



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TORINO



Dipartimento di Scienze della Terra

## **Linee guida di supporto per la predisposizione del progetto di coltivazioni in sotterraneo**



## Indice

<b>1. INTRODUZIONE.....</b>	<b>3</b>
<b>2. ASPETTI GEOLOGICI E GEOTECNICI PRELIMINARI.....</b>	<b>4</b>
2.1 INQUADRAMENTO TOPOGRAFICO, GEOLOGICO, GEOMORFOLOGICO, GEOLOGICO-STRUTTURALE E GIACIMENTOLOGICO .....	5
2.2 RILIEVO E CARATTERIZZAZIONE DELLE DISCONTINUITÀ .....	5
2.3 DETERMINAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DI RESISTENZA E DEFORMABILITÀ DI MATRICE ROCCIOSA E DISCONTINUITÀ CON SPERIMENTAZIONI IN SITO ED IN LABORATORIO .....	7
2.1 CLASSIFICAZIONE DELL'AMMASSO ROCCIOSO .....	7
2.2 DEFINIZIONE DELLO STATO TENSIONALE NATURALE .....	8
2.3 COLTIVAZIONI IN SOTTERRANEO IN CIRCUITI CARSICI.....	9
2.4 ANALISI DEL MOTO DELL'ACQUA .....	9
<b>3. ASPETTI PROGETTUALI .....</b>	<b>10</b>
3.1 ANALISI DI STABILITÀ DI BLOCCHI LOCALIZZATI .....	10
3.2 ANALISI DI STABILITÀ GLOBALE E DEGLI IMBOCCHI .....	11
3.3 MODELLI DI CALCOLO.....	11
<b>4. ATTIVITÀ DI MONITORAGGIO .....</b>	<b>12</b>
<b>5. FASE DI CHIUSURA E RECUPERO.....</b>	<b>13</b>
<b>6. ELENCO DEGLI ELABORATI PROGETTUALI DI MASSIMA DA PRESENTARE .....</b>	<b>13</b>

## 1. Introduzione

L'autorizzazione alla coltivazione di una cava in sotterraneo ed il controllo dell'attività estrattiva, in generale, necessitano di un'esauriente e chiara documentazione tecnica. Il progetto di coltivazione è l'unico strumento di supporto alla gestione della singola cava, per cui non può e non deve rivestire solo finalità amministrative, ma deve essere strutturato su chiare basi tecniche in relazione alle varie problematiche che vi si presentano.

Nel caso di un progetto di una coltivazione in sotterraneo occorre ricordare che si intersecano tematiche connesse a geologia e giacimentologia, geotecnica, meccanica delle rocce, idrologia e idrogeologia, arte mineraria, sicurezza sul lavoro e, non ultimi, problemi di tipo ambientale in senso lato. Una corretta progettazione deve pertanto fare in modo che tutti gli aspetti coinvolti siano stati analizzati e quantificati secondo uno schema logico e coerente.

Con questo documento si intende fornire una guida indicativa e non esaustiva, in grado di fornire i principali temi che devono essere sviluppati per una corretta progettazione.

I punti chiave ed il successivo sviluppo vogliono essere voci a cui il progetto di coltivazione deve dare una risposta, fermo restando l'autonomia del progettista di adottare metodi di calcolo e verifica che si ritengono più idonei caso per caso.

Gli aspetti che dovranno essere tenuti in considerazione nel progetto sono i seguenti:

- studio geologico, geomorfologico e idrogeologico;
- studio geotecnico;
- analisi cinematica e analisi di stabilità;
- metodi di abbattimento previsti;
- interventi di consolidamento, sistemi di ancoraggio o disaggio;
- gli interventi di drenaggio
- monitoraggio dell'ammasso roccioso, con individuate metodologie e tempistiche.

La progettazione di uno scavo in sotterraneo ha come scopo quello di determinare la geometria dei vuoti e degli elementi di rinforzo in relazione al metodo di coltivazione scelto in modo tale da garantire, nel rispetto delle esigenze economiche in fase di realizzazione, la stabilità dello scavo per un previsto periodo di tempo.

Il periodo di tempo per il quale viene progettata l'opera varia a seconda della destinazione d'uso, dell'importanza e delle dimensioni dello scavo nonché della manutenzione e delle misure di controllo che si intendono svolgere.

I parametri che influenzano maggiormente gli scavi in roccia in sotterraneo e che devono essere contenuti nel progetto sono:

1. le caratteristiche di resistenza e di deformabilità della matrice rocciosa
2. la giacitura delle discontinuità presenti nella massa rocciosa, le caratteristiche fisico meccaniche ed idrogeologiche delle discontinuità e dei sistemi di discontinuità
3. l'assetto idrogeologico e la circolazione idrica nel sottosuolo\*
4. le dimensioni e la geometria finale dello scavo
5. lo stato di tensione preesistente
6. la profondità dello scavo e la morfologia del sovrasuolo.



*\* Si intende sostanzialmente la presenza di acqua sottoforma di stillicidio o venute idriche (di qualunque entità o portata) ed il grado di permeabilità della discontinuità (condizionata da apertura ed eventuale tipologia di riempimento), soprattutto in caso di presenza di falda idrica, anche solo temporanea, ospitata nel mezzo fratturato.*

Le presenti linee guida contengono le indicazioni atte a ottenere le informazioni necessarie ad un corretto dimensionamento degli scavi e coadiuveranno il personale preposto nell'iter di valutazione dei progetti di coltivazione in sotterraneo, fornendo il supporto necessario ad incrementare le capacità di analisi e le competenze tecnico-scientifiche in tale ambito. In particolare, sono contenute e descritte le procedure tecniche volte all'acquisizione di un quadro conoscitivo globale di tipo geologico, geomorfologico, geotecnico e idrogeologico dell'area di cava. Esula dalle presenti linee guida la trattazione della fattibilità economica che, ad esempio, l'apertura di una cava (o la conversione di una coltivazione a giorno in sotterraneo) comporta.

Il presente documento, pur non costituendo un insieme di indicazioni prescrittive per i progettisti, fornisce al contempo delle linee guida secondo le quali impostare un progetto di coltivazione in sotterraneo, fatta salva la possibilità di proporre soluzioni alternative che dovranno comunque rispettare la filosofia di approccio proposta.

Questo documento si suddivide in tre macro-attività distinte e temporalmente consecutive:

- acquisizione di un quadro conoscitivo dettagliato dell'area di coltivazione;
- progettazione dell'opera;
- monitoraggio periodico e straordinario.

Con riferimento ai successivi paragrafi, si riportano di seguito i principali approfondimenti necessari alla progettazione e verifica delle condizioni di stabilità dello scavo:

- studi geologici/geomorfologici
- rilievo e caratterizzazione meccanica delle discontinuità
- determinazione delle caratteristiche fisico meccaniche dell'ammasso roccioso
- determinazione dello stato di tensione naturale
- analisi del moto dell'acqua
- analisi di stabilità globale e locale
- scelta del metodo di analisi
- metodi di monitoraggio

## **2. Aspetti geologici e geotecnici preliminari**

L'apertura di cave comporta la realizzazione di scavi con conseguente estrazione di materiale con caratteristiche coerenti a quelle commercialmente richieste e in accordo con la domanda di mercato. Gli scavi devono essere realizzati nel costante rispetto delle condizioni di stabilità e sicurezza e a tal fine è necessario condurre degli studi che permettano la messa a punto di modelli geologici e geotecnici sulla base dei quali condurre analisi di stabilità.

## 2.1. Inquadramento topografico, geologico, geomorfologico, geologico-strutturale e giacimentologico

L'inquadramento topografico, geologico e geomorfologico devono essere fatti partendo da cartografia esistente (scala regionale e scala locale da 1: 25.000 fino a 1:10.000 o 1:5000, se presente) con successive verifiche ed approfondimenti a scala locale e di dettaglio (da 1:10.000 fino anche 1:2000), per definire al meglio il contesto geologico-strutturale e giacimentologico e la topografia dell'area in cui la coltivazione si va ad inserire. Il progetto deve inoltre prevedere il riconoscimento dei principali elementi morfologici e dei depositi superficiali associabili a principali agenti morfogenetici (acqua, ghiacciaio, gravità, etc.) valutandone la pericolosità e i rischi associati alla dinamica di versante o di fondovalle in relazione alla coltivazione.

Lo studio geologico e giacimentologico è volto al riconoscimento dei litotipi e dell'assetto stratigrafico e strutturale per la definizione del modello geologico di riferimento e la caratterizzazione a scala locale e di dettaglio del giacimento e delle sue volumetrie ove la complessità strutturale e l'eterogeneità del giacimento (variazioni giaciturali, composizionali, eteropie di facies, etc.) lo richiedano, si consiglia di ricorrere a studi di dettaglio alla scala 1:1000 o 1:2000, eventualmente per singole porzioni dell'area in coltivazione ed in relazione alle fasi di coltivazione previste. La realizzazione di indagini geognostiche, quali sondaggi, è necessaria sia per una conferma della qualità, della geometria e dei volumi del giacimento sia per l'integrazione dei dati con informazioni relative al grado di alterazione, fratturazione ed alle condizioni idrogeologiche dei litotipi attraversati.

Lo studio geologico e la determinazione della stratigrafia potranno essere completati con l'uso di misure geofisiche, quali ad esempio tomografie elettriche, tomografie sismiche o sismica a riflessione, predisposte lungo stendimenti e con metodologie di elaborazione che garantiscano adeguate profondità d'indagine in merito al problema in esame ed al contesto geologico circostante. In particolare, tutte le tecniche geofisiche menzionate necessitano di lunghezze degli stendimenti significative, cioè solitamente da 5 a 10 volte maggiori, per raggiungere le profondità d'indagine necessarie al contesto di studio. Per le tomografie elettriche la profondità di indagine prevista è solitamente stimabile considerando un rapporto di circa 5 o 6 a 1 tra lunghezza stendimento e profondità. Per le tomografie sismiche tale rapporto si colloca indicativamente nell'intervallo di circa 4 o 5 a 1. I valori indicati sono tuttavia dipendenti anche dal contesto geologico nel quale vengono eseguite le indagini e sono quindi da verificare successivamente all'esecuzione delle prove rispetto alle profondità d'indagine realmente raggiunte. Tali lunghezze di stendimenti sono inoltre anche correlate con la interdistanza dei punti di misura lungo la linea di acquisizione. Si rimanda perciò a specifiche linee guida sull'esecuzione delle prove geofisiche più precise quantificazioni in merito.

Tutti gli elementi raccolti devono permettere la definizione di un **modello geologico di sottosuolo** che ricostruisca l'assetto stratigrafico, strutturale ed idrogeologico del sottosuolo stesso, nonché la presenza di processi geomorfologici che agiscono e interagiscono con la superficie, ai quali fare riferimento per la messa a punto del modello geotecnico.

## 2.2. Rilievo e caratterizzazione delle discontinuità

Nell'ambito delle coltivazioni in roccia la caratterizzazione dell'ammasso roccioso e delle sue discontinuità è un elemento progettuale imprescindibile, a partire dall'orientamento relativo tra le superfici di scavo e le discontinuità sia in fase progettuale che operativa, con continui aggiornamenti circa loro continuità, variazione dello stato della fratturazione, resistenza al taglio e interferenze tra strutture naturali ed antropiche (Bieniawski, 1984; Barla, 1986):

Il riconoscimento e la caratterizzazione delle discontinuità dovranno avvenire secondo uno o più metodi suggeriti dalla Società Internazionale della Meccanica delle Rocce (ISRM, 1978), in base a dimensione dello scavo e grado di fratturazione:

- STENDIMENTO
- METODO FINESTRA
- FOTOGRAMMETRIA

Per ciascun metodo sarà possibile produrre un diverso grado di dettaglio relativamente alla descrizione delle caratteristiche delle discontinuità, individuando, ove possibile, i principali parametri di resistività associabili alle principali discontinuità nel seguito elencate: orientazione, spaziatura, persistenza, forma, rugosità, apertura, riempimento, alterazione, condizioni idrauliche. Particolare attenzione dovrà essere dedicata alla spaziatura ed alla definizione del suo valore reale, apportando le dovute correzioni rispetto alle spaziature apparenti, derivanti dall'intersezione delle discontinuità con le superfici indagabili.

La presenza di un numero significativo di misure consente una più affidabile analisi statistica del dato (distribuzione di frequenza) e ridurrà l'errore associato alla definizione del valore più rappresentativo per ciascuna caratteristica.

Sarà necessaria la misura del grado di rugosità e del grado di alterazione dei lembi della discontinuità, ad esempio attraverso gli indici JRC e JCS (Barton (1973), Barton e Choubey (1977)) e la definizione dell'angolo di attrito associato alle singole discontinuità o alle famiglie. Tale parametro risulta di fondamentale importanza nel caso di discontinuità o famiglie che possano generare potenziali cinematismi (scivolamenti planari, scivolamenti a cuneo, ribaltamento).

La caratterizzazione geotecnica potrà essere eventualmente completata con misure geofisiche ad alta risoluzione, quali ad esempio quelle basate sulla propagazione delle onde radar (i.e. Ground Penetrating Radar) in grado di visualizzare in determinati contesti la persistenza e continuità dello strato di fratturazione. Alternativamente le medesime prove geoelettriche e/o di tipo sismico citate in precedenza possono essere utilizzate, tramite opportune correlazioni tra i parametri geofisici e lo stato di fratturazione dell'ammasso, per distinguere volumi più fratturati da volumi più compatti.

In particolare, le tecniche Georadar permettono, in determinati contesti d'indagine (i.e. ammassi rocciosi compatti), di evidenziare la presenza di fratture aperte e/o con diverse tipologie di riempimento all'interno dell'ammasso roccioso. Lo studio di tali sistemi di fratturazione, eventualmente correlato con rilievi geomeccanici di superficie, può permettere una più chiara delineazione dello stato di fratturazione interno dell'ammasso e della giacitura e persistenza dei principali set di fratture.

Le tecniche geoelettriche e/o sismiche permettono invece valutazioni quantitative in merito allo stato di alterazione e fratturazione volumetrica dell'ammasso roccioso ma solitamente senza una chiara delineazione di eventuali piani di frattura o specifiche giaciture. Tali valutazioni si possono ad esempio basare sul confronto dei valori dei parametri geofisici misurati sull'ammasso roccioso rispetto agli stessi ottenibili per la roccia intatta da prove di laboratorio o da opportune correlazioni con dati di letteratura. La discrepanza tra i valori misurati direttamente in sito ed i valori di riferimento per la roccia intatta può dare un indice dello stato di alterazione del materiale in sito in funzione della riduzione dei parametri misurati rispetto a quelli di riferimento.

### **2.3. Determinazione delle caratteristiche di resistenza e deformabilità di matrice rocciosa e discontinuità con sperimentazioni in sito ed in laboratorio**

La caratterizzazione dell'ammasso richiede l'esecuzione di prove in sito ed in laboratorio per la determinazione delle caratteristiche meccaniche.

Le indagini geotecniche devono tener conto della profondità, dell'ampiezza, della destinazione e del carattere permanente o provvisorio dello scavo. Ad esempio, se si tratta di una via di carreggio la stabilità dovrà essere garantita nel lungo termine al contrario di scavi di produzione.

La scelta delle tipologie, dell'ubicazione e del numero di indagini e misure in sito, nonché della posizione e del numero dei campioni da prelevare e sottoporre a prove di laboratorio dipende dall'estensione dell'area, dalla disponibilità di informazioni provenienti da precedenti indagini, dal tipo di materiali interessati dallo scavo o presenti nel suo intorno significativo e dalla complessità delle condizioni geologico-strutturali, stratigrafiche ed idrogeologiche del sito in esame. Il piano delle indagini deve essere tale da permettere una descrizione accurata della successione stratigrafica locale, una ricostruzione dell'assetto strutturale del giacimento, una quantificazione dei parametri di resistenza e di deformabilità della matrice rocciosa e delle discontinuità ed una eventuale caratterizzazione idrogeologica.

Laddove il contesto geologico e morfologico lo richiedano, il piano delle indagini deve consentire di accertare forma e posizione di superfici di scorrimento esistenti e/o potenziali e definire i caratteri dei possibili cinematismi.

La profondità e l'estensione delle indagini devono essere fissate in relazione alle caratteristiche geometriche della coltivazione, ai risultati dei rilievi di superficie nonché alle indagini di approfondimento che avvengono durante lo sviluppo degli scavi in sotterraneo.

A completamento delle informazioni raccolte sul campo, il piano di indagini dovrà prevedere il prelievo di campioni quanto più indisturbati per poter consentire l'esecuzione di prove di laboratorio per la caratterizzazione geotecnica della matrice rocciosa (prova di compressione monoassiale, prova triassiale, prova di taglio e prova di flessione) e delle discontinuità (prova di taglio diretto).

### **2.4. Classificazione dell'ammasso roccioso**

Nel caso di masse rocciose intensamente fratturate un fenomeno di instabilità può coinvolgere più blocchi e l'analisi di stabilità deve quindi considerare la resistenza a taglio e la rigidità del sistema di blocchi.

I parametri che caratterizzano la resistenza a taglio di tali tipi di masse sono principalmente, oltre a quelle che riguardano il comportamento di singole discontinuità, quelle che riguardano l'ammasso nel suo insieme.

In questo caso l'ammasso roccioso può essere rappresentato da un "modello continuo equivalente" (vedi cap 3.3) ed è necessario distribuire l'effetto delle discontinuità sull'intero volume di roccia che viene schematizzato, quindi, come un mezzo "omogeneizzato"; le leggi che ne descrivono il comportamento meccanico e quindi la risposta a perturbazioni di carico o di spostamento, sono caratterizzate da parametri di deformabilità e resistenza globali.

I metodi di classificazione permettono di suddividere l'ammasso roccioso in classi di diversa qualità dal punto di vista delle loro proprietà meccaniche globali. Questi metodi esaminano alcune fondamentali caratteristiche della roccia intatta e delle discontinuità restituendo, a seconda delle diverse situazioni, degli indici di qualità geomeccanica, per ognuna di esse.

Tali metodi si basano sui dati acquisiti tramite rilievi in sito e alcune delle prove precedentemente citate.

Tra i più impiegati metodi di classificazione utilizzati nella pratica ingegneristica ricordiamo il metodo RMR di Bieniawski (1973), il Q di Barton et al. (1974), l'Rmi di Palmström, 1996, il GSI, di Hoek (1994) e Hoek et al. (1995),

I parametri di deformabilità e resistenza da utilizzare nella progettazione devono essere rappresentativi di un comportamento globale dell'ammasso roccioso; per tale motivo prove dirette, come ad esempio prove triassiali e prove di taglio a grande scala condotte in sito, potrebbero essere eseguite su campioni di ammasso roccioso che devono, però, avere volume significativo. Tali prove non solo sono economicamente onerose, ma anche di difficile esecuzione.

Per questi motivi, nella pratica ingegneristica, si ricorre a relazioni di tipo empirico, sviluppate negli ultimi decenni da diversi Autori, che permettono di correlare i parametri caratteristici del comportamento meccanico con gli indici di qualità dell'ammasso roccioso.

Per la determinazione delle caratteristiche di resistenza e deformabilità si potrà fare riferimento a metodi basati su relazioni empiriche correlate ai sistemi di classificazione (Hoek et al., 1991, 1997, 2002).

Il più noto è il criterio di rottura non lineare proposto da Hoek e Brown (1997). Le cui costanti sono derivabili tramite l'indice di classificazione RMR o l'indice GSI (Geological Strength Index).

Per determinare i tre parametri del criterio di Hoek-Brown devono essere determinate tre proprietà della massa rocciosa: il valore di  $\sigma_c$  attraverso prove di compressione monoassiale, stimato anche eseguendo prove più semplici come il "point load" o tramite il martello di Schmidt; il valore della costante di Hoek-Brown  $m_i$  caratteristica della roccia intatta, definibile attraverso analisi statistiche dei risultati di prove triassiali eseguite su campioni di roccia; il valore dell'indice GSI. I valori di  $\sigma_c$  ed  $m_i$  possono essere determinati anche attraverso tabelle indicate dagli Autori e stimati sulla base dei valori di RMR e Q attribuiti all'ammasso roccioso.

Tutti gli elementi raccolti devono permettere la definizione di un **modello geotecnico** che tenga conto della complessità della situazione geologica, idrogeologica e geotecnica, della presenza di discontinuità e dell'evidenza di movimenti progressi potenzialmente interferenti con lo scavo ai quali fare riferimento per le verifiche di stabilità del **sottosuolo** (vedi paragrafo 3.3) e per il progetto degli eventuali interventi di stabilizzazione.

## 2.5. Definizione dello stato tensionale naturale

La definizione dello stato tensionale naturale all'interno dell'ammasso roccioso potenzialmente interessato da attività estrattive è un aspetto di fondamentale importanza poiché esso viene perturbato in maniera irreversibile dalla realizzazione di un vuoto. Conoscere questa variazione permette di valutare gli effetti in termini di deformazioni indotte e di tensioni indotte da confrontare con la resistenza dell'ammasso roccioso.

Indipendentemente dalle tecniche utilizzate per la misura (metodo del ripristino delle tensioni, metodo del rilascio delle tensioni, fratturazione idraulica), lo stato tensionale naturale dovrebbe essere misurato lontano da strutture geologiche (faglie, contatti tettonici,) e considerando eventuali effetti della topografia, in modo da non introdurre incertezze ed errori sulle misure effettuate.

Una attenta analisi di carattere geologico strutturale, con osservazioni riguardo al pattern delle fratture e alle loro reciproche relazioni geometriche, può fornire indicazioni circa l'orientazione locale dei tensori principali.

La determinazione dello stato tensionale naturale può essere derivata con il supporto di misure dello stato tensionale tramite l'utilizzo di modelli numerici tridimensionali. L'uso della modellazione può essere di supporto per l'interpretazione di misure di stato tensionale in prossimità di scavi, o di strutture geologiche quali faglie e della superficie per la determinazione dello stato tensionale naturali quali condizioni al contorno.

## 2.6. Coltivazioni in sotterraneo in circuiti carsici

La natura disomogenea ed anisotropa degli ammassi rocciosi a seguito della presenza di faglie, zone di taglio, forme carsiche rappresenta una incognita che può tradursi in rischio per le attività di scavo, soprattutto in sotterraneo. Tali disomogeneità rappresentano delle anomalie geologiche spesso difficili da prevedere e da controllare, soprattutto con le tradizionali tecniche di indagine diretta o indiretta.

Una particolare attenzione dovrà essere posta a verificare la presenza ed eventualmente lo stato di attività di processi carsici. Il carsismo si sviluppa a carico di rocce solubili quali rocce evaporitiche e rocce carbonatiche, con modalità e tempi differenti a seconda del litotipo. Le cavità, prodotte da circolazione di acqua sottosatura in sali che possono essere rilasciati dalle rocce attraversate, possono essere riempite con aria, silt/argilla o acqua a seconda dello stato di attività ed evoluzione. In presenza di circuiti carsici attivi, in particolare se a pieno carico, la pressione dell'acqua può essere molto elevata a seconda della quota del livello piezometrico con pesanti conseguenze in termini di sicurezza (operatori e salute pubblica), di danno economico (macchinari e ripristino cantiere) e ambientale nel caso in cui queste vengano intercettate durante operazioni di scavo.

In molti altri casi, sondaggi ed indagini geofisiche da superficie si sono rivelati insufficienti per l'individuazione dei vuoti associati ad un circuito carsico. Tali tecniche forniscono nella maggior parte dei casi delle informazioni puntuali (caso, ad esempio, dei sondaggi) oppure una ricostruzione del sottosuolo lungo sezioni interpretative ottenute per iterazione che mediano tra diversi scenari e soluzioni a partire da dati, ad esempio, di tipo geofisico o idrogeologico.

Per aumentare il livello di sicurezza è in questi casi preferibile prevedere una prospezione continua eseguita direttamente sul fronte, ad esempio mediante prospezione diretta con fori "spia" preventivi, da eseguirsi con regolarità durante l'avanzamento dello scavo oppure in presenza di zone a maggior rischio, oppure l'impiego di tecniche di indagine geofisica, quale, ad esempio, il georadar.

## 2.7. Analisi del moto dell'acqua

La presenza dell'acqua è causa del peggioramento delle condizioni di stabilità e va quindi opportunamente valutata.

La pressione dell'acqua nelle discontinuità in roccia riduce infatti la resistenza al taglio mobilitabile ed inoltre genera un incremento di forze instabilizzanti, così come la presenza di una falda idrica può provocare in alcuni particolari materiali (ad esempio i gessi), un depauperamento delle caratteristiche meccaniche, riducendone i parametri di resistenza ed incrementandone la deformabilità.

Inoltre, particolarmente in ambienti montani, i cicli di gelo e disgelo dell'acqua possono provocare variazioni di volume nei cambiamenti di fase, fenomeni di fatica della roccia, allargamento dell'apertura delle discontinuità o aumento del grado di fratturazione dell'ammasso.

Considerando i possibili modelli di circolazione idrica negli ammassi rocciosi, i principali scenari di riferimento possono essere ricondotti a due casi:

1. La massa rocciosa è fratturata in modo intenso o è costituito da materiale sciolto (per effetto di alterazione fisico-chimica, tettonizzazione, paleocarsismo,..) quindi permette una circolazione diffusa;
2. Ammasso poco fratturato quindi la circolazione dell'acqua avviene solo lungo le discontinuità.

È necessario definire il corretto schema di flusso idraulico che può generarsi nello scavo ipotizzando la condizione cautelativamente peggiore in funzione della possibile oscillazione del livello di saturazione.

A tal proposito, a seconda della tipologia di materiale, la caratterizzazione dell'area deve prevedere specifiche indagini volte ad escludere la presenza di acqua o, in caso contrario, a prevedere le condizioni di permeabilità e saturazione del mezzo oggetto di scavo.

### 3. Aspetti progettuali

Sulla base dei **modelli geologico e geotecnico** sviluppati, si effettua lo studio delle condizioni di stabilità nonché il progetto di eventuali interventi di stabilizzazione.

È necessario valutare la stabilità globale del sottterraneo analizzando lo stato di tensione indotta negli elementi di supporto (ad esempio pilastri o diaframmi), nelle calotte e nei piedritti e verificando che non si raggiungano le resistenze massime stimate del materiale. È necessario altresì verificare che non si possano determinare dei distacchi localizzati sulle pareti per intersezione delle discontinuità preesistenti, interferenza delle discontinuità con fronti di scavo o per fratturazione indotta.

Cioè che la geometria delle discontinuità non determinino blocchi cinematicamente rimuovibili in corrispondenza delle superfici di scavo

#### 3.1. Analisi di stabilità di blocchi localizzati

L'analisi di stabilità di blocchi localizzata si effettua dopo aver definito la geometria del volume potenzialmente instabile che nella roccia è delimitato da piani di discontinuità ed esposto sul fronte di scavo.

L'analisi di stabilità del blocco dovrà essere eseguita sulla base del rilievo delle discontinuità condotto e dei possibili cinematismi individuati tramite analisi cinematiche (metodo di Markland, Goodman Shi, etc.).

La stabilità di un blocco cinematicamente rimuovibile dovrà essere valutata in funzione del potenziale cinematismo. Il metodo dell'equilibrio limite rappresenta un metodo volto alla verifica delle condizioni di equilibrio e alla determinazione dei valori dei fattori di sicurezza statici o pseudo statici dei volumi ma non permette di determinare lo stato di tensione e deformazione indotto. Si intende con metodo pseudo statico un metodo che trasforma in sollecitazioni permanenti le sollecitazioni variabili nel tempo dovute ai sismi. Si possono così più agevolmente utilizzare i metodi di verifica della statica.

La necessità di sviluppare analisi numeriche potrà essere dettata, a discrezione del progettista, dalla complessità del contesto geologico e geomorfologico dell'area di coltivazione e dovrà essere supportata dalle prove in sito e di laboratorio necessarie alla determinazione delle caratteristiche fisiche e meccaniche necessarie, in relazione del legame costitutivo e del criterio di resistenza sviluppato nel modello. La finalità di tali analisi è l'identificazione di zone di potenziale instabilità e dei possibili interventi di messa in sicurezza da mettere in atto.

In zona sismica è necessario ricorrere a modelli di calcolo dinamici o pseudo statici tenendo conto della classificazione sismica dell'area. In tale contesto le prove geofisiche di tipo sismico basate sulla propagazione delle onde di taglio giocano un ruolo preponderante nella definizione del contesto sismico locale e della sua classificazione sismica in termini di specifica categoria di sottosuolo sismico alla quale riferirsi nelle analisi. I valori dei coefficienti moltiplicativi dell'accelerazione sismica di base e dei parametri pseudo statici sono infatti strettamente definiti nelle recenti Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC, 2018) in funzione principalmente delle categorie di suolo sismico (i.e. parametri di amplificazione stratigrafica), oltre che delle caratteristiche morfologiche del sito (i.e. amplificazione topografica). Un'attenta valutazione di tali parametri tramite specifiche prove sismiche risulta quindi fondamentale sia per la costruzione di un efficace modello di calcolo dinamico

del sito (eventualmente corredato anche da prove di laboratorio di tipo dinamico) che per lo sviluppo di analisi pseudo statiche semplificate.

### 3.2. Analisi di stabilità globale e degli imbocchi

L'analisi di stabilità globale della coltivazione dovrà essere eseguita sulla base del modello geotecnico ottenuto.

La necessità di sviluppare analisi numeriche bi o tridimensionali sarà dettata dalla complessità del contesto geologico e geomorfologico dell'area di coltivazione. La finalità di tali analisi è l'identificazione di zone di potenziale instabilità e dei possibili interventi di messa in sicurezza.

Le aree sovrastanti le zone di imbocco rappresentano zone di particolare pericolosità per le quali si dovranno prendere in considerazione opere di consolidamento mediante chiodatura/bullonatura, posizionamento di reti in aderenza o barriere paramassi o disgiungimento di blocchi instabili. Laddove previsto, si dovranno considerare anche le possibili interferenze tra aree di lavorazione contigue.

### 3.3. Modelli di calcolo

I metodi di calcolo possono essere di diverso tipo, in particolare dell'equilibrio limite o delle tensioni. Nel primo caso permettono la sola stima delle condizioni di stabilità, nel secondo caso, i modelli analitici e numerici permettono di simulare l'andamento delle deformazioni e/o dello stato tensionale dell'ammasso roccioso in seguito alla realizzazione dei vuoti e all'avanzamento dell'attività estrattiva.

Le formazioni geologiche sono in generale, discontinue, anisotrope, non omogenee e non elastiche (Harrison e Hudson, 2000). I modelli schematizzano l'ammasso roccioso facendo riferimento a diversi possibili approcci del mezzo: continuo, discontinuo o continuo equivalente. La discriminante nella scelta tra i metodi è condizionata dal grado di fratturazione dell'ammasso e quindi dalle caratteristiche fisiche e geometriche delle discontinuità in relazione alla scala del problema (Barton, N. 1998, Barla et al., 2000, Ferrero et al, 2004 a,b).

- **Il modello continuo** è applicato ad ammassi rocciosi costituiti da rocce tenere o quando non sia evidente la presenza di macrostrutture che governano la risposta deformativa.
- **Il modello del continuo equivalente** si utilizza quando la risposta deformativa dipende dalle caratteristiche globali del sistema roccia intatta/discontinuità.
- **Il modello discontinuo** (Cundall, 1971,1976) prevede che il comportamento tenso-deformativo sia governato principalmente dai sistemi di discontinuità.

I diversi approcci elencati necessitano di uno specifico approfondimento della caratterizzazione del mezzo e delle relative prove geotecniche da condurre in sito ed in laboratorio per la determinazione dei relativi parametri fisico meccanici in relazione al legame costitutivo e al criterio di resistenza implementato nel modello.

Tra i metodi numerici più diffusi del continuo si citano metodi alle differenze finite (FDM), agli elementi finiti (FEM) e agli elementi di contorno (BEM), mentre tra quelli del discontinuo possono essere gli elementi distinti (DEM) oppure il "discrete fracture network" (DFN)

La scelta del modello condiziona i risultati ottenibili in termini di deformazioni e stato tensionale, per cui è fondamentale definire il modello di comportamento meccanico dell'ammasso roccioso.

Qualsiasi modello matematico che simuli il comportamento dell'ammasso roccioso in funzione dell'attività estrattiva deve essere calibrato e verificato mediante il monitoraggio dei principali parametri di progetto.

La scelta del modello di calcolo è a discrezione del progettista e va giustificata alla luce delle analisi descritte.

#### 4. Attività di monitoraggio

Il piano di monitoraggio deve essere parte integrante del progetto perché dovrà fornire, con frequenze prestabilite, i dati per la valutazione e la calibrazione delle ipotesi progettuali e garantire l'identificazione tempestiva di eventuali criticità.

Le frequenze di monitoraggio saranno da definirsi nel progetto e potranno variare da caso a caso in quanto dipendono dal tipo di misura, dal modello geologico e geotecnico definito oltre che dal grado di pericolosità e rischio associato.

Il sistema di monitoraggio può essere impiegato sia in fase di esercizio che successivamente all'esaurimento dell'attività estrattiva, in funzione dell'utilizzo dei vuoti previsti al termine della coltivazione e delle possibili interferenze con il soprassuolo, in particolare laddove siano presenti potenziali rischi per la presenza di elementi vulnerabili preesistenti.

Il monitoraggio dovrà fornire indicazioni sulle condizioni statiche dell'area estrattiva, in particolare analizzando le deformazioni degli scavi e le pressioni interstiziali delle acque sotterranee.

Nel progetto, è necessario esplicitare chiaramente quali grandezze si intendono misurare perché esse condizionano sia la scelta degli strumenti di misura che la frequenza di acquisizione dei dati. Un'adeguata programmazione degli interventi di monitoraggio dovrebbe richiedere (Dunnicliff J., 1988):

- determinazione dei tipi di movimenti previsti;
- selezione degli specifici strumenti adatti ad eseguire le misure richieste;
- determinazione della localizzazione, del numero e della profondità di installazione degli strumenti;
- scelta del sistema di acquisizione delle misure;
- gestione dei dati acquisiti.

La programmazione richiede di valutare preventivamente la tipologia del movimento/ deformazione in atto o potenziale, la sua estensione ed entità e le cause che lo hanno determinato. Un sistema di misura deve estendersi oltre i limiti della zona in movimento e gli strumenti devono essere installati in zone significative, in relazione al tipo di movimento previsto.

La scelta di uno strumento per una misura presuppone di stabilire, di volta in volta, le caratteristiche più opportune quali il fondo scala (massimo valore misurabile), la precisione (massimo scostamento dal valore reale), la sensibilità (minima entità di lettura strumentale), ed il tempo di risposta (in particolare per i piezometri).

I diversi aspetti fin qui descritti richiedono che nella scelta di una strumentazione si valutino:

- l'entità probabile delle grandezze fisiche da misurare;
- la durata prevista del monitoraggio;
- le condizioni ambientali in cui le strumentazioni devono operare, quali l'erosione chimica (acque, malte cementizie, additivi) e quella elettrolitica (elettrolisi, correnti vaganti), elevate temperature, vibrazioni indotte dall'uso di esplosivi o macchinari, polverosità, umidità, scarsa accessibilità, possibilità di vandalismi;
- il sistema di acquisizione delle misure (manuale o automatico).



Per un esito positivo di un'operazione di monitoraggio si deve considerare che la localizzazione degli strumenti e la loro scelta in termini di fondo scala, sensibilità e precisione è strettamente legata ad una corretta definizione preliminare della geometria delle strutture e delle possibili velocità evolutive delle fenomenologie geotecniche. Ad esempio, un crollo in roccia avrà una velocità di evoluzione molto elevata mentre un fenomeno deformativo in materiale argilloso potrà avere velocità assai minori.

Esistono diversi tipi di strumenti per eseguire lo stesso tipo di misura, il requisito di base nella scelta di uno strumento è che le misure siano eseguite rapidamente e con la precisione richiesta.

Un'elevata sensibilità è richiesta per allestire sistemi di allarme connessi al manifestarsi di movimenti rapidi, casi in cui la precisione può non essere un requisito essenziale. Quando invece il movimento è lento e la sua localizzazione non è ben nota a priori, sono richiesti strumenti dotati anche di maggior precisione.

Le grandezze più frequentemente misurate sono gli spostamenti in superficie ed in profondità, la pressione neutra dell'acqua, lo stato tensionale.

Le possibili misure di spostamento, da eseguirsi sulle superfici degli scavi in sotterraneo, sono solitamente misure di convergenza mentre in foro si utilizzano solitamente strumenti di misura paralleli al foro quali gli estensimetri e gli estrusometri.

La scelta degli strumenti, la loro ubicazione e modalità e frequenza di acquisizione deve essere giustificata dal progettista sulla base dei possibili fenomeni di instabilità presenti sui fronti di scavo e sulle aree attigue o con esso interferenti.

## **5. Fase di chiusura e recupero**

Al termine delle attività di coltivazione bisognerà garantire condizioni di stabilità degli scavi che verifichino le condizioni di stabilità riportate nelle NTC 2018.

E' necessario tenere presente che le NTC 2018 si riferiscono a opere di tipo civile e non minerario ma in assenza di altra normativa specifica le singole Regioni (né il dpr 128/59, né 81/2008, né altra normativa nazionale inerente le attività estrattive entrano nel merito delle verifiche di stabilità e soprattutto del relativo ordine temporale), a cui lo Stato ha demandato nel 1977 la legislazione in materia di cave e miniere, possono nei loro regolamenti attuativi fare riferimento a verifiche di stabilità dei fronti di coltivazione e del fronte finale, redatte secondo i criteri contenuti nelle NTC 2008 e s.m.i. (riferite sia al periodo di coltivazione, sia alla situazione finale prevista), con specifico riferimento alla valutazione della stabilità globale e locale dei fronti relitti di scavo.

A tale scopo sarà necessario prevedere le adeguate analisi di stabilità considerando anche il comportamento a lungo termine per terreni e per materiali soggetti a fenomeni di creep come gessi e sali.

**Anna Maria Ferrero**  
**Sabrina Bonetto**  
**Cesare Comina**  
**Federico Vagnon**

## Riferimenti bibliografici

- Barton, N. 1998. Quantitative description of rock masses for the design of NMT reinforcement. *Int. Conf. On Hydropower Development in Himalayas*, Ed. V.D. Choubey, April 20-22 Shimla, India.
- Bandis S., A.C. Lumsden, N. Barton 1981. Experimental studies of the shear behaviour of rock joints. *Int. J. Rock Mech. Min Sci.*, Vol 18, pp. 1-21.
- Bandis S., A.C. Lumsden, N. Barton 1983. Fundamentals of rock joint deformation. *Int. J. Rock Mech. Min Sci.*, Vol 22, pp. 112-140.
- Barla G. 1986. '1° ciclo di conferenze di meccanica e ingegneria delle rocce. Introduzione', SGE Editoriali.
- Barton N. 1973. Review of a new shear strength criterion for rock joints. *Engineering Geology*; Vol.7 pp 287- 332.
- Barton N., V. Choubey 1977. The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics Mining*, Vol. 10, p. 1-54
- Cundall P. 1971. A computer model for simulating progressive large scale movements in blocky rock systems. *Rock Fracture. Proc. International Symposium on Rock Fracture*.
- Cundall P. 1976. Explicit finite-difference methods in geomechanics. *Numerical Methods in Geomechanics*, C.S. Desai (Ed.).
- Dershowitz W.S., H.H. Einstein 1988. Characterizing Rock Joint Geometry with Joint System Models. *Rock Mechanics and Rock Engineering* v. 1, n. 1, pp. 21-51.
- Dunncliff J. (1988) *Geotechnical Instrumentation for Monitoring Field Performance* – Lexington, Massachusetts.
- Ferrero A.M, M. Migliazza, G.P. Giani 2004. Analysis of the stability condition of tunnels: comparison between continuous and discontinuous approaches. *Proc of ISRM SINOROCK 2004 Symp, Int J Rock Mech. Vol 41, suppl. 1, pp. 646-651.*
- Ferrero A.M, M. Migliazza, G.P. Giani 2004. Analisi dei parametri geotecnici nella scelta del modello numerico continuo o discontinuo di un ammasso roccioso MIR Ciclo di conferenze su Meccanica ed ingegneria delle Rocce, Torino
- Goodman R.E., G. Shi 1985. *Block Theory and its applications to engineering*. Prentice-Hall.
- Harrison J.P., J. A. Hudson 2000. *Engineering rock mechanics. Part. 2: illustrative workable examples*. In: Särkkä, Eloranta P, editors. Oxford: Pergamon.
- Hoek E. 1994. Strength of rock and rock masses, *ISRM News Journal*, Vol. 2, no. 2, pp. 4-16.
- Hoek E., E.T. Brown 1997. Practical Estimates of Rock Mass Strength. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 34, No. 7, pp.1165-1186.
- Hoek, E. Carranza-Torres, C.T. & Corkum, B. 2002. *Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition*. Proc. North American Rock Mechanics Society, Toronto, July.
- Lancellotta R., 2012 *Geotecnica*, Zanichelli.
- Palmstrøm A. 1996. Characterization of rock masses by the RMi for use in practical rock engineering, *Tunnelling and underground space Technology*, Vol. 11, No. 2, pp. 175-186 (part.1), Vol 11, No. 3, pp. 287-303 (part. 2).
- Palmstrøm A., R. Singh 2001. The deformation modulus of rock masses – comparison between in situ tests and indirect estimates, *Tunnelling and underground space Technology*, Vol. 16, No. 2, pp. 115-131.



Dipartimento di Scienze della Terra