



PIETRO LUNARDI

*Docente di Difesa e Conservazione del Suolo
Università di Parma*

LA RICERCA E LA TECNOLOGIA NELLA REALIZZAZIONE DI GRANDI CAVITÀ SOTTERRANEE: IL LABORATORIO DI FISICA NUCLEARE DEL GRAN SASSO

Sommario

Fino a pochi anni fa lo sfruttamento intensivo del sottosuolo per ricavare spazi sotterranei da utilizzare per le funzioni e le strutture della vita associata era una possibilità riservata solo a quei paesi caratterizzati da situazioni geologico-geotecniche eccellenti.

Oggi i progressi compiuti nella progettazione e nella costruzione di opere sotterranee permettono di scavare qualsiasi tipo di terreno estendendo questa possibilità anche ai paesi dove le condizioni naturali sono meno favorevoli.

Trasferire nel sottosuolo attività sinora svolte in superficie è diventato più conveniente, si assiste così ad una crescente richiesta di grandi cavità e sempre più spesso si parla di pianificazione del sottosuolo.

Anche in Italia questa richiesta è crescente e negli ultimi anni si sono realizzate opere molto importanti.

Tra queste, la realizzazione del laboratorio di fisica nucleare del Gran Sasso, considerate le coperture in gioco, le dimensioni e la forma delle caverne da realizzare, il tipo di roccia da scavare e la necessità di utilizzare strutture di rivestimento non tradizionali al fine di evitare il ricorso ad importanti spessori di calcestruzzo, materiale fonte di radiazioni non compatibili con gli esperimenti scientifici da eseguire, è stata un'opera di ingegneria particolarmente ardua ed impegnativa.

La relazione ne illustrerà gli aspetti progettuali più salienti.

1. Generalità

Ci si avvicina agli anni 2000 all'insegna di una sempre maggiore utilizzazione del sottosuolo per gli impieghi più vari. Questo interesse dell'uomo moderno per il sottosuolo deriva da molteplici fattori:

- la mancanza di spazi in superficie ancora sfruttabili, specialmente nelle aree più intensamente urbanizzate;
- motivi ecologici e paesaggistici;
- esigenze strategiche e di sicurezza;
- i favorevoli riflessi di carattere economico, sia per l'investimento che per l'esercizio (risparmi energetici e di manutenzione).

È indubbio che tanto più l'utilizzazione si farà più spinta tanto più sarà indispensabile una accurata pianificazione che fino ad oggi è mancata per tutta una serie di motivi, ma che in futuro si renderà indispensabile per rendere possibili gli investimenti in questo settore e per ottimizzarli sia sotto il profilo operativo sia sotto quello economico.

Perché la pianificazione si realizzi è indispensabile che da un lato possa prescindere dalla natura dei terreni cui si riferisce, dall'altro lato possa fare riferimento ad investimenti attendibili e precisi.

Per questo motivo, nella corsa al sottosuolo ed al suo sfruttamento, si sono trovati finora avvantaggiati quei Paesi che godono delle migliori condizioni:

- geo-morfologiche;
- geo-litologiche;
- geo-meccaniche;
- geo-idrologiche.

I paesi scandinavi, ad esempio, grazie all'eccellente natura delle rocce che costituiscono il loro sottosuolo fanno uso intensivo del sottosuolo da diverse decine di anni e la pianificazione dello stesso è ormai una realtà.

In altri paesi, dove le condizioni naturali sono molto meno favorevoli, e tra questi è l'Italia, lo sfruttamento del sottosuolo è progredito molto più lentamente: in passato difficoltà progettuali e costruttive allora insormontabili ci hanno obbligato a rinunciare a realizzare opere quali: gallerie stradali, ferroviarie, idrauliche, caverne per centrali idroelettriche, ecc.

Oggi, a differenza di un decennio fa, i grandi progressi compiuti nel campo delle tecniche e tecnologie di consolidamento dei suoli e delle rocce e quelli compiuti nel calcolo numerico, nella simulazione dei modelli matematici, ecc., permettono di garantire la fattibilità delle opere in sottosuolo in qualsiasi tipo di terreno e di assicurare la massima trasparenza e attendibilità nella progettazione delle stesse opere.

Si può finalmente affermare che non esiste situazione geo-morfologica, geo-litologica, geo-meccanica, geo-idraulica, che non possa essere affrontata per l'insediamento di attività umane, di conseguenza in questo ultimo decennio è sorta anche nel nostro Paese una gran richiesta di utilizzo del sottosuolo in condizioni geologico-geotecniche sempre più proibitive e per dimensioni di scavo che vanno di volta in volta sempre più lievitando.

Come rispondono i progettisti ed i costruttori a questa sfida? Rispondono con i fatti! La testimonianza è fornita da due tra le più importanti opere realizzate negli ultimi cinque anni proprio in Italia. Mi riferisco ad una cavità di 30 metri di diametro in fase di realizzazione a Milano in terreni sciolti con copertura di 4 m e ad un'altra di 22 metri di diametro, già ultimata, realizzata in calcari del Trias e Giura con coperture di 1400 metri.

Entrambe possono considerarsi attualmente delle opere record nel campo dell'ingegneria del sottosuolo per tutta una serie di motivi che illustreremo dopo aver fatto alcune considerazioni di carattere generale circa le problematiche progettuali delle grandi cavità.

2. Il problema delle caverne artificiali

Se si esaminano le più importanti realizzazioni degli ultimi decenni in materia di grandi cavità, dette anche 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), in altezza i 65 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 loro dimensioni 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 hangars per il deposito di aerei.

Eppure s'incontrano in natura esempi particolarmente arditi di cavità stabili senza rivestimento con luci anche superiori ai 200 m. Esiste in Spagna una grotta naturale detta «Torca della Carlita» di ben 230 m di luce! Per quali motivi, dunque, i progettisti di opere in sotterraneo si sono dimostrati così prudenti e non se la sono sentita di superare certi limiti?

Se si parla di *caverne naturali*, l'esistenza della Grotta naturale di Torca della Carlita è lì a dimostrare che non esistono limiti.

Se si parla di *caverne artificiali*, si può dire che i limiti sono dettati e condizionati da una serie di fattori che giocano in misura più o meno determinante in funzione della scala dell'opera da realizzare. Essi sono:

- la natura del terreno, con le sue caratteristiche geomorfologiche, geolitologiche, geomeccaniche e geoidrologiche;
- l'entità e l'orientamento del tensore geostatico naturale;
- il rapporto tra larghezza ed altezza della sezione di scavo in relazione alle coperture in gioco;
- la forma della volta;
- i sistemi e le fasi di scavo adottati per ottenere una graduale deviazione del flusso delle tensioni dalla calotta alle reni e quindi ai piedritti (analogamente a come si potrebbe operare, per analogia idraulica, nell'immergere una pila di un ponte nella corrente di un liquido in moto laminare);
- la disponibilità di adatti strumenti di consolidamento e stabilizzazione;
- il limite psicologico costituito dal rischio di incidenti incontrollabili, che aumenta in maniera più che proporzionale con le dimensioni dello scavo. Infatti, i mezzi d'intervento immediato che si possono impiegare efficacemente nelle comuni gallerie in caso di instabilità diventano praticamente irrilevanti ed inutilizzabili per le grandi cavità.

Per capire in che termini si pone il problema della stabilità di una grande cavità, analizziamo che cosa si produce in un mezzo interessato da un campo di tensioni al momento in cui si realizza uno scavo.

Inevitabilmente si produce un'alterazione di questo campo di tensioni, che vengono deviate verso zone esterne alla galleria (fig. 1).

Questa modificazione è il primo passo compiuto dalla natura nel tentativo di creare l'«effetto arco» necessario per la stabilità del cavo ed il suo successo dipende dalla nostra capacità di coadiuvarla, con adeguati sistemi di avanzamento e stabilizzazione, nel conseguimento di una nuova situazione di equilibrio stabile a breve ed a lungo termine.

Quanto più l'«effetto arco», compatibilmente con la resistenza del mezzo, riesce a mobilitarsi vicino alle pareti di scavo, tanto più la cavità risulterà stabile. Si dovrà allora operare affinché in ogni caso la canalizzazione delle tensioni avvenga in un terreno dotato di resistenza sufficiente a garantire che le sollecitazioni e le relative deformazioni si evolvano in campo elastico.

Si possono configurare, a questo punto, tre diverse situazioni:

- a) L'«effetto arco» *si mobilita in corrispondenza al profilo di scavo*: se la resistenza e la deformabilità del terreno saranno sufficienti a garantire una risposta elastica agli stati di coazione indotti dall'apertura del cavo, la stabilità sarà garantita con la mobilitazione dell'«effetto arco» vicino alla cavità. È la situazione più semplice per il progettista di gallerie e per gli operatori degli scavi in quanto, essendo la natura da sola in grado di assicurare la stabilità globale della cavità, all'operativo rimane solo il compito di intervenire localmente per prevenire possibili distacchi gravitativi di blocchi isolati dall'intreccio delle discontinuità del materiale roccioso;
- b) L'«effetto arco» *si mobilita lontano dal profilo di scavo*: se il terreno reagisce anelasticamente agli stati di coazione indotti, il fenomeno di plasticizzazione che s'innescia al contorno della cavità, per poi propagarsi radialmente, produce lo spostamento della canalizzazione delle tensioni più all'interno dell'ammasso, ove lo stato tensionale di tipo triassiale risulta compatibile con le caratteristiche di resistenza del terreno; l'«effetto arco», che tende così a prodursi lontano dal profilo di scavo, potrà essere richiamato verso il cavo, o per lo meno arrestato, solo attraverso la realizzazione di adeguati interventi di stabilizzazione dell'anello di terreno plasticizzato. È il caso delle caverne scavate sotto il Gran Sasso per realizzare il laboratorio di fisica nucleare, opera di rinomanza mondiale, di cui illustreremo più avanti alcuni aspetti progettuali;
- c) L'«effetto arco» *non riesce a mobilitarsi*. È il caso dei terreni incoerenti o sciolti, in cui l'«effetto arco», non riuscendo a formarsi *per via naturale* come ai casi a) e b), deve essere prodotto *per via artificiale*.

Se la cavità da realizzare ha sufficiente copertura ($H > \varnothing/2$) da consentire l'impiego delle tradizionali tecniche di consolidamento (iniezioni a bassa pressione, jet-grouting, ecc.), una fascia di terreno trattato di adeguato spessore potrà garantire la corretta canalizzazione delle tensioni al contorno al momento dell'apertura del cavo e, di conseguenza, la mobilitazione artificiale dell'«effetto arco» in prossimità della calotta.

Se d'altra parte le coperture sono talmente ridotte ($H < \varnothing/2$) da imporre una limitazione delle pressioni d'iniezione e quindi da impedire la realizzazione di consolidamenti con funzione statica al contorno del cavo, diventa imperativo ricorrere a sistemi costruttivi diversi come il metodo dell'«arco cellulare», che si sta applicando in questi giorni a Milano per la costruzione della Stazione «Venezia» del Passante Ferroviario, una caverna, cui abbiamo già accennato in premessa, di quasi 30 m di luce, ubicata a soli 4 metri di profondità sotto il centro della città (fig. 2 e foto 1).

Ora che abbiamo esaminato il problema della stabilità delle grandi cavità sotterranee artificiali ed accennato alle vie da seguire per ottenerne la completa stabilizzazione a breve ed a lungo termine, vediamo come si è operato in qualche lavoro già realizzato.

3. Il laboratorio di fisica nucleare del Gran Sasso

Il laboratorio Nazionale del Gran Sasso è attualmente

il più grande Laboratorio sotterraneo di fisica del mondo efficacemente schermato contro gli effetti della radiazione cosmica.

L'importanza di quest'opera d'ingegneria sotto il profilo progettuale scaturisce da un duplice motivo:

- le forti coperture in gioco (circa 1400 m) in relazione alla resistenza dell'ammasso roccioso ed alle notevoli dimensioni degli scavi;
- gli spessori molto ridotti delle strutture di rivestimento delle caverne, ottenuti affidando la stabilità delle stesse alla roccia resa autoportante da speciali interventi di consolidamento, allo scopo di minimizzare l'uso del cemento, fonte di radiazioni dannose agli esperimenti cui è destinato il laboratorio.

Il laboratorio (fig. 3) consta di tre caverne distinte, di cui una di 22 metri di luce, adiacenti tra loro, e di altre opere sotterranee di contorno quali: gallerie di collegamento con il traforo autostradale, locali antincendio, centrale operativa, centrale di ventilazione, centrale elettrica e centrale interferometrica.

La figura 4 mostra una sezione geologica del massiccio del Gran Sasso eseguita in corrispondenza al tracciato del traforo autostradale, a breve distanza dal laboratorio. Esso è ubicato nella formazione «Scaglia», costituita da calcari molto compatti, caratterizzati da una fitta microfessurazione subparallela alla stratificazione, ma privi di discontinuità tettoniche importanti.

Le prove di rottura, eseguite su campioni di roccia prelevati appositamente dalle carote dei sondaggi esplorativi, posero in evidenza il comportamento fragile dei calcari, che sollecitati oltre il proprio limite di resistenza giungevano alla rottura improvvisamente e bruscamente (fig. 5).

I lavori di scavo sono avvenuti costantemente sotto falda con pressioni d'acqua dell'ordine di circa 10 atmosfere.

Una valutazione ponderata di tutti i dati disponibili permise di desumere i seguenti parametri geotecnici:

- peso di volume dell'ammasso roccioso: 2,75 t/mc;
- angolo d'attrito di picco: 40°;
- angolo d'attrito residuo: 36°;
- coesione di picco: 500 t/mq;
- coesione residua: 50 t/mq;
- modulo elastico di picco: 2.500.000 t/mq;
- modulo elastico residuo: 1.250.000 t/mq;
- dilatanza in zona di rottura: 0,0 ÷ 0,2%.

I calcoli di stabilità eseguiti con il metodo delle linee caratteristiche mostrarono che l'ammasso roccioso, in seguito agli scavi, sarebbe stato sollecitato al di là delle sue capacità di resistenza. Il comportamento fragile del materiale imponeva quindi di adottare interventi di stabilizzazione che, oltre a garantire la tenuta dei cavi nel breve e nel lungo termine, aumentassero apprezzabilmente la coesione d'insieme dell'ammasso roccioso in una fascia prossima alle pareti di scavo, riducendo al minimo il pericolo di detensionamento naturale, con scoppi di roccia in corrispondenza dei paramenti.

Si pensò quindi di realizzare al contorno delle cavità una fascia di roccia armata mediante la messa in opera sistematica di ancoraggi passivi a protezione totale (fig. 6), che cucendo le superfici di discontinuità potenziali più o meno latenti nell'ammasso roccioso ne aumentassero considerevolmente la resistenza al taglio. Resa così la roccia autoportante, sarebbe stato sufficiente un sottile rivestimento di spritz-beton armato con rete elettro-

saldato per impedire eventuali fenomeni d'instabilità localizzati.

Considerate le dimensioni delle cavità, la debole curvatura della calotta, e tenuto conto delle esperienze già maturate nella zona con l'esecuzione del traforo autostradale, si ritenne adeguata l'adozione di una pressione di stabilizzazione pari a circa 25 t/mq, che avrebbe permesso di raggiungere l'equilibrio della caverna con 19,5 ÷ 25 cm di convergenza radiale media a seconda del valore della dilatanza assunto per i calcoli (vedi linee caratteristiche in fig. 7).

Stabilito l'intervento di stabilizzazione necessario, rimanevano da scegliere i materiali più idonei per realizzarlo. In particolare, dato che la stabilità sarebbe stata affidata per il 90% alla fascia di roccia armata, era particolarmente delicata la scelta dei materiali più idonei per il confezionamento degli ancoraggi, la cui azione per nessuna ragione dovrà venir meno nel tempo.

Il pericolo costituito dall'umidità dovuta alla presenza d'acqua nella roccia suggerì di adottare ancoraggi d'acciaio inossidabile di tipo martensitico AISI 420, che alle alte doti di resistenza a sollecitazioni di taglio-trazione unisce un'ottima resistenza alla corrosione dovuta all'acqua.

In fig. 8 sono illustrate le fasi di lavoro per la realizzazione della caverna laboratorio «C». L'esigenza da rispettare era quella di realizzare il passaggio tra i due stati tensionali, antecedente e conseguente gli scavi, nella maniera più graduale possibile, in modo da ottenere una deviazione progressiva del flusso di tensioni circostante.

Il modo di procedere è stato quindi il seguente:

- avanzamento in calotta di un cunicolo di circa 6 m di diametro;
- allargo del cunicolo, per campioni, a tutta la calotta, con contemporanea stabilizzazione dello scavo mediante la posa di ancoraggi passivi d'acciaio inossidabile Ø 30,6 mm, lunghezza 6 ÷ 8 m, tiro di esercizio 40 t, disposti secondo una maglia di due metri di lato, e di un primo strato di spritz-beton (fig. 9 e foto 2 e 3). In zone ove la roccia risultava più frantumata l'intervento veniva rinforzato adottando ancoraggi di maggiore lunghezza (10 ÷ 12 m) disposti con maggiore frequenza;
- scavo dello strozzo in cinque fasi stabilizzando contemporaneamente i paramenti mediante ancoraggi d'acciaio inossidabile passivi e spritz-beton.

La bontà delle scelte progettuali adottate fu dimostrata allora dal soddisfacente andamento dei lavori di scavo ed è confermata oggi, a quasi dieci anni di distanza, dalla positiva risposta dell'ammasso roccioso che perdura nel tempo.

Il grande interesse suscitato dal laboratorio del Gran Sasso e dalle prospettive di ricerca che esso ha aperto alla comunità scientifica ha stimolato nuove proposte sperimentali.

Per attuare tali progetti, ed allo stesso tempo potenziare le opere già realizzate, è emersa la necessità di ampliare le strutture attuali.

Per quanto riguarda i lavori in sotterraneo si prevede in particolare di costruire:

- una galleria d'accesso indipendente;
- due nuove caverne.

Questi nuovi lavori sono attualmente oggetto di una proposta di legge in corso di approvazione da parte del Governo.

4. Conclusioni

Il laboratorio di fisica nucleare del Gran Sasso costituisce un esempio significativo delle molteplici possibilità che ci offre il sottosuolo di ottenere nuovi spazi da utilizzare per gli scopi più disparati.

In Italia rispetto ad altri Paesi, anche a causa di condizioni geologiche non favorevoli, le costruzioni in sotterraneo sono meno diffuse, ma la recente messa a punto di tecnologie di scavo e stabilizzazione adatte ai nostri terreni, indurrà anche noi a sfruttare in maniera sempre più intensiva il sottosuolo per costruzioni di tipo civile, industriale o militare: l'affollamento delle nostre aree urbane, il possibile trasferimento di lavorazioni rumorose o comunque nocive, il facile collegamento, l'efficace protezione, considerata nei suoi diversi aspetti verso la struttura stessa e verso l'ambiente, sono tutti motivi che giustificano la collocazione di determinate strutture in sotterraneo.

Numerosi segnali ci indicano che si sta prendendo coscienza di questo: varie amministrazioni stanno già valutando la possibilità di dotare le loro città di infrastrutture sotterranee quali: parcheggi per auto, impianti sportivi, locali per spettacoli e concerti.

Presto anche in Italia si parlerà di pianificazione del sottosuolo.

RAPPRESENTAZIONE SCHEMATICA DEL...

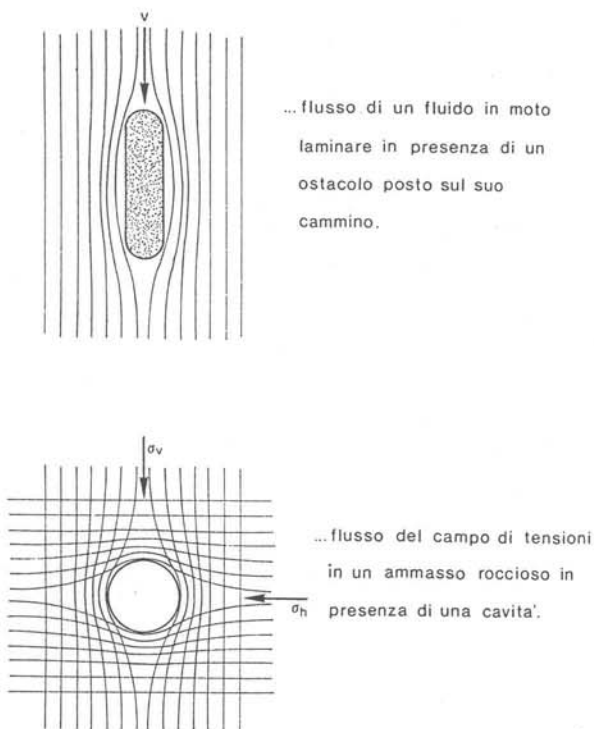


Fig. 1.

Bibliografia

- P. LUNARDI, *Problemi geomeccanici nella realizzazione delle grandi cavità*, Atti del Convegno sul tema «Lo spazio in sotterraneo come nuovo utilizzo del territorio», Bolzano, Settembre 1982.
- L. LEONARDI, G. LOMBARDI, P. LUNARDI, F. MARINI, *Progetto e studi di fattibilità per la realizzazione del laboratorio di fisica sub-nucleare in caverna sotto il Gran Sasso, Gallerie e grandi opere sotterranee*, n. 22, Ottobre 1985.
- M. MANCINI, *Esperienze progettuali per la costruzione del laboratorio di fisica sub-nucleare del Gran Sasso*, Congresso Internazionale su «Grandi Opere Sotterranee», Firenze 8-11 Giugno 1986.
- A. COLOMBO, P. LUNARDI, E. LUONGO, *Innovative techniques for the realization of large diameter tunnels in loose land*, Congresso Internazionale su «Progress and Innovation in Tunnelling», Toronto 9-14 Settembre 1989.
- P. LUNARDI, *Un nuovo sistema costruttivo per la realizzazione di gallerie di grande luce in terreni sciolti: l'«Arco Cellulare»*, Quarry and Construction, n. 2 anno 1990.

ARCO CELLULARE

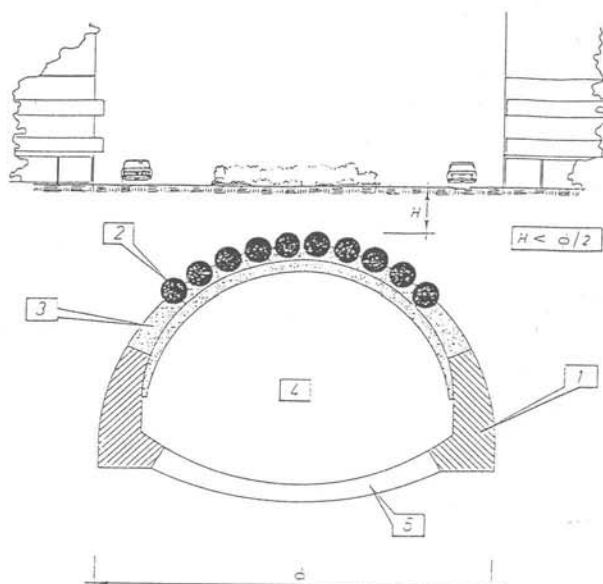


Fig. 2 - Sintesi delle fasi esecutive dell'«Arco Cellulare»: 1) getto dei piedritti; 2) infissione dei tubi prefabbricati; 3) getto dell'arco di calotta; 4) scavo; 5) getto dell'arco rovescio.

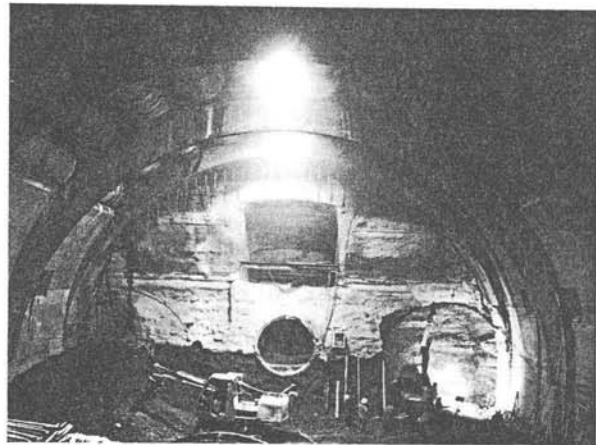


Foto 1 - La stazione «Venezia» durante la fase di scavo dello strozzo.

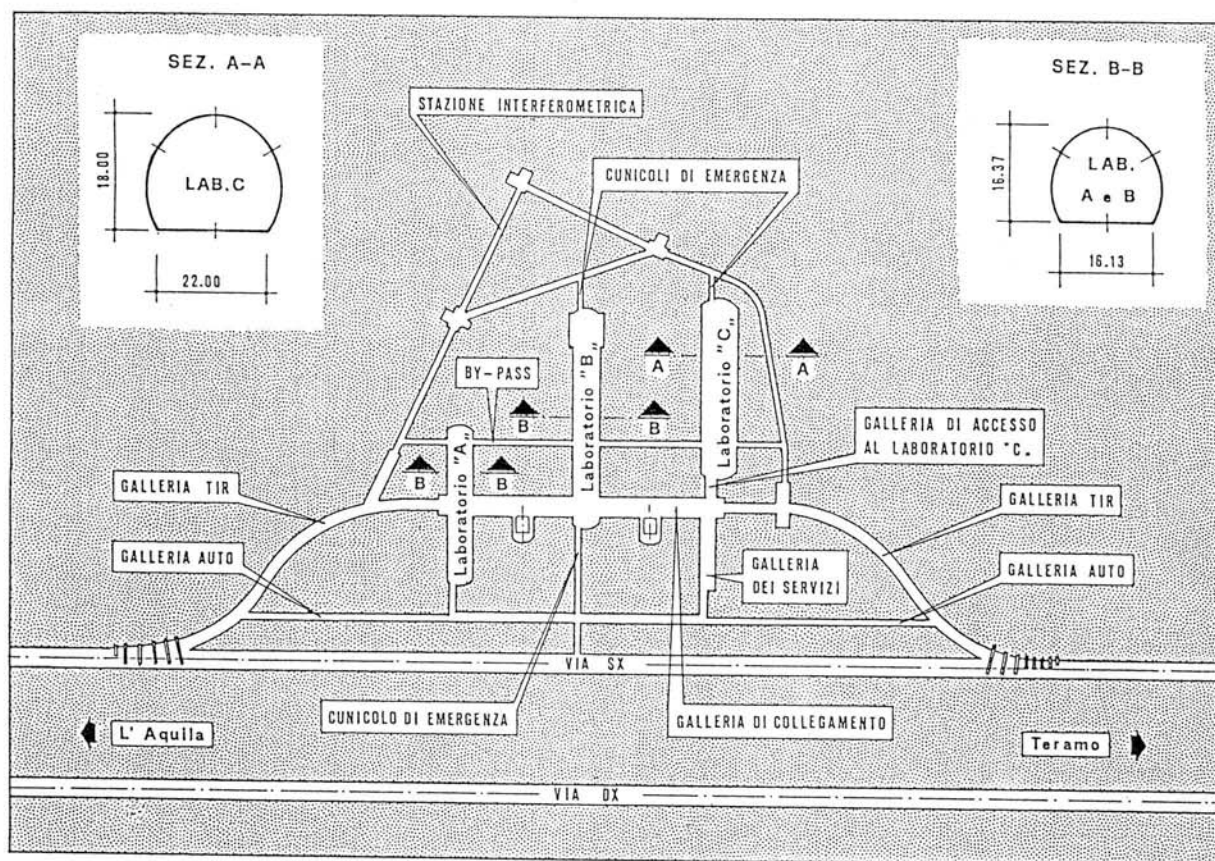


Fig. 3.

TRAFORO AUTOSTRADALE DEL GRAN SASSO PROFILO GEOLOGICO LONGITUDINALE

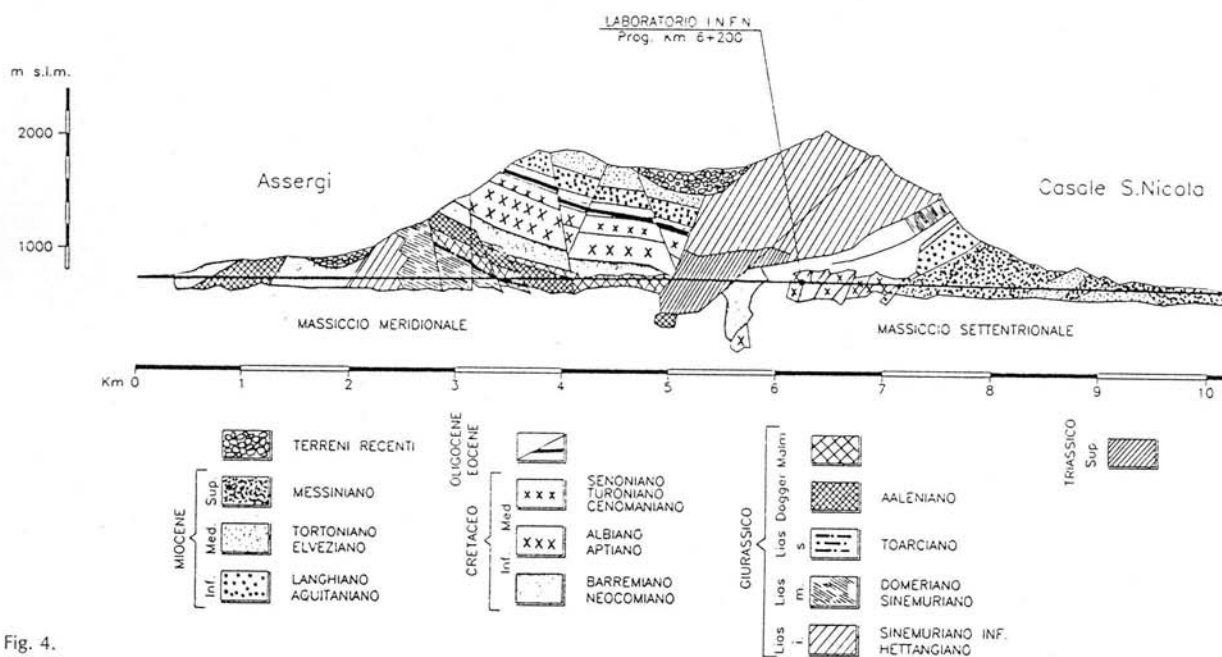


Fig. 4.

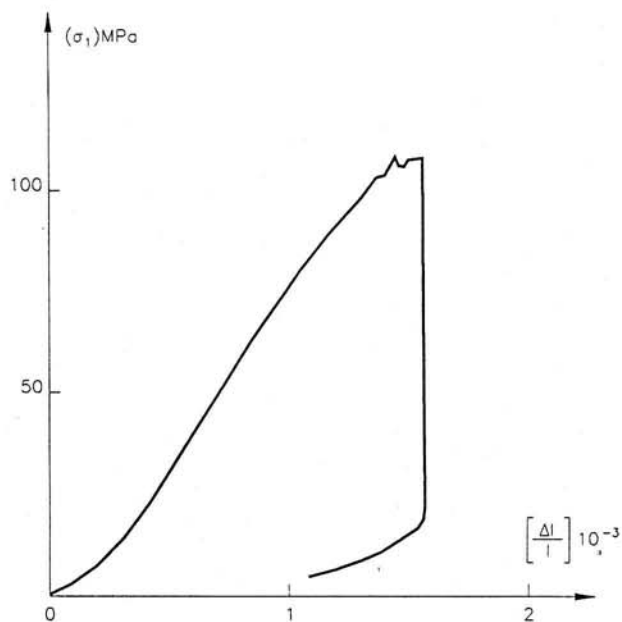


Fig. 5 - Prova di compressione semplice su campione che evidenzia il comportamento elasto-fragile del calceare.

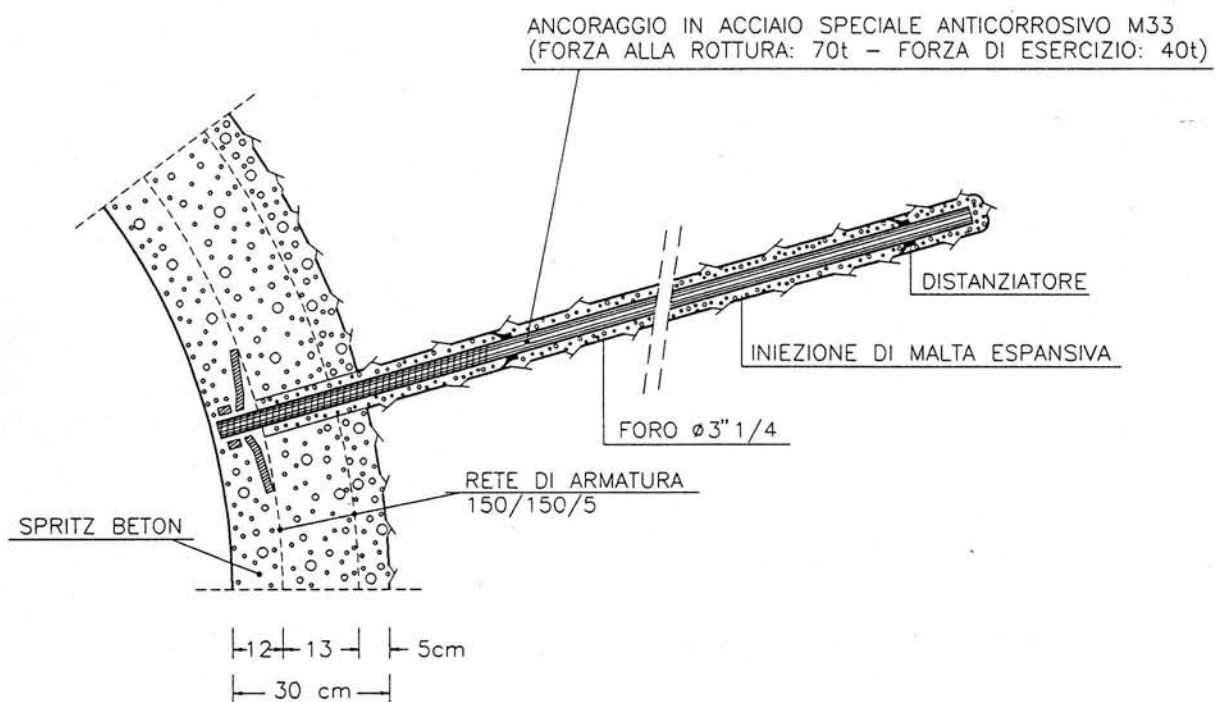


Fig. 6.

LABORATORIO I.N.F.N.
TRAFFICO DEL GRAN SASSO

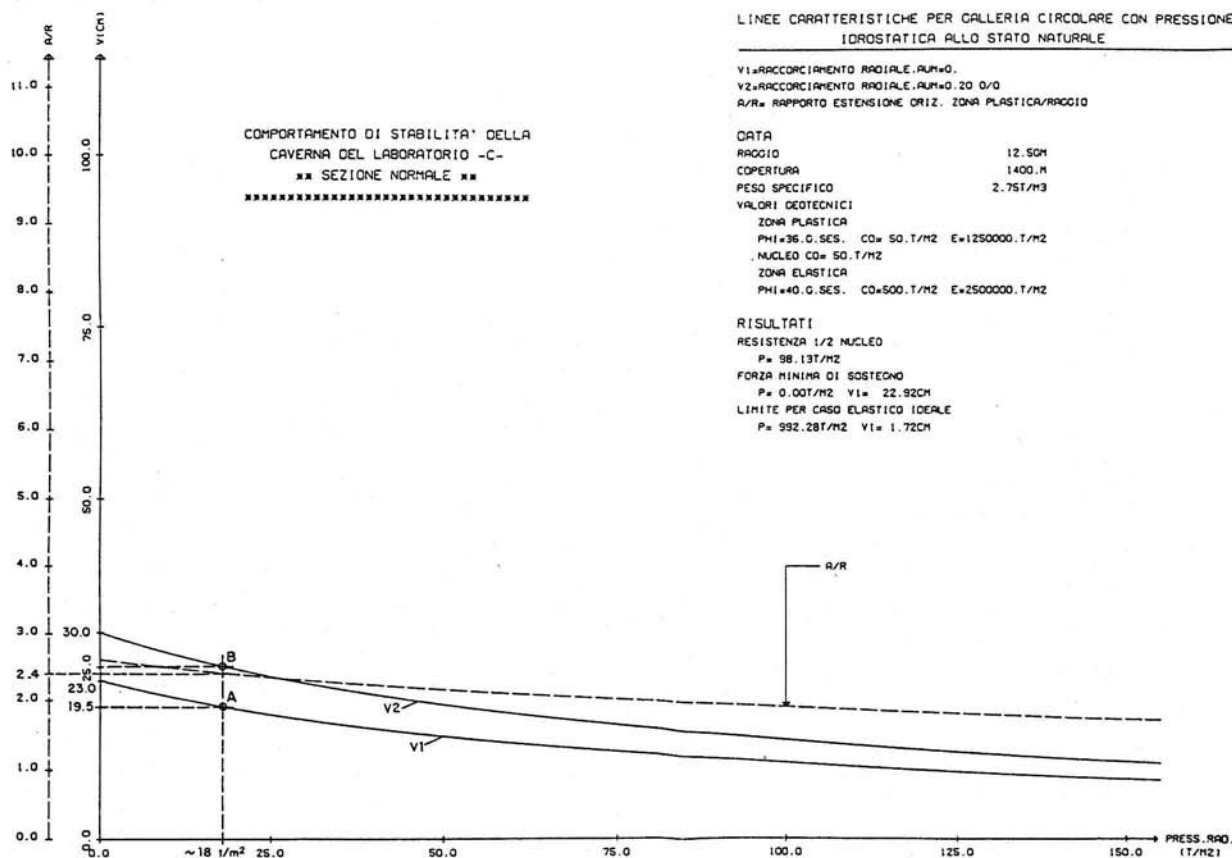


Fig. 7.

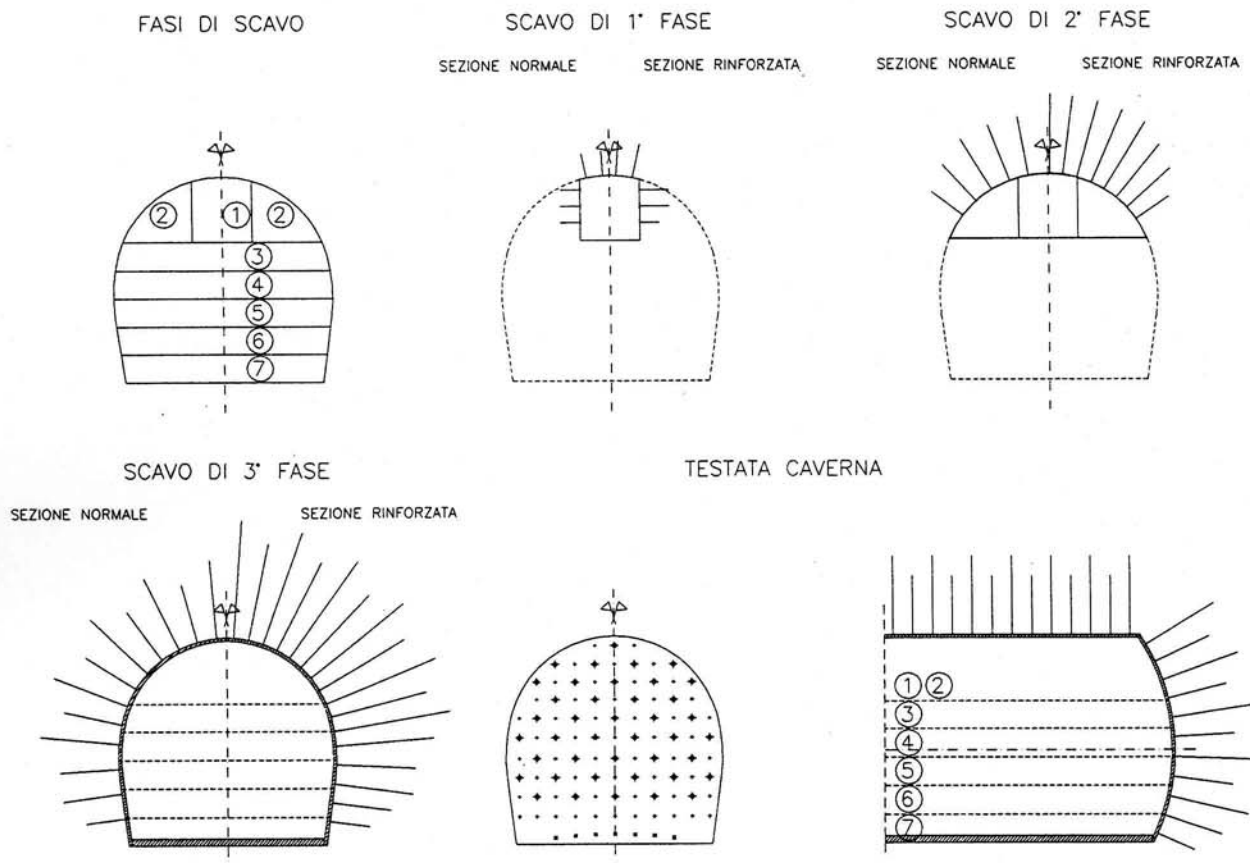


Fig. 8 - Fasi di scavo e disposizione degli ancoraggi.

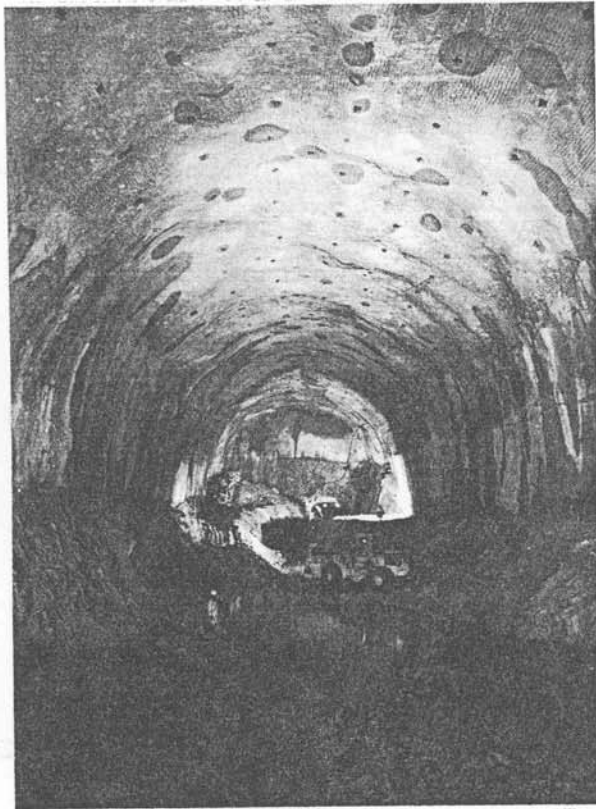


Foto 2 - Il laboratorio «B» in fase di scavo.

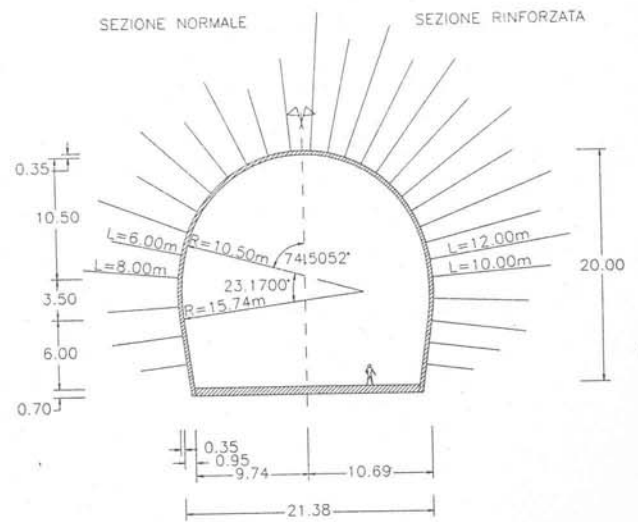


Fig. 9 - Geometria dello scavo del laboratorio «C» ed interventi di stabilizzazione.

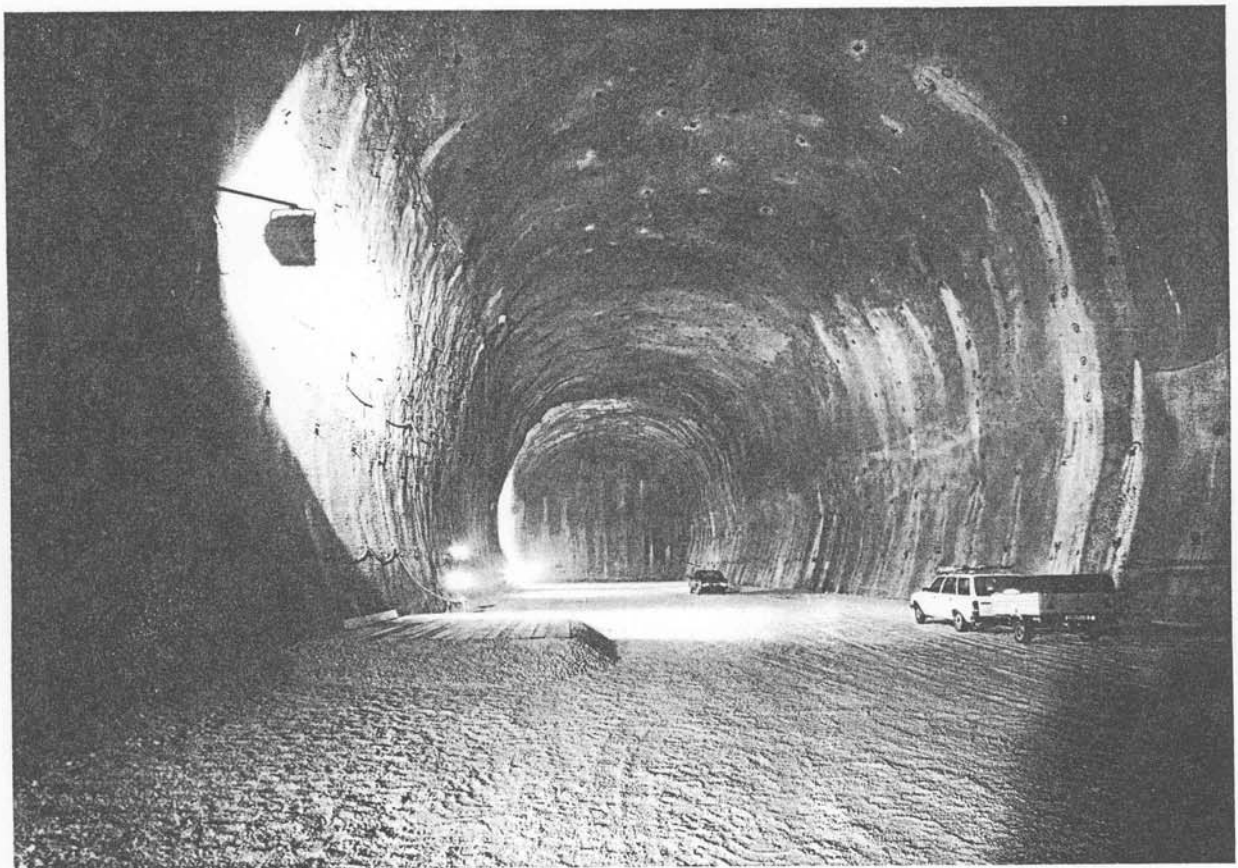


Foto 3 - Laboratorio «C».