (Venturini et al., 2001).

Per grandi opere civili si intendono, ad esempio, strade, ferrovie, impianti idroelettrici, con particolare riferimento alle opere in sotterraneo. L'aggettivo "grandi" distingue queste opere da edifici di importanza costruttiva corrente, costruzioni di grande semplicità, palazzi, case, edifici o costruzioni minori. A titolo di esempio, per le grandi opere si faccia riferimento alle categorie dalla IV in poi definite dal Ministero dei Lavori Pubblici.

1.2. Norme e raccomandazioni esistenti

AFTES GT32 (2012). Recommandation sur la caractérisation des incertitudes et des risques géologiques, hydrogéologiques et géotechniques.

ISRM (1975). Recommendations on Site Investigation Techniques

ISSMGE (2004). Guidelines for Professional Practice

ITA/AITES 2004. Accredited Material - Guidelines for tunneling risk management: International Tunnelling Association, Working Group No. 2 - Tunnelling and Underground Space Technology 19 (2004) 217-237.

ISSMGE (2005). Recommended procedure for geotechnical ground investigations

The International Tunnelling Insurance Group, 2006. The Joint Code of Practice for Risk Management of Tunnel Works

Essex R.J., 2007. Geotechnical Baseline Reports for Underground Construction, ASCE.

2. Processo di quantificazione dell'affidabilità

Si ritiene necessario dividere il processo logico di quantificazione dell'affidabilità del modello geologico nelle seguenti fasi, elencate in sequenza cronologica:

- raccolta e organizzazione dei dati
- analisi dei dati
- modello geologico di riferimento del progetto
- quantificazione dell'affidabilità

Tutte le fasi di questo processo dovrebbero essere descritte in un apposito rapporto che accompagna il progetto, avendo cura di distinguere i "fatti", le "interpretazioni" e i "giudizi". Un esempio classico di fatti è dato dalla carta geologica degli affioramenti, oppure delle stratigrafie dei sondaggi. L'interpretazione dei fatti, che beneficia anche delle informazioni pregresse che possono derivare da dati bibliografici, deve essere fatta per definire il modello geologico di riferimento del progetto, tipicamente esplicitato, ad esempio, mediante il profilo geologico. Sulla base dei fatti, delle interpretazioni e della propria esperienza il progettista esprime anche dei giudizi, come ad esempio la caratterizzazione idrogeologica di una zona di faglia non investigata direttamente. Questo tipo di informazioni devono essere fornite per completezza, ma devono essere evidenziate come "giudizi" per permettere, se del caso, di ometterle ad esempio da un Committente nei documenti di contratto per mancanza di riscontro diretto e per evitare che l'aggiudicatario si possa basare su di essi.

3. Raccolta e organizzazione dei dati

I dati raccolti e le procedure di trattamento dei dati vanno descritti, organizzati e distinti dalle interpreta-

zioni; deve essere preservata la loro rintracciabilità, garantendo che ogni dato o procedura di trattamento del dato sia ripercorribile e consultabile a posteriori.

Un esempio è dato dal progetto "Knowledge Base for representations and sharing of Geological informations" coordinato da F. Piana dell'Istituto CNR-IGG di Torino (<http://www.csg.to.cnr.it/r22.html>). Da questo esempio si possono trarre le seguenti indicazioni utili per la fase di raccolta ed interpretazione dei dati:

- formulare uno schema concettuale esaustivo e rigoroso, una struttura dati gerarchica, che contenga tutte le entità rilevanti, le relazioni esistenti fra di esse, le regole, gli assiomi ed i vincoli specifici degli approcci cognitivi e descrittivi che il geologo di terreno adotta nel raccogliere i dati (ontologia).
- Sviluppare un *Geological Knowledge Base* (GKB), ovvero uno strumento che permetta la definizione e la descrizione di dati geologici (oggetti), di processi (concetti) e di interpretazioni (ad esempio carte geologiche, sezioni e, più in generale, modelli geologici di riferimento)
- Sviluppare il database e il GKB in ambiente GIS, che rappresenta l'ambiente ideale per lo scopo prefissato, ovvero la gestione di dati geologici finalizzati alla realizzazione di grandi opere civili
- Definire la qualità del dato che viene immesso nel GKB, tenendo in considerazione l'incertezza legata all'acquisizione e interpretazione del dato di base

Questo approccio suggerisce di adottare una strutturazione attraverso schede di Metadati con lo standard europeo ISO19115.

4. Analisi dei dati

Affinché un'interpretazione possa essere valutata in ragione della sua affidabilità è necessario che i dati ed

i modelli concettuali a cui si è fatto riferimento per le interpretazioni vengano chiaramente riportati ed espressi. Ciò darà modo di valutare se essi siano più o meno appropriati ai fini da raggiungere.

La qualità e affidabilità dei dati geologici deve essere chiaramente espressa dato che influenza pesantemente l'affidabilità complessiva del MGR.

È evidente che i dati geologici non possiedono tutti la stessa affidabilità. Pertanto, si suggerisce la qualifica degli stessi sulla base della loro efficacia nel fornire informazioni certe. Qui di seguito è riportato un esempio di tipologie di indagini, ordinate da quelle che forniscono una affidabilità migliore, a quelle che offrono dati meno certi e, conseguentemente, una minore affidabilità del modello che su di esse si basa. Ogni qualifica di efficacia potrà poi essere adeguata alle specifiche esigenze di ciascuno singolo progetto:

- sondaggi a carotaggio continuo, cunicoli esplorativi;
- sondaggi a distruzione
- indagini geofisiche ad alta risoluzione, tarate su sondaggi;
- indagini geofisiche indirette, non tarate su sondaggi;

Anche la proiezione geologico-strutturale e la distanza dell'opera in progetto dal dato certo devono essere quantificate.

5. Modello geologico di riferimento (MGR)

Nel paragrafo 2.1 è fornita la definizione dell'MGR. L'assetto geologico è un prodotto della natura, è preesistente all'opera stessa, è molto più complesso di ogni materiale realizzato artificialmente ed è estremamente variabile da sito a sito.

Malgrado le intrinseche difficoltà di caratterizzazione, l'interazione opera - terreno deve essere studiata disponendo di adeguati "Modelli" del terreno. Tali modelli devono

identificare in primo luogo l'assetto geometrico tridimensionale e la successione temporale e spaziale degli eventi geologici che caratterizzano il sito di studio (MGR), in secondo luogo il comportamento meccanico dei terreni (Modello Geotecnico) e la circolazione delle acque sotterranee e dei gas (Modello Idrogeologico).

Un valido Modello Geotecnico e/o Idrogeologico non può esistere se preliminarmente non si dispone di un valido Modello Geologico di Riferimento.

I Modelli Geologico, Geotecnico ed Idrogeologico sono validi unicamente per uno specifico sito e non godono pertanto, in genere, delle virtù di estensibilità ad altre situazioni.

Inoltre, il MGR per definizione evolve nel tempo, con il procedere delle fasi progettuali, e la sua affidabilità varia conseguentemente con l'accrescere delle informazioni.

5.1. Fasi del MGR

Sin dal momento in cui è definita l'area in cui si intende insediare una certa opera è possibile predisporre un Modello Geologico Preliminare. Esso deve essere sufficientemente approfondito per valutare correttamente la fattibilità dell'opera, oppure per valutare le eventuali alternative di collocamento. La messa a punto di un valido Modello Geologico Preliminare è un'operazione concettualmente complessa, determinante per i successivi sviluppi della progettazione. La prassi attuale, che nel migliore dei casi prevede di accompagnare lo studio di fattibilità con una generica "relazione geologica", generalmente a carattere puramente descrittivo, non è certamente l'approccio più adeguato al problema.

L'estensore del Modello Geologico, oltre agli aspetti geologici non può ignorare i seguenti aspetti progettuali:

- le linee principali del progetto (es. tracciato, zona d'imbocco, in-

tersezione tra le opere);

- i vincoli o le opportunità che condizionano la realizzazione di quel progetto in quel sito specifico, ovvero il quadro d'insieme delle maggiori criticità del progetto legate alle caratteristiche del sito (es. ingombro delle opere, pendenza, funzionalità delle opere, interazione con il tessuto socio-economico del sito);
 - le eventuali flessibilità insite nella conformazione del progetto (ottimizzazione del progetto);
 - le rigidità (tecniche, economiche, temporali, ecc.) connesse con le modalità realizzative per le varie opere;
 - le possibilità di prendere in considerazione siti alternativi
 - i fattori ambientali, economici, politici che - anche qualora non vincolanti - possono influire sulla "finanziabilità" finale dell'opera;
- Inoltre, poiché il Modello Geologico rappresenta uno strumento di analisi propedeutico alla progettazione delle opere, durante la sua messa a punto è necessario che:
- i risultati raggiunti ad ogni tappa di avanzamento degli studi geologici siano discussi con il progettista delle opere e valutati alla luce dei paralleli sviluppi progettuali al momento da lui effettuati;
 - le criticità emerse dagli studi geologici siano tempestivamente valutate con lo stesso progettista;
 - il programma delle indagini sia, in ogni fase di attività, condiviso e concordato con il progettista;
 - il geologo comunichi la necessità di aumentare il dettaglio delle conoscenze nei settori con criticità particolari o che potrebbero essere utili ai fini di ottimizzare i tracciati e migliorare l'economicità delle Opere.

Ciò presuppone un'analoga disponibilità al colloquio degli altri soggetti interessati alla realizzazione delle opere (in particolare geologi, progettisti e costruttori), ciò non deve tradursi in confusione di competenze e di responsabilità, ma solo

condivisione culturale di problemi e piena volontà di collaborazione per la migliore riuscita dell'impresa.

Allo stesso tempo il geologo deve saper valorizzare il processo logico che lo ha portato alla formulazione del Modello attraverso una corretta presentazione dei dati. Il *Geological Knowledge Database* a sua disposizione deve permettere di illustrare ogni singolo momento del percorso decisionale, separando sempre in questo processo i dati dalle interpretazioni.

Un'effettiva e continua azione di dialogo e confronto interdisciplinare sia nell'ambito strettamente geologico, sia nell'ambito ingegneristico, con particolare attenzione a quello geotecnico, è premessa indispensabile per la messa a punto di un valido Modello Geologico.

5.2. Piano indagini

Se non si sa cosa cercare, difficilmente si trova quello di cui si ha bisogno. Per questo motivo le indagini di approfondimento devono essere guidate dal Modello Geologico e devono essere progettate per acquisire dati che consentano di restringere il campo delle interpretazioni possibili.

È illusorio pensare che all'inizio delle attività sia possibile definire un unico definitivo programma di indagini; tale programma deve essere flessibile sia nella tipologia, sia nelle dimensioni, sia nella durata e deve prevedere una o più fasi di approfondimento. Queste fasi devono ricadere lungo il percorso temporale del progetto in momenti non critici e devono essere dotate di un adeguato budget economico.

L'area da indagare deve essere intesa come quell'area all'interno della quale la realizzazione di indagini risulta utile alla formulazione dell'MGR. In questo senso essa può essere anche molto più estesa di quella del sito delle opere da realizzare. Può essere talora necessario e conveniente eseguire indagini dirette anche al di fuori del sito di interesse; ad

esempio, è possibile indagare sulle caratteristiche di una struttura di estensione regionale che è possibile incontrare durante la realizzazione delle opere (es. fascia di taglio di grande importanza), mediante indagini dirette in una zona situata a grande distanza dal sito stesso, in cui essa è sub – affiorante. Anche i fenomeni di ricarica degli acquiferi, che possono avere luogo anche molto distanti dal sito delle opere, vanno adeguatamente studiati in un intorno significativo, che può includere anche, in ambiente montano, una o due valli limitrofe. È questo il caso, ad esempio di acquiferi carsici o legati a strutture plicative di importanza regionale.

Le indagini indirette (ad esempio geofisiche) possono essere molto utili e possono consentire risparmi nei costi e nei tempi; in contesti geologici complessi l'interpretazione dei dati da loro ottenuti non può però essere accettata senza una verifica attraverso qualche indagine diretta.

L'approfondimento dell'indagine geologica è finalizzata all'aumento dell'affidabilità del modello; tuttavia, il miglioramento dell'affidabilità non è sempre direttamente legato alla quantità di indagini. Ad esempio, in determinati casi nuovi rilevamenti geologici o nuovi sondaggi non porteranno a significativi aumenti dell'affidabilità del modello. In altri casi piccoli investimenti in ulteriori indagini possono generare un sensibile miglioramento dell'affidabilità.

Ad ogni stadio di sviluppo progettuale ed alla corrispondente quantificazione dell'affidabilità del MGR deve seguire un'analisi degli scenari (es. valutazione della probabilità di due diverse interpretazioni geologiche) e della convenienza o meno di eseguire nuove indagini. Ciò avverrà tramite un confronto tra il costo delle nuove indagini e il costo aggiuntivo dell'opera legato all'incertezza del MGR.

Non può esistere una regola precisa che definisca la soglia oltre la quale la spesa per nuove indagini

non è più giustificata, tuttavia, è ragionevole porre tale limite facendo riferimento al rapporto tra il costo delle nuove indagini e la variazione di costo dell'opera dipendente direttamente o indirettamente dall'incertezza del MGR. Ad esempio, quando questo rapporto è inferiore a 0,1 le indagini aggiuntive paiono, generalmente, giustificabili (Costo indagini / costo incertezza < 0,1).

6. Quantificazione dell'affidabilità

6.1. Metodi esistenti in letteratura

Nella letteratura scientifica internazionale sono presentate diverse metodologie per la quantificazione dell'incertezza geologica, che possono essere suddivise in tre macrocategorie a seconda del soggetto di analisi.

1. Affidabilità delle proprietà meccaniche delle rocce e degli ammassi rocciosi (Gilles, 2005a; Gilles 2005b; Miranda, 2009; Ruffolo, 2009; Sari, 2009): si tratta della variabilità intrinseca dei materiali geologici (resistenza a compressione, densità di fratturazione, permeabilità, abrasività ecc) e per ogni analisi e/o parametro dovranno essere chiaramente evidenziati almeno:
 - a. il modello teorico di riferimento,
 - b. la metodologia di analisi,
 - c. gli intervalli di esistenza e la loro distribuzione statistica.
2. Affidabilità spaziale delle indagini geognostiche (Cetin, 2004; Demougeot-Renard; Duncan, 2000; Perello et alii, 2005; Pine, 2005) si tratta di valutare la variabilità di ciascun determinato parametro all'interno dello stesso corpo geologico omogeneo e di definirne l'affidabilità, precisando:
 - a. punti di controllo (affioramen-

- ti, sondaggi, cunicoli, ecc),
 - b. dati strutturali (misure di affioramento, orientazioni in sondaggio, ecc),
 - c. interpretazioni utilizzate per la proiezione spaziale dei dati (sezioni geologiche, linee sismiche e modello di velocità utilizzato, ecc),
 - d. procedure di interpolazione, geostatistica e variogrammi utilizzati.
3. Visualizzatori 3D e modelli numerici spaziali (Mallet J.L. 1997; Bistacchi et.alii, 2008; Lajaunie et alii, 1997; Pomian-Srzednicki, 2001; Tonini et alii, 2008). Descrivendo la metodologia che porta alla costruzione del modello numerico, questi approcci permettono di quantificare la variabilità della posizione dei limiti geologici all'interno del modello stesso. Per ottenere questo risultato vengono esplicitati i seguenti punti:
- a. dettagliata descrizione dell'algoritmo matematico alla base del software di costruzione del modello geologico,
 - b. elenco dei dati di in-put (punti di controllo, sezioni geologiche definite dall'operatore),
 - c. verifica del livello qualitativo assegnato ad ogni dato d'ingresso,
 - d. definizione degli intervalli d'incertezza di ogni dato d'ingresso (es. dati derivanti da dati sperimentali o assegnati dall'operatore),
 - e. esplicitazione delle eventuali routine di costruzione prodotte dall'operatore,
 - f. se gli intervalli d'incertezza dei limiti dei corpi geologici sono il risultato della modellazione o sono introdotti dall'operatore.

6.2. Raccomandazioni generali

La filosofia ispiratrice di questa raccomandazione suggerisce di utilizzare il più possibile metodiche che

si basano su criteri oggettivi, trasparenti e ripercorribili.

Un qualsiasi metodo oggettivo di valutazione quantitativa dell'affidabilità deve basarsi su un meccanismo teorico da tarare attraverso l'analisi oggettiva di casi reali, in cui i fattori appaiano ben documentati. In questo senso appare opportuno procedere per tentativi in sede di ricerca scientifica.

- In generale si ritiene che:
- L'affidabilità di un modello geologico di riferimento vada sempre riferita allo stadio di approfondimento progettuale al quale esso si riferisce.
 - Nella definizione dell'affidabilità è fondamentale usare termini quantitativi e verificarne la coerenza con tutti i documenti progettuali.
 - Gli elementi che descrivono l'affidabilità (o l'incertezza) sono tre: esistenza, localizzazione e significato.
 - L'affidabilità del Modello Geotecnico, o del Modello Idrogeologico deve essere messa in relazione all'affidabilità del Modello Geologico
- Da un punto di vista più specifico la formulazione del MGR deve tenere conto dei seguenti aspetti:
- dal punto di vista concettuale, l'area da indagare deve essere intesa come quell'area all'interno della quale la realizzazione di indagini risulta utile alla formulazione dell'MGR. L'area d'indagine deve sempre essere estesa in senso parallelo alle strutture regionali dei modelli geologico (es. grandi strutture plicative) geotecnico (es. taglio zone di faglia o di fratturazione di grande importanza) idrogeologico (es. aree di ricarica degli acquiferi).

- in un elaborato geologico dedicato dovranno essere chiaramente evidenziate le macro aree a vario grado d'incertezza, esplicitando per ciascuna di esse il motivo del diverso grado di incertezza. I criteri per guidare tale classificazione

dovranno tenere conto almeno dei seguenti aspetti:

- disponibilità e densità di indagini dirette (sondaggi, cunicoli, ecc) indirette (linee geofisiche, copertura e scala delle fotoaeree, ecc)
- omplexità geologico - strutturale (es. complesso metamorfico deformato o struttura sedimentaria non deformatata) percentuale di copertura quaternaria ed evidenze geomorfologiche, copertura topografica, ecc
- infine, dovrà essere valutata la possibilità o meno di interpretazioni del sottosuolo secondo modelli concettuali differenti, sempre coerenti con i dati a disposizione (es. presenza in letteratura di interpretazioni diverse dello stesso settore).

6.3. Elaborati finali

L'approccio metodologico deve essere quello di indicare l'intervallo di variabilità e il livello d'incertezza del MGR, allo stesso tempo però, di dichiarare quali sono le condizioni del sottosuolo più probabili finalizzate all'estensione dei documenti contrattuali. Questo consentirà di individuare i rischi e di definire la loro allocazione tra Proprietario e Appaltatore (cfr. § 6.5).

Allo stesso modo del MGR, gli elaborati grafici e testuali che lo descrivono devono essere aggiornati di pari passo con l'approfondimento delle conoscenze; si suggerisce, per quanto possibile, di mantenere lo stesso numero di elaborati e di utilizzare estensivamente l'identificazione delle revisioni.

La rappresentazione del modello deve essere supportata da sezioni geologiche verticali e orizzontali, che raffigurano l'ipotesi geologica ritenuta più probabile. In questi elaborati devono essere evidenziate le diverse criticità geologiche riscontrate (es. zone di faglia o zone di più intensa fratturazione, frane, gas nocivi,

caratteristiche mineralogiche particolari, venute d'acqua ecc.), alle quali deve essere associato un grado di probabilità di accadimento. Allo stesso modo, devono essere riportati i valori delle qualità meccaniche e idrogeologiche per ciascun settore di galleria secondo l'ipotesi più probabile.

Le eventuali interpretazioni geologiche alternative, sempre plausibili e coerenti con i dati a disposizione, ma ritenute meno probabili, possono essere rappresentate a parte, anch'esse con sezioni geologiche orizzontali e verticali, indicando gli intervalli di esistenza dei limiti geologici, delle faglie, ecc, gli intervalli delle caratteristiche meccaniche delle rocce e degli ammassi rocciosi e le criticità geologiche previste per ciascun settore.

Il rapporto testuale descrittivo deve descrivere in dettaglio il processo che ha portato alla o alle elaborazioni grafiche, l'elenco delle incertezze e delle criticità geologiche individuate e deve dettagliare qual è stata l'evoluzione temporale del MGR.

Il *Joint Code of Practice for Risk Management of Tunnel Works (ITIG, 2006)* prevede una procedura di gestione dei rischi accompagnata da *test* di sensibilità sui costi e sui tempi per determinare e valutare i prevedibili scenari economici e temporali in funzione dei rischi che ciascuna scelta progettuale comporta ed assegnare a ciascuno di questi un preciso livello di confidenza. In questi *test* dovranno anche essere valutati gli effetti di possibili misure per evitare o minimizzare i rischi identificati.

6.4. Imprevisto geologico

È auspicabile una crescita culturale, alla quale si riferisce anche questo lavoro, che permetta di abbandonare il concetto di "imprevisto geologico", largamente presente nella giurisprudenza italiana e sovente richiamato in ambito legale e contrattuale.

La definizione di prevedibilità o imprevedibilità di un certo contesto geologico diventa importante e può essere formulata sia da un punto di vista "tecnico, geologico" che da un punto di vista legale e contrattuale:

- Approccio tecnico (geologico): Una previsione geologica totalmente scevra da incertezze non esiste. Poiché l'eliminazione totale dell'incertezza non è ragionevolmente possibile, occorre una sua quantificazione.
- Approccio gestionale (legale, contrattuale): L'affidabilità del Modello non esclude il principio di imprevedibilità geologica, anzi ne esalta il concetto, in quando se il modello (ritenuto) dimostrabilmente affidabile non è stato in grado di prevedere un elemento geologico, quest'ultimo diventa di fatto imprevedibile. La dimostrabilità dell'assunto di affidabilità diventa pertanto un elemento fondamentale nel processo decisionale progettuale non solo in termini tecnici ma anche in termini contrattuali.

Il modello geologico identificato come realistica ipotesi costruttiva (MGR), unitamente alla quantificazione dell'affidabilità, deve essere inserito nei documenti contrattuali, per costituire il documento di confronto e verifica in corso d'opera e a consuntivo e determinare il verificarsi o meno delle condizioni di "imprevisto geologico".

6.5. Ripartizione del rischio geologico in fase contrattuale

Il MGR rappresenta una definizione contrattuale di ciò che si assume sarà incontrato durante lo scavo. L'inserimento del MGR nei documenti contrattuali non è una garanzia che le condizioni del sottosuolo saranno esattamente quelle previste ma una garanzia del fatto che le reali condizioni verranno confrontate con il MGR e, in base a quello, definito lo scostamento dalle previsioni.

In quest'ottica, il livello di approfondimento del MGR e la quantificazione della sua affidabilità sono gli elementi necessari per valutare il livello di rischio geologico durante le fasi di costruzione dell'opera.

In fase di definizione del contratto per la realizzazione dell'opera, la ripartizione dei costi legati al rischio geologico tra il proprietario dell'opera e l'appaltatore (*risk shearing*) è quindi resa possibile proprio dalla conoscenza di questi elementi.

Questo approccio è indicato dal già citato GBR (Essex, 1997), ed è qui ricordato poiché favorisce il migliore controllo dei tempi e dei costi esecutivi delle grandi opere di ingegneria civile.

7. Prospettive

Al termine dei lavori di stesura delle raccomandazioni descritte sopra, il gruppo italiano che le ha prodotte ha deciso di proporre l'istituzione di una Commissione IAEG a livello internazionale. A questo proposito è stata approvata dal Council meeting dell'IAEG del 7 settembre 2009 a Chengdu (Cina) la nuova Commissione, denominata C28 - *Reliability quantification of the geological model in large civil engineering projects*, che è ora attiva sotto la direzione del dott. Luca Soldo.

In particolare, alcuni suggerimenti che la commissione italiana ha ritenuto interessanti da approfondire sono i seguenti: (i) definire gli standard e le procedure di raccolta, certificazione e controllo qualità del dato geologico, (ii) sviluppare nuovi metodi per la quantificazione dell'affidabilità delle previsioni geologiche (a questo riguardo si veda ad esempio AFTES, 2012), (iii) verificare i metodi mediante il confronto con casi reali e (iv) quantificare l'apporto di conoscenza che ogni singola indagine geologica ha sul progetto specifico.

Bibliografia

- AFTES GT32 (2012). Recommandation sur la caractérisation des incertitudes et des risques géologiques, hydrogéologiques et géotechniques. *Tunnels et Espace Souterrain* - n°232 – pp.274-314.
- BAECHER G. B., CHRISTIAN J. T. (2003). Reliability and statistics in geotechnical engineering. J. Wiley & Sons, London.
- BIANCHI, G.W., PERELLO, P., VENTURINI, G., DEMATTEIS, A., DELLE PIANE, L AND DAMIANO, A. (2006). Determination of reliability in geological forecasts for tunnel projects: the method of the R-index and its application. XIth International Congress for Mathematical Geology in Liege, 3-8 September, 2006.
- BISTACCHI A., MASSIRONI M., DAL PIAZ G.V., DAL PIAZ G., MONOPOLI B., SCHIAVO A., TOFFOLON G. (2008). 3D fold and fault reconstruction with an uncertainty model: An example from an Alpine tunnel case study. *Computers & Geosciences* 34 2008, 351–372.
- CETIN KO, SEED R.B., DER KIUREGHIAN A., TOKIMATSU K., HARDER L.F., KAYEN R.E., MOSS R.E.S. (2004) Standard penetration test-based probabilistic and deterministic assessment of seismic soil liquefaction potential. *J Geotech Geoenviron Eng*:130(12),1314–340.
- CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE. COMITATO PER LE SCIENZE GEOLOGICHE E MINERARIE (1997). Progetto Strategico Gallerie Rapporto Conclusivo. Coordinatore Nazionale Prof. Ing. Sebastiano Pelizza.
- DEMATTEIS, A., MANCARI, G., MARINI, M., (2007). Reliability assessment in geological forecasts for an highway tunnel: the application of the R-index method in sedimentary rocks. *Proc. FIST GEOITALIA 2007*, Rimini 12-14 September 2007, 8 pp.
- DEMOUGEOT-RENARD, CHANTAL DE FOUQUET, AND PHILIPPE RENARD (2004) Forecasting the Number of Soil Samples Required to Reduce Remediation Cost Uncertainty. *Journal of Environmental Quality* 33, 1694-1702.
- DUNCAN M. (2000) Factors of safety and reliability in geotechnical engineering. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 126/4, 307-316.
- ESSEX R.J., (1997). *Geotechnical Baseline Reports for Underground Construction. Guidelines and practices*. Technical Committee on Geotechnical Reports of the Underground Technology Research Council (sponsored by the Construction Division of the American Society of Civil Engineers and the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers). ASCE, 51 pp.
- GILL D. E., CORTHÉSY R., LEITE M. H. (2005) A statistical approach for determining practical rock strength and deformability values from laboratory tests. *Engineering Geology* 78, 53–67.
- GILL D. E., CORTHÉSY R., LEITE M. H. (2005) Determining the minimal number of specimens for laboratory testing of rock properties. *Engineering Geology* 78, 29–51.
- GRASSO P., D. COLLOMB, P. VIGNAT, A. BOCHON (2002). Base Tunnel Maurienne-Ambin: Probabilistic Estimation of Construction Time and Cost for Various Project Planning and Configuration Alternatives Considering Geologic and Geomechanical Uncertainties. *Atti del Convegno su Le indagini Geologiche e Geotecniche Propeedeutiche alla Costruzione delle Opere Sotterranee sia Civili che Minerarie*, Modena.
- ISAKSSON T., STILLE H. (2005). Model for estimation of time and cost for tunnel projects based on risk evaluation. *Rock Mech. Rock Engng.*, pp. 373-398.
- ITA - INTERNATIONAL TUNNELLING ASSOCIATION, WORKING GROUP NO. 17 (APRIL (2003), updated July 2003) on Long Tunnels at Great Depth. Final Draft of the WG report reviewed after the WG 17. Meeting in Amsterdam – Long Traffic Tunnels at Great Depth.
- ITA - INTERNATIONAL TUNNELLING ASSOCIATION, WORKING GROUP NO. 2 (2004) Guidelines for tunnelling risk management. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 19, pp. 217-237.
- ITIG - INTERNATIONAL TUNNELLING INSURANCE GROUP, (2006). The Joint Code of Practice for Risk Management of Tunnel Works.
- LAJAUNIE C., COURRIOUX G. AND MANUEL L. (1997) Foliation Fields and 3D Cartography in Geology: Principles of a Method Based on Potential Interpolation. *Mathematical Geology*, 29/4, 571-584.
- MALLET J.L. (1997) Discrete modelling for Natural Objects. *Mathematical Geology* 29/2, 199-219.
- MIRANDA T., GOMES CORREIA A. AND RIBEIRO E SOUSA L. (2009) Bayesian methodology for updating geomechanical parameters and uncertainty quantification. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 46/7, 1144-1153.
- NENAD PAVLOVIC (2006). Geotechnical zonation. Principles, criteria and procedure. Safety in the underground space, AITES-ITA World Tunnel Congress, Seoul, Korea.
- PERELLO, P., VENTURINI, G., DELLE PIANE, L., DEMATTEIS, A. (2007). Ground water inflows in tunnels excavated in faulted rock mass. *Felsbau*, vol 4, pp 28-34.
- PERELLO P., VENTURINI G., DEMATTEIS A., BIANCHI G.W., DELLE PIANE L., DAMIANO A. (2005). Determination of reliability in geological forecasting for linear underground structures: the method of the R-index. *Geoline 2005*, Lyon, France.
- PINE R.J., ROBERDS W.J. (2005) A risk-based approach for the design of rock slopes subject to multiple failure modes-illustrated by a case study in Hong Kong. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 42, 261–275.
- POMIAN-SRZEDNICKI, I. (2001) Calculations

- lation of geological uncertainties associated with 3-D geological models. These Ecole Polytechnique Federale de Lausanne, Lausanne, Switzerland, 101 pp.
- RUFFOLO R. M., SHAKOOR A. (2009) Variability of unconfined compressive strength in relation to number of test samples. *Engineering Geology* 108, 16–23.
- SARI M. (2009) The stochastic assessment of strength and deformability characteristics for a pyroclastic rock mass. *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences* 46, 613–626.
- Subcommittee on Geotechnical Site Investigations. U.S. National Committee on Tunneling Technology, Commission on ENGINEERING AND TECHNICAL SYSTEMS. NATIONAL RESEARCH COUNCIL (1984). *Geotechnical Site Investigations for Underground Projects*. Washington D.C., National Academy Press.
- TONINI A., GUASTALDI E., MASSA G., CONTI P. (2008) 3D geo-mapping based on surface data for preliminary study of underground works: A case study in Val Topina (Central Italy). *Engineering Geology* 99, 61–69.
- UNDERGROUND TECHNOLOGY RESEARCH COUNCIL (1996). *UTRC Forum on Geotechnical Reports in underground construction. The perspective of engineering firms*.
- VAN STAVEREN M.TH. AND KNOEFF J.G., (2004). *The Geotechnical Baseline Report as Risk Allocation Tool*. R. Hack, R. Azzam, R. Charlier (Eds.): LNES 104, pp. 777–785, 2004.
- VAN STAVEREN M.TH. AND PETERS T.J.M., (2004). *Matching Monitoring, Risk Allocation and Geotechnical Baseline Reports*. R. Hack, R. Azzam, R. Charlier (Eds.): LNES 104, pp. 786–791, 2004.
- VENTURINI, G., DAMIANO, A., DEMATEIS, A., DELLE PIANE, L., FONTAN, D., MARTINOTTI, G., PERELLO, P. (2001). *L'importanza dell'affidabilità del Modello Geologico di Riferimento negli studi per il tunneling*. *Geitalia 2001 3° Forum Italiano di Scienze della Terra* – FIST, Chieti, 5-8 settembre, pp. 426-427.

Ringraziamenti

Il presente lavoro è stato svolto nell'ambito dell'IAEG Italia, con la partecipata collaborazione del presidente Giorgio Lollino, in carica alla costituzione della commissione e all'approvazione della raccomandazione, a cui si esprime un vivo ringraziamento. L'apporto di esperienza e capacità di sintesi di Sandro Martinetti in questa materia hanno certamente permesso di innalzare la qualità del lavoro svolto dalla commissione. Si esprime gratitudine a tutti i membri della commissione, ai relatori, numerosi, intervenuti nei workshop, così come ai vari tecnici intervenuti nei dibattiti pubblici, per il loro prezioso contributo.