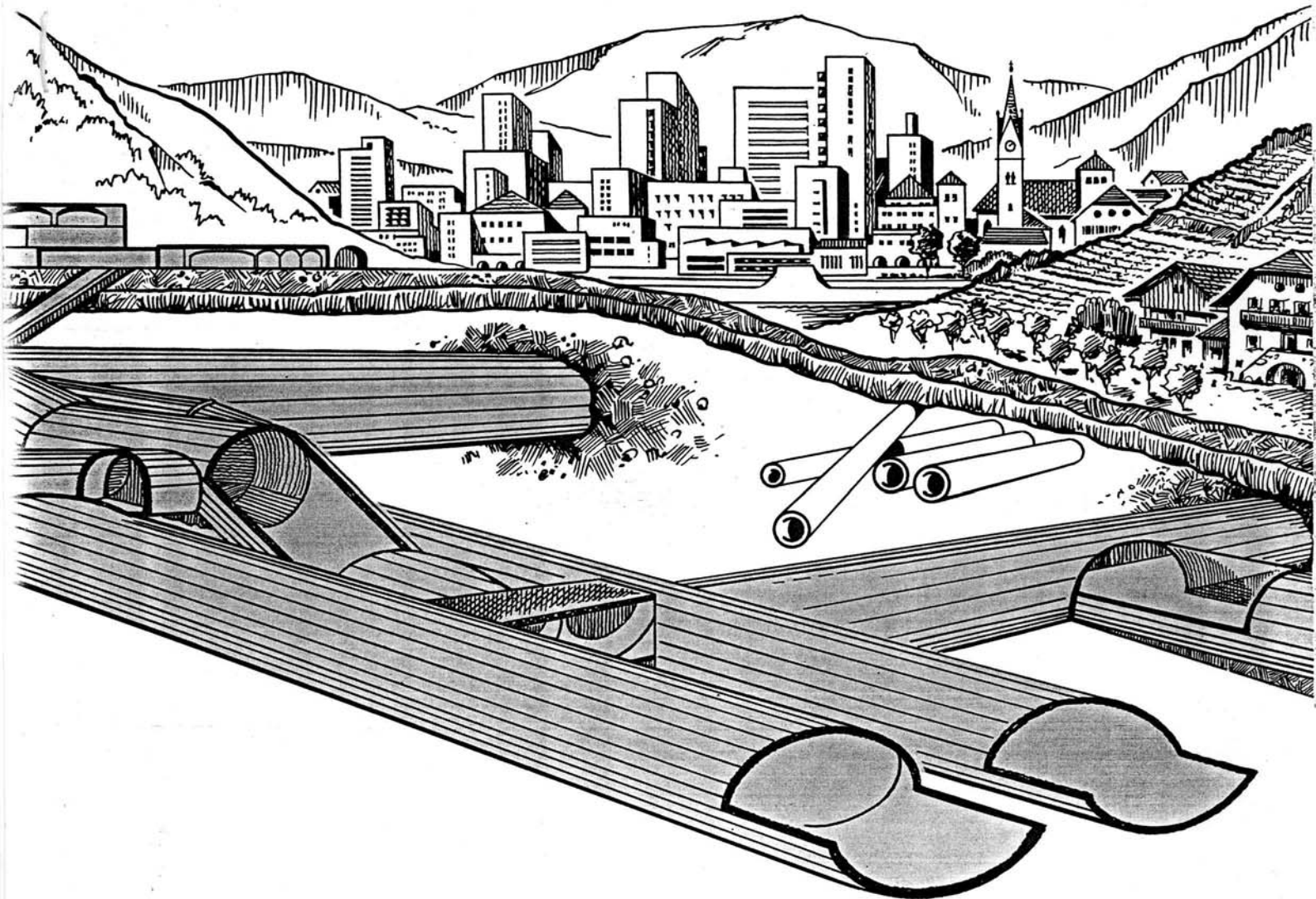


ATTI DEL CONVEGNO SUL TEMA

LO SPAZIO IN SOTTERRANEO COME NUOVO UTILIZZO DEL TERRITORIO



U.S.E.B. UNIONE OPERATORI ECONOMICI
DI LINGUA ITALIANA DELLA PROVINCIA DI BOLZANO

SEZIONE ITALIANA GALLERIE E GRANDI OPERE SOTTERRANEE

SEZIONE EDILI DI BOLZANO

SETTEMBRE 1982

PROBLEMI GEOMECCANICI NELLA
REALIZZAZIONE DELLE GRANDI CAVITA'

Problemi geomeccanici nella realizzazione delle grandi cavità

Prof. Pietro Lunardi

Professore di consolidamento del suolo e delle rocce nell'Università di Firenze

1. Le caverne artificiali e le loro dimensioni

Quando si parla di ricavare nuovi spazi in sotterraneo per impieghi industriali, militari o civili ci si riferisce normalmente alla realizzazione di cavità con sezioni di scavo superiori a quelle delle normali gallerie autostradali, ferroviarie e metropolitane.

Di queste grandi cavità, definite usualmente caverne, si trovano numerosi esempi sia in Italia che all'estero, destinati, come illustrato dagli oratori che mi hanno preceduto, ai più diversi impieghi: per stoccaggio di combustibili solidi o liquidi, per centrali idroelettriche, ecc.

Se si esaminano le più importanti realizzazioni degli ultimi decenni in materia di caverne si osserva che le dimensioni della sezione trasversale di scavo non superano mai in larghezza i 35 m (per la maggior parte dei casi è inferiore ai 25 m), in altezza i 65.00 m, mentre le coperture di scavo non superano mai i 400 m e la media si aggira sull'ordine di 180 m. Si osserva inoltre che, nonostante il progresso tecnologico, le dimensioni delle grandi cavità hanno subito incrementi molto più lenti rispetto a quelle di altre opere nei lavori pubblici: basta pensare alle luci di strutture come i ponti, o gli hangar per il deposito di aerei. Allora viene da domandarsi il perchè e viene da porsi una serie di quesiti.

Esistono realmente dei limiti in fatto di larghezza di scavo e di coperture oltre i quali diventa impensabile aprire delle cavità sotterranee?

Per quali motivi i progettisti di queste opere fino a qualche anno fa si sono dimostrati molto prudenti e non si sono sentiti di superare certi limiti, quando nelle coltivazioni minerarie e nelle grotte naturali si incontrano degli esempi particolarmente arditi di cavità stabili senza rivestimento con luci da 100 a 230 m.?

A titolo di cronaca ricordo l'esistenza di una grotta naturale in Spagna che si chiama Torca della Carlista e che ha dimensioni di 230 metri.

Come gioca l'effetto scala nella progettazione e realizzazione delle cavità di grandi dimensioni?

Ritengo che la risposta a questi interrogativi abbia un minimo comune denominatore: **la statica** che, con alcuni aspetti legati a problemi di ordine psicologico e realizzativo, è condizionata da una serie di fattori che, nell'ambito della progettazione e della realizzazione delle grandi cavità, giocano in misura più o meno determinante nella limitazione delle dimensioni e della geometria dei volumi di scavo.

Analizziamo i diversi fattori osservando come singolarmente possano influenzare la statica e se esiste la possibilità di minimizzare questa loro influenza in fase di progettazione:

— **la natura del terreno:** quando si parla di natura del terreno o dell'ammasso roccioso in cui le caverne devono essere ricavate, si intende parlare delle caratteristiche geolitologiche, geostrutturali, geotecniche ed idrogeologiche delle formazioni interessate. Giocano un ruolo determinante tra le diverse proprietà dell'ammasso roccioso, quelle di resistenza e di deformabilità dei sistemi di discontinuità principali e secondari, che caratterizzano l'edificio strutturale interessato dallo scavo e dagli effetti indotti dallo stesso;



— **il tensore geostatico** che descrive lo stato tensionale preesistente all'apertura del cavo nell'ammasso roccioso: tale tensore geostatico, come noto, è lo stato di coazione risultante dalla sovrapposizione di due stati tensionali: quello indotto dai carichi litostatici in gioco, prodotti dalle coperture, e quello che il più delle volte è latente nell'ammasso roccioso come residuo di spinte tettoniche prodottesi in fase orogenetica.

Il tensore geostatico è generalmente condizionante limitatamente alla forma ed all'orientamento spaziale delle caverne. All'apertura degli scavi la situazione di sovratensione che si crea al contorno del cavo in conseguenza della deviazione del flusso delle tensioni presenti nell'ammasso roccioso, altera e modifica questo tensore geostatico iniziale;

— **la larghezza e l'altezza** della sezione di scavo nei riguardi del loro rapporto "L/h", in funzione delle coperture. A deboli profondità, dove prevale una distribuzione stratificata delle tensioni (con valori $\lambda = P_h/P_v$ dell'ordine di 0.2 ÷ 0.3), la situazione di L inferiore ad H non è condizionante per la statica, mentre a forti profondità la ripartizione delle tensioni di tipo idrostatico (con $\lambda = 1$) richiede per la stabilità valori di $L = H$, cioè sezioni di tipo subcircolare;

— **la forma della volta** è un fattore determinante per la stabilità d'insieme di una grande cavità perchè una sua definizione adeguata, in funzione delle caratteri-

stiche strutturali e geotecniche di una data formazione, è strettamente legata alla mobilitazione dell'"effetto volta" in calotta, indispensabile per la stabilità a lungo termine del cavo. Nel passato la volta a semicerchio veniva adottata universalmente in concomitanza a piedritti verticali molto alti. Oggi la sezione tende ad assumere una fisionomia di tipo ovoidale. La centrale di Waldeck II, costruita in Germania, ha una sezione di tipo ovoidale;

- la presenza di cavità adiacenti è sicuramente un fattore che può influire sulla stabilità di una caverna, ma non in maniera determinante.

Infatti eventuali interferenze di stati tensionali indotti dalla presenza di cavità adiacenti, possono essere facilmente eliminati adottando adeguati coefficienti di sicurezza (oggi valutabili mediante calcolazione) nella scelta degli interessi delle cavità;

- i sistemi di scavo (intesi più come successione delle fasi operative).

Assieme alla situazione strutturale dell'ammasso roccioso è il fattore che può condizionare più da vicino la statica delle cavità.

Premesso che la scelta dei sistemi di scavo non può prescindere dalla situazione tensionale preesistente nell'ammasso roccioso, l'apertura per campioni della sezione di progetto deve essere realizzata in maniera da deviare, sistematicamente e gradualmente, dalla calotta alle reni e quindi ai piedritti, il flusso di tensioni primarie (analogamente a come si potrebbe operare, per analogia idraulica, nell'immergere una pila di un ponte nella corrente di un liquido in moto laminare).

I sistemi di scavo possibili per la realizzazione di grandi cavità si possono ricondurre a tre tipi fondamentali:

- 1) scavo di calotta per campioni, contemporanea stabilizzazione del profilo e successivo getto del rivestimento, segue lo scavo dello strozzo per banche parallele con sistematico consolidamento dei piedritti;
- 2) scavo preliminare dei piedritti, segue la costruzione di paramenti portanti (cioè piedritti portanti) in grado di sostenere la volta, lo strozzo viene abbattuto a rivestimento completato;
- 3) apertura di diverse gallerie, di sezione ridotta, lungo il contorno, dalle quali realizzare un **preconsolidamento** che permetterà in seguito lo scavo a piena sezione.

- L'applicazione della tecnica del preconsolidamento è stata resa possibile grazie all'introduzione dei tiranti come mezzo di consolidamento e confinamento che, come è noto, è estremamente adattabile e regolabile alle varie situazioni.

La tensione dei tiranti può essere sorvegliata, misurata e modificata in funzione delle fasi costruttive e delle relative convergenze (controllate sistematicamente);

- **gli interventi di consolidamento nell'ammasso roccioso**, la loro scelta ed il loro adeguamento al tipo di roccia ed al tipo di struttura, è un altro fattore che influisce sulla stabilità delle grandi cavità. L'introduzione delle nuove tecnologie dei tiranti ha reso possibili interventi sull'ammasso durante lo scavo per campioni, o addirittura prima ancora dello scavo in sezione di progetto attraverso cunicoli di servizio esterni alla sezione della caverna, ai fini di preparare l'ammasso stesso a ricevere ed a resistere allo stato di sovratensione indotto dagli scavi di calotta. La scelta più o meno appropriata di tali interventi è determinante per la stabilità a breve ed a lungo termine della cavità, perché può ridurre i rischi connessi alla situazione geo-

strutturale, garantendo la mobilitazione e la conservazione delle caratteristiche geomeccaniche della roccia anche in quelle zone in cui la decompressione indotta dagli scavi tenderebbe ad abbattere notevolmente i parametri di resistenza e deformabilità;

- il rischio di **accidenti incontrollabili** costituisce sicuramente un limite psicologico non indifferente.

Il progettista si rende conto che le difficoltà da affrontare nello scavo di una cavità aumentano rapidamente con le dimensioni dell'opera. D'altra parte i mezzi di intervento immediato che può impiegare agevolmente nelle comuni gallerie in caso di instabilità o di crollo, diventano praticamente irriferenti ed inutilizzabili per le grandi cavità.

Le precauzioni da prendere per la regimazione delle deformazioni aumentano con la luce dei cavi e le conseguenze di una rottura locale diventano rapidamente catastrofiche.

2. Il compito del progettista

Nell'ambito della progettazione e della realizzazione di una caverna, chi ha la responsabilità ed il compito di vagliare e di coordinare le diverse tematiche connesse alla statica è il geomeccanico, una figura nuova che può identificarsi in un ingegnere specializzato in geotecnica o in un geologo con reali nozioni di statica.

La sua funzione come responsabile del progetto è principalmente quella di saper prevedere nei riguardi dell'ammasso roccioso:

- la reazione dell'ammasso alla variazione dello stato di tensioni primarie prodotta dall'apertura di cavità (e questo deve poterlo prevedere e saperlo prevenire);
- la risposta agli interventi di consolidamento e stabilizzazione della fascia perimetrale di roccia (può succedere infatti che si adottino dei sistemi di intervento e di consolidamento a cui la roccia non risponde in maniera adeguata);
- l'adattamento dell'ammasso al nuovo stato di equilibrio (abbiamo prodotto un turbamento nello stato tensionale e quindi ci deve essere un adattamento).

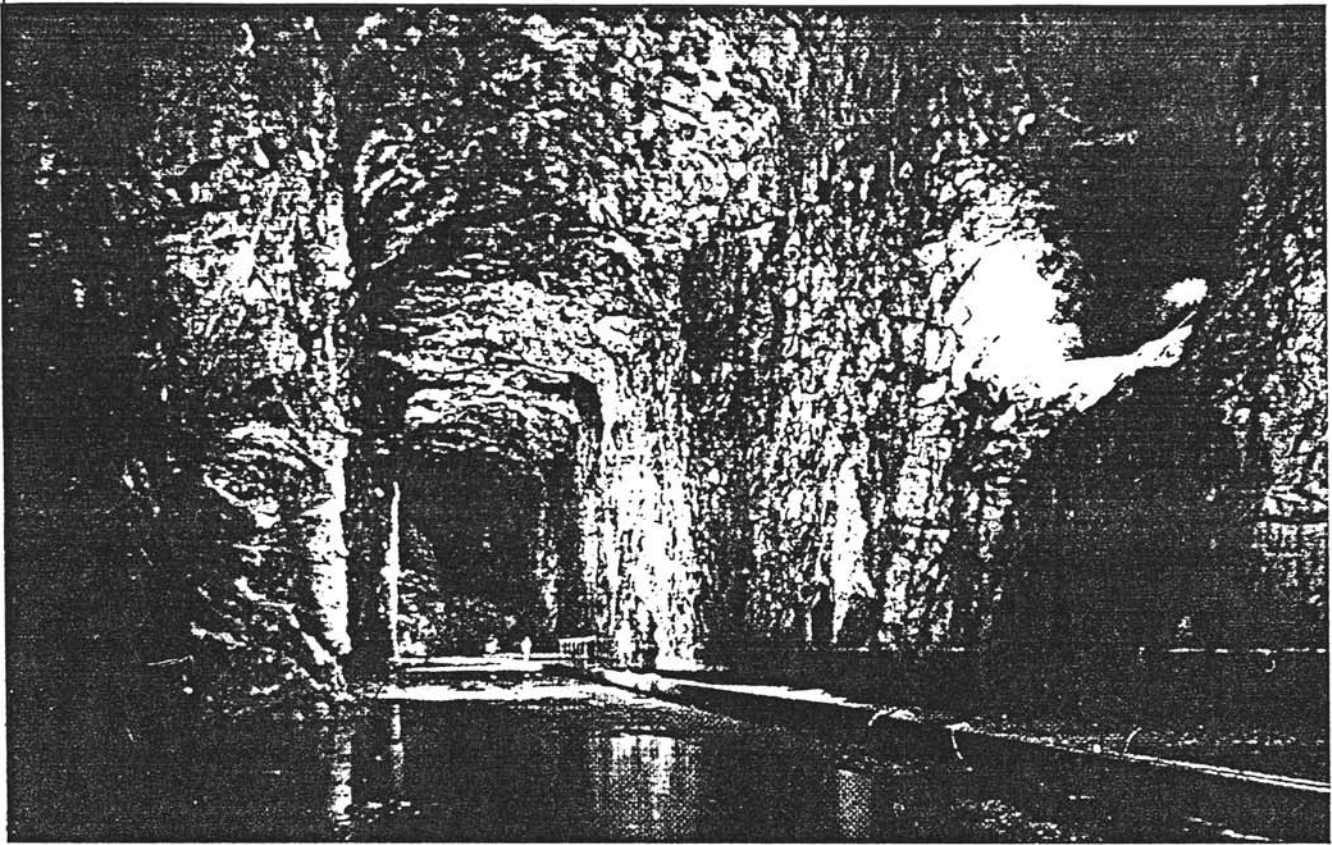
Fino a circa vent'anni fa l'ingegnere progettista doveva affrontare questi temi affidandosi soprattutto alla propria esperienza ed al proprio buon senso. Essendo l'empirismo la sola garanzia per il progettista, era ben comprensibile la sua prudenza nell'approccio al problema. Oggi il geomeccanico gode nel proprio lavoro di un situazione certamente più privilegiata.

Infatti, se da un lato può essere confortato dai mezzi teorici e sperimentali forniti da una disciplina di recente costituzione, ma in continua evoluzione, come la "Meccanica delle Rocce", dall'altro può disporre, nella risoluzione dei problemi connessi alla stabilità dell'ammasso, di tecnologie di consolidamento (tiranti, ancoraggi, iniezioni) che permettono di intervenire all'interno dell'ammasso stesso, conservandone e migliorandone le caratteristiche di resistenza e di deformabilità fino a minimizzare la funzione dei rivestimenti definitivi.

Gli effetti di questo nuovo corso si incominciano a sentire.

Infatti nelle recenti realizzazioni ed in quelle in fase di realizzazione, grazie al contributo offerto dalla Meccanica delle Rocce e dal progresso tecnologico, sono state costruite cavità fino a 35 ÷ 40 metri di larghezza e proposte - in Norvegia e in Finlandia - anche con larghezza fino a 60 metri.

Il compito e l'intervento del geomeccanico nel campo delle caverne è sicuramente più impegnativo rispetto a quello che gli compete nelle comuni realizzazioni in sotterraneo. Infatti, oltre a dover affrontare i problemi statici sopra menzionati, che vengono esaltati per l'effetto scala, la



distribuzione intensiva dei volumi rispetto a quelli delle normali gallerie lo obbliga a studi e ricerche più accurate e più dettagliate.

Generalmente il geomeccanico interviene in tre momenti diversi nella progettazione e nella realizzazione di una caverna.

Prima dell'inizio degli scavi, con uno studio di fattibilità che si articola attraverso la raccolta, l'interpretazione e l'elaborazione dei dati forniti dalla campagna geognostica e da quella geotecnica condotta parallelamente in laboratorio ed in sito.

Queste operazioni comportano l'acquisizione di informazioni relative:

- alla litologia, alla tettonica, all'orientamento ed alla distribuzione delle diverse famiglie di discontinuità;
- alla natura delle discontinuità come potenza, estensione, stato fisico, presenza di materiali interstrato;
- all'idrologia sotterranea;
- alle caratteristiche di resistenza e di deformabilità dell'ammasso e della matrice attraverso prove in sito e laboratorio;
- al tensore geostatico (è un'altra quantità che si definisce attraverso misurazioni in sito).

I parametri così acquisiti vengono poi utilizzati per la preparazione dei modelli matematici che si valgono di sistemi di calcolo particolarmente sofisticati come quelli agli elementi finiti, linee caratteristiche e altri, che devono fornire al progettista una prima risposta di previsione sul comportamento in termini di tensione e di deformazione della cavità in esame.

Dall'analisi dei risultati e da considerazioni geostrutturali discende poi una scelta particolarmente delicata: quella dell'ubicazione e dell'orientamento della caverna.

In tal senso si dovrà procedere, per esempio, in maniera tale da orientare la direzione di sollecitazione principale con l'asse longitudinale dell'opera; oppure in modo da far coincidere, se possibile, le superfici di scavo della ca-

verna con le superfici di discontinuità maggiore; o in modo da beneficiare di condizioni di stabilità naturali andando, per esempio, ad ubicare la cavità nel cuore di un anticlinale.

L'intervento del geomeccanico durante la realizzazione dell'opera consiste in un controllo sistematico della risposta dell'ammasso roccioso allo scavo od agli interventi di consolidamento, attraverso la misurazione di convergenze radiali del cavo e della zona decompressa, dell'attività microsismica della roccia sollecitata da stati tensionali crescenti e continuamente in evoluzione.

Parallelamente ai controlli deve poi procedere la verifica dei dati forniti dai modelli matematici ed il loro aggiustamento in funzione di quelli acquisiti sperimentalmente in relazione al reale comportamento dell'opera. È infine auspicabile, a lavori ultimati, la installazione di un sistema di controllo che permetta l'auscultazione dell'ammasso roccioso e la verifica del suo adattamento ai nuovi stati tensionali.

Ciò si realizza attraverso misure di convergenza, microsismiche e di tensione nei tiranti.

Dall'analisi compiuta discende che, in definitiva, il fattore condizionante nel porre dei limiti alla realizzazione di cavità sempre più grandi è il problema statico.

Abbiamo esaminato quali sono i fattori che possono condizionare la statica e quali di essi possono essere minimizzati grazie ad adeguate scelte progettuali. Abbiamo constatato che tra questi fattori quelli ancora da superare sono di natura psicologica. Si può quindi concludere che oggi, superati gli indugi, grazie al contributo della Meccanica delle Rocce e delle nuove tecnologie, la soglia dei 35 metri di larghezza e dei 400 metri di profondità per le grandi cavità è sicuramente superabile.

L'apertura di grandi cavità in terreni di buona consistenza a piccola profondità porrà problemi di carichi gravitativi importanti indotti, a causa dello scarso serraggio dell'ammasso roccioso sulle deboli coperture, ma la statica potrà essere assicurata da un accurato studio geo-

strutturale, da opportuni metodi di consolidamento e dalla scelta oculata delle fasi e dei sistemi di scavo.

L'apertura di grandi cavità in terreni di scarsa consistenza a piccola profondità porrà sempre problemi di carichi gravitativi importanti sia in calotta che sui paramenti, ma la statica potrà essere assicurata da una appropriata successione delle fasi di scavo e da interventi sistematici di preconsolidamento della massa rocciosa.

L'apertura, invece, di grandi cavità in terreni di buona consistenza a grande profondità potrà richiedere, onde evitare una situazione di elastoplasticità, degli interventi di detensionamento, che permettono di mantenere l'ammasso roccioso al contorno del cavo, per uno spessore voluto, in condizioni elastiche, attraverso l'attivazione ed il controllo dei fenomeni formativi che, opportunamente pilotati, possono portare unicamente a condizioni di stabilità. Interventi di questo tipo possono richiedere sistemi operativi particolari.

Pur presentandosi l'ammasso roccioso più serrato a grandi profondità e quindi meno condizionato dai sistemi di discontinuità secondaria, è fondamentale l'individuazione

dei sistemi di discontinuità principale che possono isolare volumi di roccia nella scala della cavità.

L'apertura infine di grandi cavità in terreni di scarsa consistenza a grandi profondità, porrà problemi analoghi a quelli della stessa cavità a piccola profondità, con la sola variante che si dovrà tener conto di condizioni di tipo idrostatico differente.

Potenzialmente quindi i progettisti sono in grado, con le dovute cautele, di far fronte alle situazioni più diverse, anche superando le soglie dimensionali di cui sopra, soprattutto se sapranno valorizzare e sfruttare oltre alla precompressione artificiale creata con le nuove tecnologie di consolidamento, quella naturale fornita gratuitamente dall'ammasso roccioso. Quando in uno scavo si innesca l'"effetto volta", infatti, è il peso proprio del materiale che equilibra le reazioni orizzontali, ed in sotterraneo, al contrario di quanto avviene all'esterno (cioè in superficie: per i ponti, per esempio, in muratura, ecc.), il peso proprio non costa niente, come d'altra parte la precompressione che ne deriva.