

LABORATORIO DI FISICA NUCLEARE NELLA GALLERIA DEL GRAN SASSO



A.N.A.S.

COGEFAR S.p.A.

Progetto e studi di fattibilità per la realizzazione del laboratorio di fisica sub-nucleare in caverna sotto il Gran Sasso*

Luciano Leonardi**
Giovanni Lombardi***
Pietro Lunardi****
Francesco Marini*****

SOMMARIO

Si riferisce sugli studi di fattibilità eseguiti per la realizzazione del laboratorio di fisica sub-nucleare in caverna attualmente in corso di costruzione sotto il Gran Sasso, la cui disponibilità porrà l'Italia in una posizione di privilegio nel campo di tutta quella sperimentazione scientifica che necessita, per dare risultati attendibili, di una forte attenuazione del flusso di raggi cosmici. La sua costruzione costituirà anche una grande opera d'ingegneria, considerate le coperture in gioco, le dimensioni e la forma delle caverne da realizzare, nonché 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 notoriamente fonte di radiazioni di tipo radioattivo non compatibili con gli esperimenti che si intende eseguire nel laboratorio.

SOMMAIRE

Projet et études préliminaires pour la réalisation du laboratoire de physique subnucleaire sous le Gran Sasso

Le text concerne les études préliminaires pour la réalisation du laboratoire de physique subnucleaire, que on est en train de creuser sous le Gran Sasso, et qui constituera une chance importante pour l'Italie dans le domaine de la expérimentation scientifique qui nécessite un fort affaiblissement du flux de rayons cosmiques. A cause des hauteurs de recouvrement en jeu, des dimensions et de la forme des cavernes qu'on doit creuser, de la nature du rocher et de la nécessité d'éviter des enduits épais en béton, car il est notoirement une source de rayonnements radioactifs qui sont incompatibles pour les expériences qu'on va exécuter dans le laboratoire, la réalisation du projet représente un ouvrage très important de Genie Civile.

SYNOPSIS

Design and feasibility studies concerning the possibility of boring the underground sub-nuclear physics laboratory of Gran Sasso

This paper is concerned with the feasibility study of the sub-nuclear physics underground laboratory, presently under construction under the Gran Sasso mountain, Italy. This laboratory will privilege Italy in the field of phisic experimentation needing a strong cosmic rays flux sheltering, in order to acheave reliable result. This work will be a great civil engineering acheavement, when comparing the shape and dimensions of the underground openings, the overburden as well as the type of rock to be excavated, with the need of avoiding thick concrete lining. Concrete being radioactive, would cause disturbance to the planned experiments.

1. PREMESSA

Nell'ottobre 1981 il Ministero dei Lavori Pubblici autorizzava l'ANAS (Azienda Nazionale Autonoma delle Strade) a realizzare nella galleria del Gran Sasso, dell'autostrada l'Aquila-Villa Vomano, un manufatto da adibire a sede di un laboratorio di fisica nucleare ideato e promosso dal Prof. Antonino Zichichi cui si devono pure le scelte plano-volumetriche (fig. 1). L'esecuzione delle opere civili veniva affidata all'Impresa generale COGEFAR, che dal 1968 era sul posto per la costruzione del Traforo Autostradale.

L'importante laboratorio in caverna, unico al mondo nel suo genere, è oggi in avanzata fase di realizzazione.

Al termine dei lavori, previsto per il 1987, esso verrà consegnato all'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (I.N.F.N.) e con-

sentirà agli scienziati di portare a termine un programma di ricerca che ha suscitato vivo interesse e grande attesa nel mondo scientifico. Scopo del programma di ricerca è verificare la validità di contrastanti teorie sulla stabilità della materia, e la sua attuazione comporta l'esecuzione di esperimenti in grande scala in un sito il più possibile protetto da flussi di radiazioni cosmiche, la cui presenza inquinerebbe i risultati sperimentali.

La scelta del Gran Sasso come sede del laboratorio è stata dettata da una serie di considerazioni scientifiche, tecniche ed economiche quali:

a) l'entità delle coperture (circa 1400 m) disponibili lungo il traforo autostradale per schermare le caverne, nonché la

(*) In copertina: "Laboratorio B a scavo ultimato".

(**) Dott. Ing. Luciano Leonardi - Direttore Generale e Amm. Deleg. COGEFAR S.p.A.

(***) Dott. Ing. Giovanni Lombardi - Locarno (Svizzera) - Consulente dell'Impresa COGEFAR S.p.A.

(****) Prof. Ing. Pietro Lunardi - Docente di Consolidamento del suolo e delle rocce presso il Dipartimento di Ingegneria Civile dell'Università di Firenze - Consulente dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (I.N.F.N.).

(*****) Dott. Ing. Francesco Marini - Direttore dell'Ufficio Speciale delle Autostrade Romano-Abruzzesi.

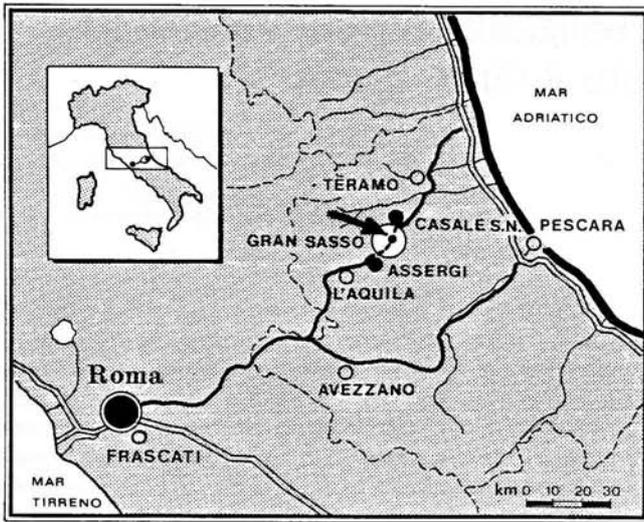


Fig. 1
Corografia della zona. - Chorographie. - Map of the area.

densità e la qualità della formazione rocciosa dominante, giudicate ottimali dagli scienziati, sulla base di una serie di sperimentazioni condotte nella primavera-estate 1981 dall'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare lungo la galleria autostradale sinistra, quale scudo a flussi di radiazioni cosmiche;

- b) la presenza del traforo autostradale del Gran Sasso, in via di ultimazione, quale via di accesso naturale alla zona prescelta per la caverna laboratorio;
- c) la vicinanza con i Laboratori Nazionali di Frascati, che dovrebbero collaborare, con il proprio patrimonio di competenze scientifiche ed amministrative, alla realizzazione degli imponenti apparati sperimentali.

Sotto il profilo progettuale, l'opera d'ingegneria che si sta realizzando è senza dubbio di grande rilievo. Il motivo è duplice:

- a) le forti coperture in gioco in relazione alla resistenza dell'ammasso roccioso ed alle notevoli dimensioni della sezione di scavo;
- b) la necessità di contenere entro spessori molto ridotti le strutture di rivestimento delle caverne, affidando la stabilità delle stesse alla roccia resa autoportante grazie a speciali interventi di consolidamento, evitando quindi di fare ricorso a grandi quantità di cemento, notoriamente fonte di radiazioni dannose agli esperimenti.

All'inizio del 1982 fu presentato un primo progetto che prevedeva la costruzione di una caverna a sezione sub-ellittica di circa 1300 mq per una lunghezza di circa 100 m. Quest'opera principale era corredata da diverse opere sotterranee di contorno: collegamenti con la galleria autostradale, locali per servizi e antincendio, centrale operativa, centrale di ventilazione e centrale elettrica (fig. 2).

In seguito, per ragioni di diversa natura, ma principalmente d'ordine sperimentale, veniva richiesta dall'I.N.F.N. una rielaborazione del progetto, da realizzarsi in fasi successive, e che prevedesse al posto di un'unica grande caverna-laboratorio tre caverne distinte, di forme diverse e dimensioni più contenute (fig. 3).

In considerazione della singolarità dell'opera e delle problematiche che si sono poste in fase di progettazione, si è ritenuto che potesse essere di qualche interesse, per gli addetti ai lavori, conoscere il risultato degli studi di fattibilità condotti sia per verificare le condizioni di stabilità delle caverne, sia per definire la tipologia e l'entità degli interventi di stabilizzazione necessari nell'ambito del progetto iniziale e di quello attualmente in fase di realizzazione.

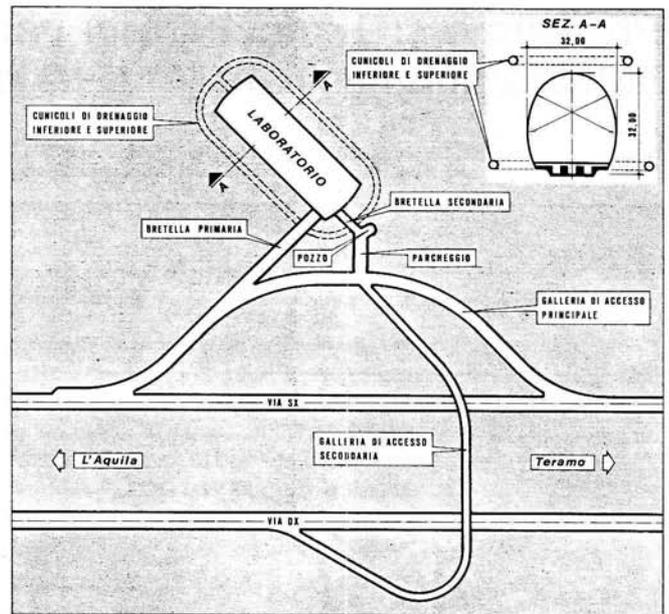


Fig. 2
Schema planimetrico del progetto n. 1
Schème planimétrique du projet n. 1
Plan of scheme no. 1.

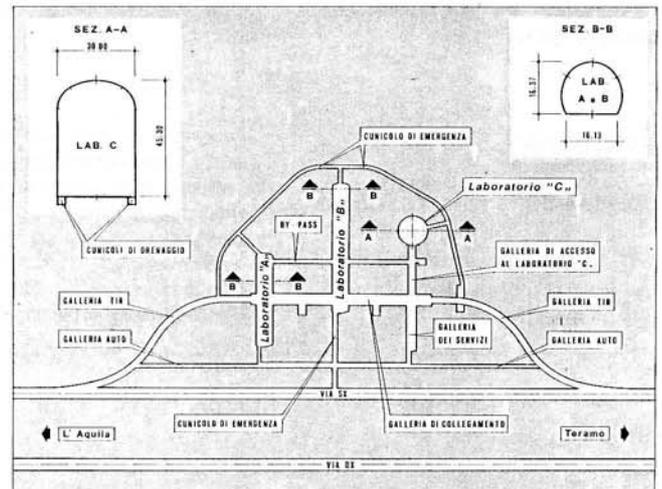


Fig. 3
Schema planimetrico del progetto n. 2.
Schème planimétrique du projet n. 2.
Plan of scheme no. 2.

2. SITUAZIONE GEOLOGICA

L'altopiano calcareo del Lazio e degli Abruzzi, di cui fa parte il massiccio del Gran Sasso, è costituito da una possente serie sedimentaria formatasi dal Trias al Miocene in una zona fortemente subsidente (fig. 4).

La successione litologica comprende, a partire dalla base, dolomie e calcari dolomitici del Giurassico, calcari silicei stratificati o meglio massicci detritici del Cretaceo, calcari marnosi del Miocene ed infine un mantello spesso di flysch arenaceo che si è sedimentato in bacini chiusi più o meno stretti.

Nel suo insieme l'evoluzione di tutta la serie sedimentaria degli Abruzzi è del genere miogeosinclinale con una fase tardiva di sedimentazione di flysch.

A partire dalla fine del Miocene, a causa di una maggiore subsidenza delle regioni adriatiche, si è prodotto, a livello delle

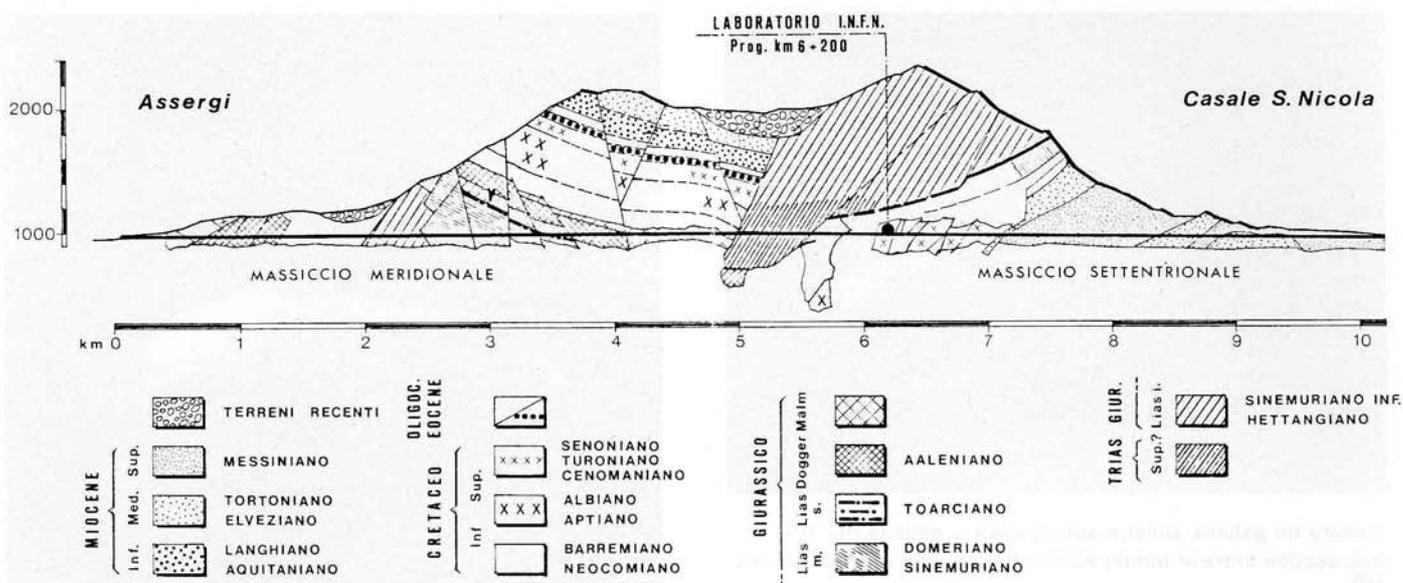


Fig. 4
Profilo geologico longitudinale in asse traforo del Gran Sasso.
Profil géologique sur l'axe longitudinal du tunnel Gran Sasso.
Geological cross section of the Gran Sasso tunnel.

anidriti plastiche del Trias, il distacco della serie calcareo-dolomitica più antica ed il suo ripiegamento, con scivolamento sulla serie marnoso-arenacea più recente, sotto spinte dirette da SO a NE.

Conformemente a questo schema strutturale, si può riconoscere un grosso blocco calcareo-dolomitico monoclinale che è sovrascorso su un blocco calcareo-dolomitico parzialmente rovesciato. Il blocco monoclinale è caratterizzato da una tettonica distensiva; le faglie più importanti che lo distinguono, il cui rigetto oltrepassa talvolta i 1000 m, sono milonizzate in modo evidentissimo e costituiscono dei tramezzi impermeabili che mantengono una piezometrica alta all'interno di ciascun settore.

Il substrato, su cui è sovrascorsa la massa calcareo-dolomitica, è costituito essenzialmente da calcari più duri del Cretaceo, sui quali l'effetto del sovrascorrimento ha dislocato grosse scaglie tettoniche di diversa grandezza, che si sono sovrapposte e si sono penetrate lungo il fascio di faglie e fratture verticali in direzione NS, generalmente acquifere. Il sovrascorrimento ha interessato completamente la massa dei calcari stratificati con una rete di microfrazture chiuse del genere strolitico. Sotto il profilo idrologico, la situazione tettonica e strutturale permette un'intensa ed abbondante circolazione d'acqua nelle formazioni calcareo-dolomitiche, attraverso un sistema di strati comunicanti lungo bande carsificate sub-orizzontali, in opposizione alle quali fa riscontro un'impermeabilità assoluta nelle fessurazioni marnose. Il battente idraulico della falda a quota laboratorio si aggira intorno a 600 m.

2.1 Campagna geognostico-geotecnica

Per poter scegliere con esattezza l'ubicazione definitiva del laboratorio, venne promossa, all'inizio del 1982, una campagna geognostica comprendente, oltre allo studio delle condizioni geologiche riscontrate durante lo scavo delle gallerie, l'esecuzione di sondaggi esplorativi.

Sulla base dei rilievi strutturali delle gallerie fu ipotizzato che la formazione "Scaglia" potesse estendersi in una zona a NW della via Sx per un tratto di circa 200 m, sufficiente per contenere il laboratorio.

La verifica di tale ipotesi fu ottenuta mediante tre sondaggi trasversali alla galleria Sx, che permisero di ispezionare un'a-

rea di circa 200 x 200 m oltre il suo paramento.

Le rocce riscontrate in questa zona risultarono costituite da (fig. 5):

- 1) calcare massiccio a grana media, da fratturato a molto fratturato e successivamente cementato;
- 2) calcare a grana fine in strati sottili, con pieghettature, intercalazioni di selce e fratture finissime riempite da patine argillose;
- 3) calcare a grana fine, stratificato, con intercalazioni di selce;
- 4) calcare dolomitico o dolomie, fratturato o molto fratturato e parzialmente cementato.

Dal punto di vista strutturale, le formazioni presentavano giacitura NS, quindi circa a 45 gradi rispetto all'asse della galleria autostradale, ed immersione verso E con circa 50 ÷ 60 gradi.

Il calcare risultava caratterizzato da una fitta microfratturazione sub-parallela alla stratificazione.

Circa la fratturazione, l'esame delle carote permise di individuare tre zone ben distinte a seconda dell'indice RQD (Rock Quality Designation):

- zona con roccia complessivamente di buona qualità (RQD medio superiore al 50%) fino alla profondità di circa 80 m dal paramento della galleria sinistra;

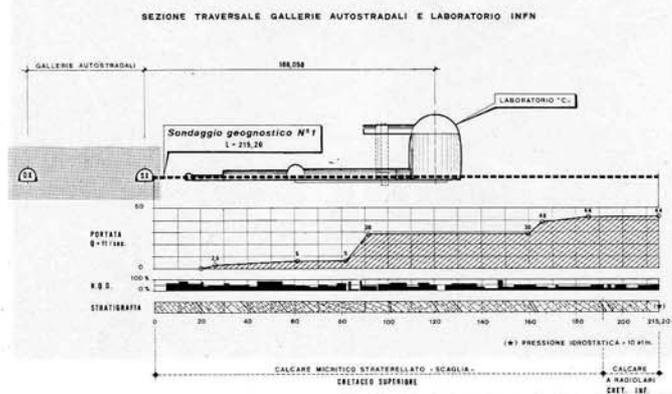
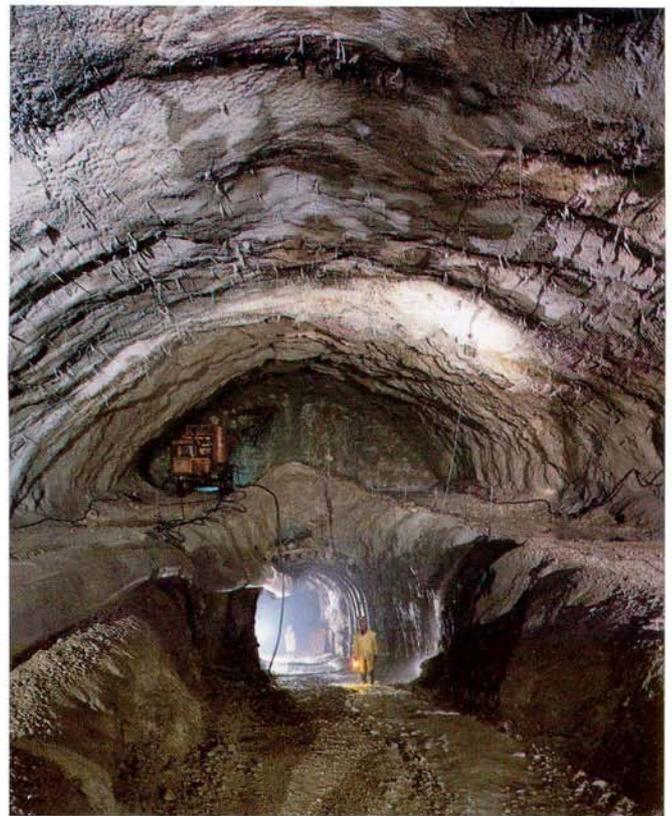


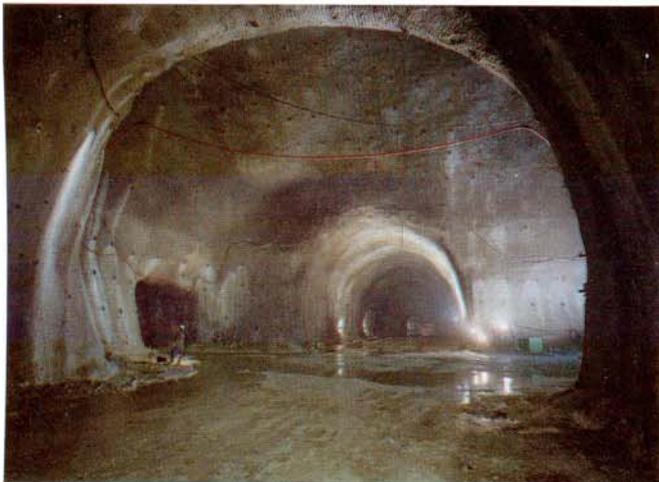
Fig. 5
Sondaggio n. 1 - Sondage n. 1 - Borehole no. 1.



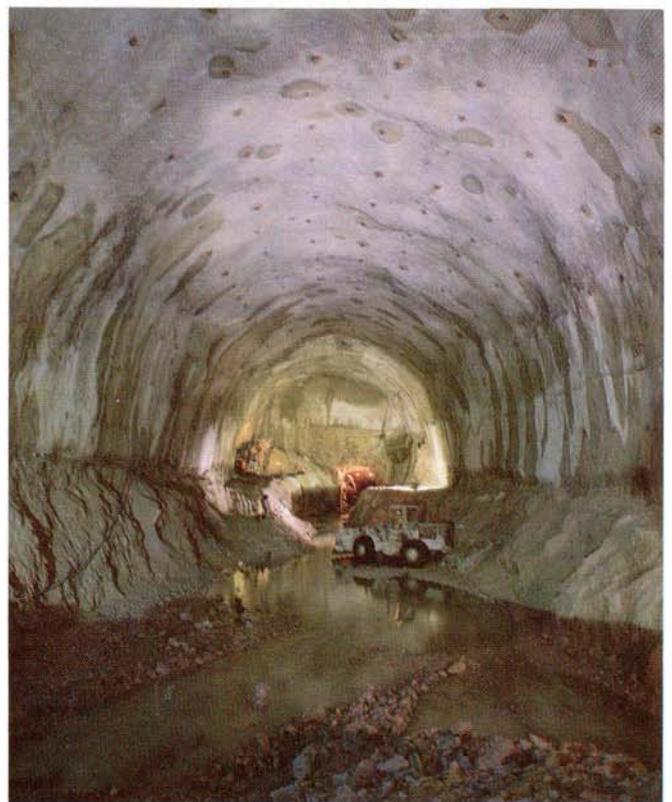
Innesto tra galleria sinistra autostradale e galleria dei TIR.
 Intersection entre le tunnel autoroutier gauche et le tunnel des TIR.
 Junction between the left motor-way's tunnel and the TIR's one.



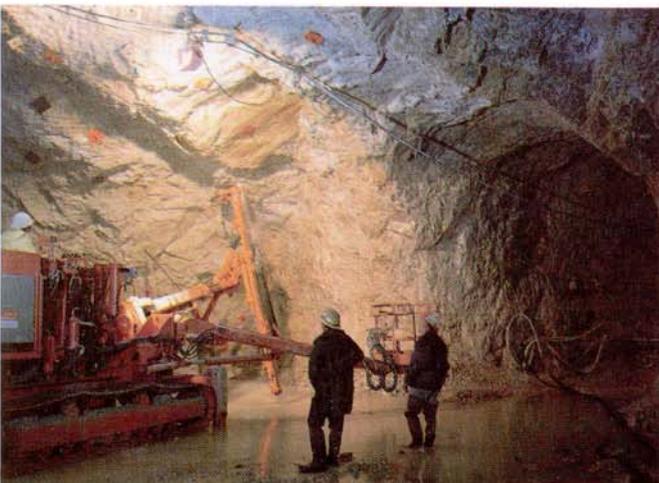
Laboratorio "B" in fase di scavo.
 Laboratoire "B" pendant le percement.
 "B" laboratory during excavation.



Innesto tra laboratorio "B" e la galleria dei TIR.
 Intersection entre le laboratoire "B" et le tunnel des TIR.
 Junction the "B" laboratory and the TIR's tunnel.



Laboratorio "B" in fase di scavo.
 Laboratoire "B" pendant le percement.
 "B" laboratory during excavation.



Momento dello scavo dei calcari.
 Percement du calcaire.
 Boring in limestone formation.

- successivamente fino a circa 150 m, pur essendo la roccia complessivamente di buona qualità, l'indice esprime una variabilità di compattezza in funzione di zone locali molto fratturate ed acquifere (RQD $0 \div 5\%$);
- nella parte finale dei sondaggi il valore RQD tende a decrescere e raggiunge valori medi attorno al 25%.

Durante lo scavo della galleria del Gran Sasso nella zona del laboratorio, il grosso problema da affrontare era stato la quasi costante presenza di acqua in grande quantità con pressioni idrostatiche fino a 60 atmosfere. Durante l'esecuzione dei tre sondaggi esplorativi fu quindi dato gran peso alla misurazione sia delle portate che delle pressioni idrostatiche. Per quanto riguarda il sondaggio n. 1, per esempio, si riscontrò, ad 85 m circa, un progressivo aumento della portata da 5 a 30 litri/s e, a 162 m, un aumento della portata da 30 a 40 litri/s. La pressione idrostatica misurata in fondo al sondaggio forniva valori intorno alle 10 atmosfere.

Poiché le misurazioni effettuate durante l'apertura del traforo avevano segnato nello stesso luogo pressioni di circa 60 atmosfere, ci si fece la convinzione che nel frattempo, in seguito al drenaggio prodotto dallo scavo delle due canne autostradali, si fosse verificato un consistente abbattimento della falda acquifera e che fosse lecito pensare che l'apertura delle nuove cavità avrebbe portato ad ulteriori abbattimenti della falda.

In seguito ai risultati dell'esplorazione geognostica, l'ubicazione definitiva del laboratorio fu decisa a nord della via Sx (progressiva 6150) in una zona di calcari molto compatti e privi di discontinuità tettoniche importanti.

Per effettuare una valutazione attendibile delle proprietà geofisiche e geo-meccaniche della massa rocciosa, si fece riferimento alle condizioni di stabilità riscontrate durante lo scavo della galleria ed, in parte, a prove di laboratorio eseguite su campioni di roccia prelevati appositamente dalle carote dei sondaggi esplorativi.

In particolare, le prove di rottura, eseguite su provini di diversi diametri e di snellezza 2, posero in evidenza il comportamento fragile dei calcari (fig. 6).

L'esperienza insegna che questo tipo di roccia molto rigida a notevole profondità, se sollecitata oltre il proprio limite di resistenza, non riesce a decomprimersi progressivamente con lo scavo, ma arriva alla rottura improvvisamente e bruscamente con manifestazioni di distacco violento di porzioni di roccia

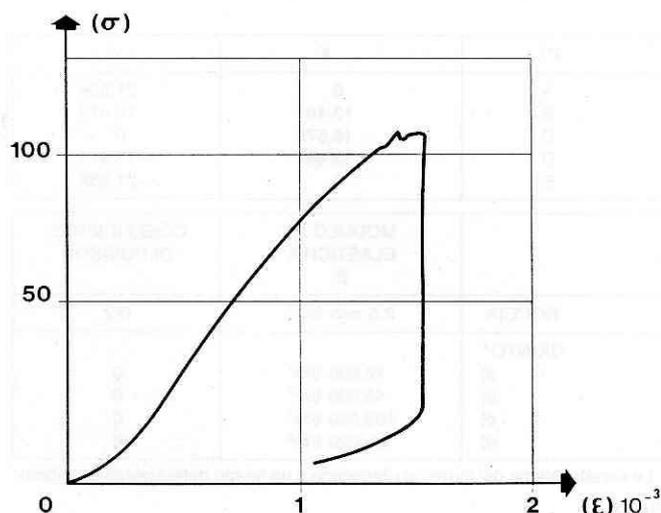


Fig. 6
Prove di compressione semplice eseguita su un campione di calcare.

Essais de compression simple sur échantillon calcaire.

Unconfined compression test on limestone.

accompagnato da forti boati ("colpi di montagna").

Più le dimensioni di una cavità sotterranea sono importanti più il comportamento dell'ammasso roccioso è influenzato dalla situazione geo-strutturale e dalle caratteristiche delle singole discontinuità. Le indagini geo-meccaniche furono, quindi, rivolte allo studio delle diverse famiglie di discontinuità ed alla determinazione delle caratteristiche di resistenza residua al taglio ad esse corrispondenti.

Una valutazione ponderata di tutti i dati disponibili permise, infine, di assumere i seguenti parametri geotecnici:

- peso di volume dell'ammasso roccioso: $\gamma = 2.75 \text{ t/mc}$
- angolo d'attrito di picco: $\varphi p = 40 \text{ gradi}$
- angolo d'attrito residuo: $\varphi r = 36 \text{ gradi}$
- coesione di picco: $c p = 500 \text{ t/mq}$
- coesione residua: $c r = 50 \text{ t/mq}$
- modulo elastico di picco: $E p = 2500000 \text{ t/mq}$
- modulo elastico residuo: $E r = 1250000 \text{ t/mq}$
- dilatanza in zona di rottura: $\Phi = 0.2\%$

3. PROGETTO N. 1

La disposizione generale delle opere previste dal progetto iniziale è riportata in fig. 2. La caverna principale risultava accessibile da entrambe le vie autostradali grazie alla presenza:

- di una galleria di collegamento di sezione 45 mq circa, praticabile dai TIR, con entrata ed uscita sulla via Sx;
- di una galleria d'accesso dalla via Dx, di sezione inferiore, che avrebbe scavalcato entrambe le canne autostradali.

Una particolarità interessante del progetto preliminare è rappresentata dal fatto che la grossa caverna era circondata a due livelli distinti da cunicoli di drenaggio.

Considerando:

- la situazione idraulica incontrata con la galleria autostradale;
- la delicatezza delle apparecchiature previste per il laboratorio;
- l'esigenza di evitare qualsiasi pressione idrostatica sulle strutture del rivestimento;

pareva necessario, infatti, poter contare su un sistema di drenaggio efficace, che garantisse nel tempo una difesa sicura contro l'instaurarsi di nuovi campi di pressione pericolosi per la statica della caverna a lungo termine.

Oltre alla funzione drenante, i cunicoli avrebbero rappresentato un eccellente sondaggio geognostico, che avrebbe permesso di riconoscere eventuali fraglie e di eseguire i lavori di consolidamento prima di procedere allo scavo del laboratorio: avrebbero permesso, inoltre, di realizzare quei giunti di decompressione che avrebbero costituito l'elemento caratterizzante del progetto iniziale (fig. 7).

3.1 Considerazioni preliminari sulle condizioni di stabilità della caverna principale

Inizialmente lo studio sulle condizioni di stabilità della caverna condotto per il dimensionamento dell'opera portava ad una soluzione oramai classica nel campo della costruzione di grandi scavi sotterranei: procedimento di scavo per campioni con immediata stabilizzazione della roccia mediante spritz-beton ed ancoraggi passivi. Ben presto, però, ci si rese conto che, con una soluzione di questo tipo, malgrado l'impiego massiccio di importanti mezzi di stabilizzazione, non era possibile limitare le convergenze e l'estensione della zona di rottura attorno alla cavità a livelli accettabili.

Infatti dai primi calcoli risultava una convergenza radiale dell'ordine di 40 cm ed un'estensione della zona di rottura, oltre il profilo di scavo, mediamente di 30 m, valori che sono da

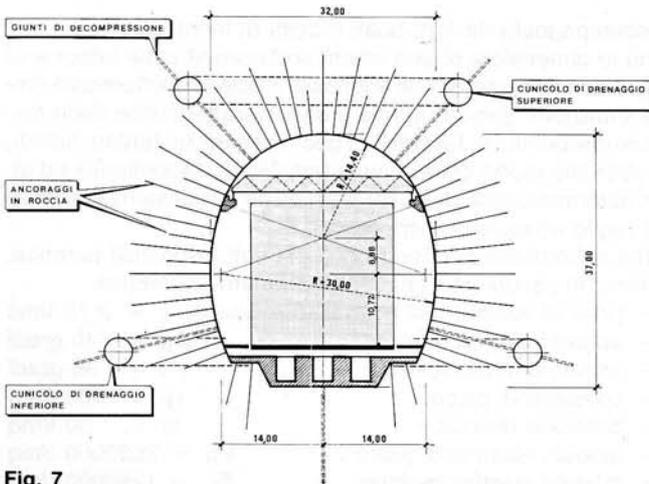


Fig. 7
Sezione trasversale della caverna-laboratorio (progetto n. 1).
Coupe transversale de la caverne laboratoire (projet n. 1).
Laboratory-cavern cross section (scheme no. 1).

ritenersi inaccettabili considerando il carattere rigido-fragile della roccia.

La soluzione non poteva offrire garanzie nei riguardi del rischio di rotture inaspettate ed istantanee della roccia, fenomeno che già nella galleria autostradale aveva rappresentato un pericolo latente.

D'altra parte, la presenza di una potente fascia di plasticizzazione al contorno della cavità avrebbe richiesto l'adozione di un massiccio rivestimento in calcestruzzo armato a garanzia della stabilità dell'opera finita. Dovendo limitare, per ragioni sperimentali, il più possibile l'impiego di cemento per il rivestimento, venne scartata questa prima ipotesi di lavoro e ci si orientò verso una seconda.

3.2 Decompressione controllata della roccia attorno alla cavità mediante tagli

Nella zona della futura caverna-laboratorio, la roccia risulta, allo stato originario, sollecitata da un campo di pressione dell'ordine di 4000 t/mq.

Eseguito lo scavo di una cavità, si produce, con la decompressione dell'ammasso, una diminuzione di tensione in senso radiale ed un corrispondente aumento della stessa in senso tangenziale. Questa redistribuzione delle sollecitazioni può, considerate le caratteristiche geomeccaniche della roccia in zona laboratorio, proseguire solo fin quando la pressione radiale raggiunge il limite inferiore di circa 1000 t/mq; al di sotto di questo valore la massa rocciosa subisce conseguenze, in termini di resistenza e deformazione, irreversibili.

Infatti, se la pressione radiale continua a decrescere, si verificano delle rotture e le pressioni tangenziali diminuiscono bruscamente in seguito al decadimento di resistenza dell'ammasso roccioso dal valore di picco a quello residuo. Parallelamente avviene un aumento più che proporzionale delle convergenze. Il concetto di decompressione controllata della roccia si basa sull'idea di limitare al massimo possibile il fenomeno di rottura attorno alla cavità. Praticando artificialmente dei tagli radiali (detti giunti di decompressione), si conferisce ad un anello roccioso attorno al cavo una deformabilità tangenziale sufficiente per potersi deformare senza rottura. I giunti di decompressione formano, infatti, dei "conci" di roccia sottratti a tensioni eccessive, e che pertanto vengono mantenuti in condizioni di elasticità.

Il perimetro della cavità dovrebbe comunque essere assicurato con spritz-beton ed ancoraggi, per impedire eventuali distacchi di tipo gravitativo di porzioni di roccia.

Il vantaggio consiste principalmente nel fatto di poter usufrui-

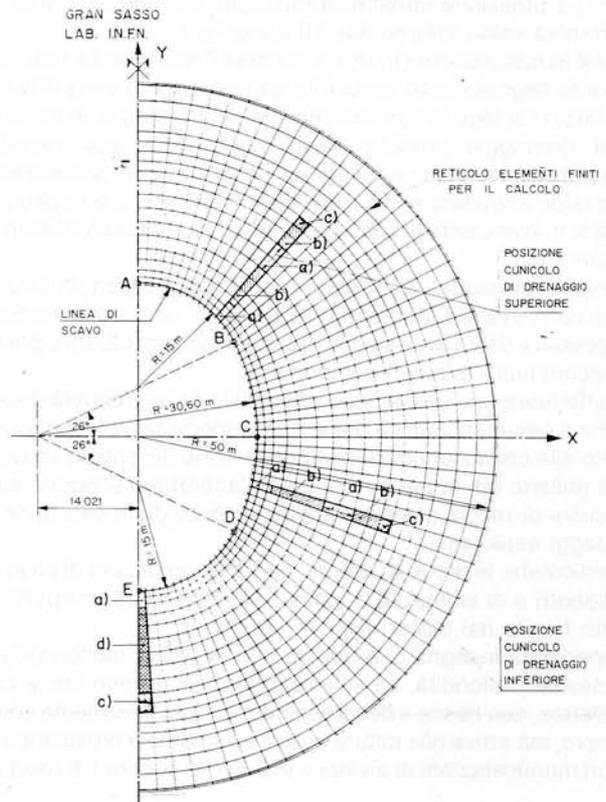
re della resistenza di picco della roccia.

Per verificare il meccanismo e procedere al dimensionamento dei tagli o giunti di decompressione, sono stati effettuati diversi calcoli di cui esporremo brevemente i risultati più significativi nel paragrafo seguente.

3.3 Stato di sollecitazione e di deformazione nella roccia attorno alla cavità in presenza di giunti di decompressione

Per valutare l'effetto dei giunti di decompressione sullo stato di sollecitazione e di deformazione, si è fatto ricorso al metodo degli elementi finiti. Come già accennato, lo scopo era definire il comportamento dei giunti di decompressione e procedere al loro dimensionamento.

Come illustra la figura 8, si è considerato un modello di cal-



PT	X	Y
A	0	21.838
B	13.481	13.413
C	16.579	0
D	13.481	-13.413
E	0	-21.838

	MODULO DI ELASTICITÀ E	COEFFICIENTE DI POISSON
ROCCIA	2,5 mio t/m ²	0,2
GIUNTO*		
a)	10.000 t/m ²	0
b)	40.000 t/m ²	0
c)	100.000 t/m ²	0
d)	25.000 t/m ²	0

* Le caratteristiche del giunto si riferiscono a un giunto dello spessore unitario.

Fig. 8
Reticolo di elementi finiti adoperato per il dimensionamento dei giunti di decompressione.

Mesh aux éléments finis utilisée pour le dimensionnement des joints de décompression.

Finite element mesh used for stress-release joints design.

colo bidimensionale che simula la roccia attorno alla cavità per una fascia di spessore medio 30 m. Per ovvie ragioni di simmetria rispetto all'asse verticale, il modello di elementi finiti approntato ha potuto essere limitato a metà sezione della cavità. La figura illustra la posizione dei giunti di decompressione ubicati in corrispondenza dei cunicoli di drenaggio e sotto la platea della cavità.

In figura sono riportate, inoltre, le caratteristiche di deformabilità assunte, rispettivamente, per la roccia massiccia e lungo giunto. Il bordo interno del modello di calcolo corrisponde, per quanto riguarda la calotta ed i piedritti, alla linea di scavo, mentre in platea si può interpretare la linea scelta quale delimitazione della zona staticamente attiva. Infatti possiamo considerare la massa rocciosa rimanente in platea come massa che non fornisce nessun contributo statico, ma agente quale peso morto. Il bordo esterno del modello di calcolo è stato scelto liberamente lungo una circonferenza di raggio di 50 m. Ovviamente questo raggio deve comunque essere scelto in modo tale da porre il bordo esterno del modello di calcolo sufficientemente lontano da punti di concentrazione delle sollecitazioni, come, per esempio, l'estremità dei giunti, allo scopo di non condizionare sensibilmente la ridistribuzione degli sforzi.

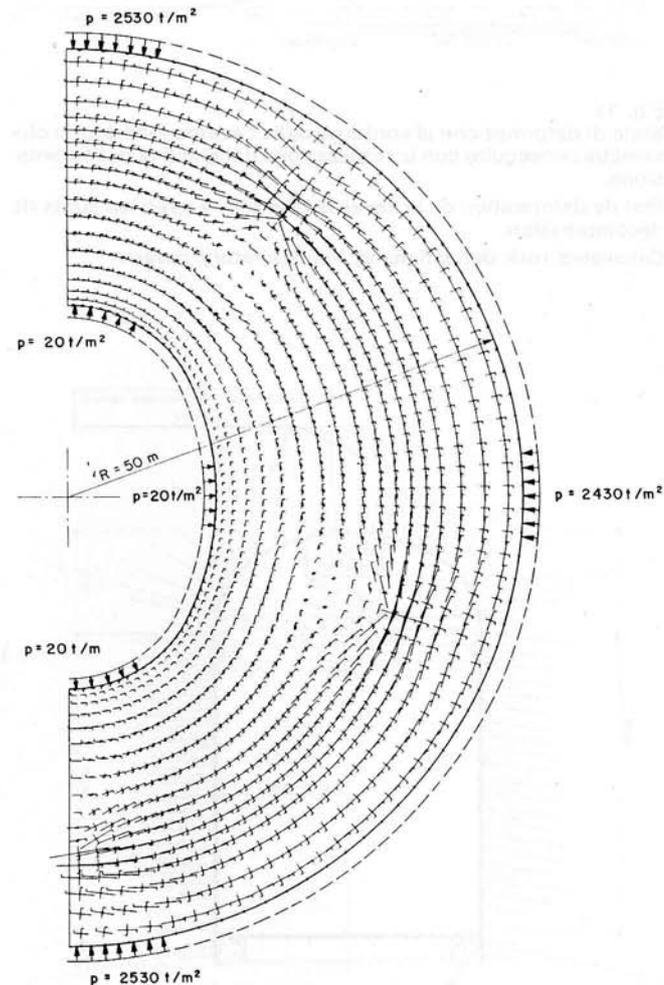


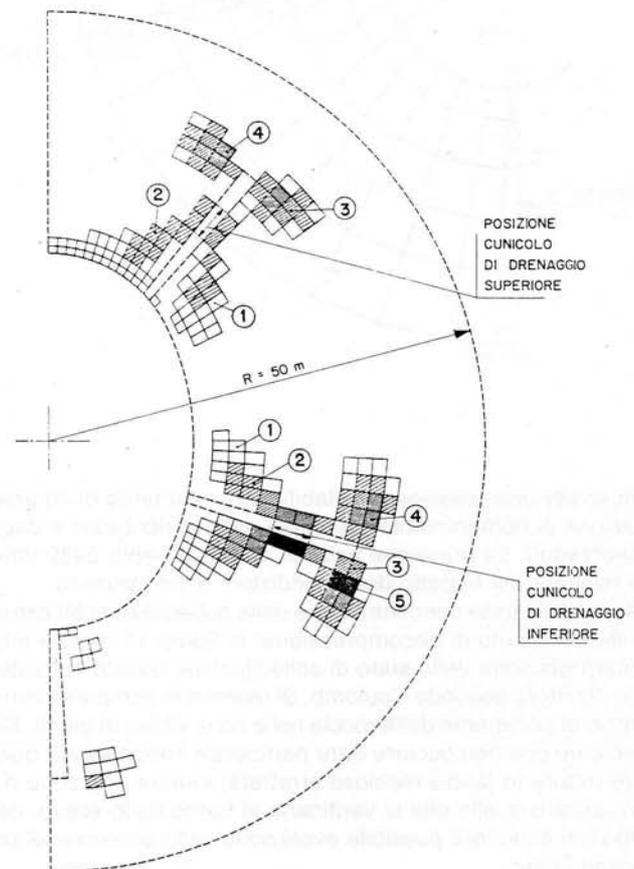
Fig. 9
Stato tensionale al contorno della caverna-laboratorio che sarebbe conseguito con la realizzazione dei giunti di decompressione.
Contraintes autour de la caverne-laboratoire avec les joints de décompression.
Calculated stress field at the laboratory-cavern boundary induced by stress-release joints.

Il calcolo è consistito nella determinazione della pressione che occorre applicare lungo il bordo esterno del modello per ottenere deformazioni dello stesso compatibili con lo stato di deformazione della roccia che lo circonda. Considerando la linea del bordo esterno del modello come una delimitazione fisica, possiamo parlare di una cavità circolare praticata nella roccia ($r = 50$ m) e di un anello di rivestimento di gran spessore applicato prima del verificarsi di qualsiasi deformazione. La condizione di compatibilità impone quindi che cavità e anello si deformino in modo identico per la stessa pressione di contatto.

Trovata una soluzione congruente, si è controllato che lo stato di sollecitazione, entro l'anello roccioso considerato, fosse di tipo elastico. In caso contrario si sarebbero dovute modificare le caratteristiche dei giunti fino a trovare una soluzione accettabile.

I risultati relativi alla proposta finale sono presentati nelle figure 10, 11, e 12.

La figura 10 illustra lo stato di sollecitazione nell'anello roc-



IPOTESI

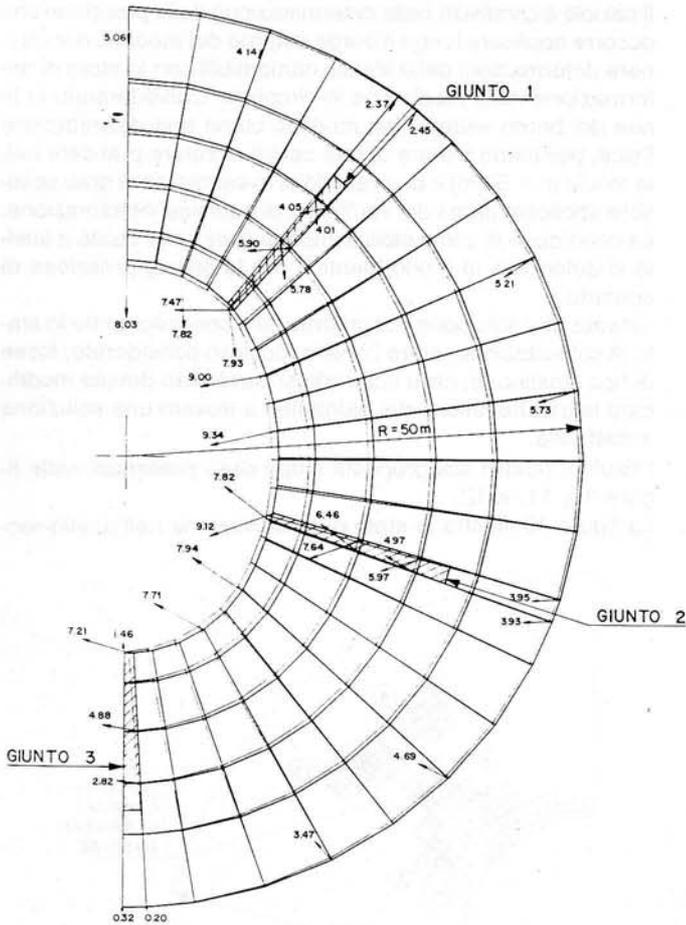
- Criterio di rottura secondo Coulomb
- Angolo di attrito $\varphi = 40^\circ$

Coesione minima al taglio necessaria per evitare la rottura a scorrimento della roccia.

- 1) $200 \div 400 \text{ t/m}^2$
- 2) $400 \div 600 \text{ t/m}^2$
- 3) $600 \div 800 \text{ t/m}^2$
- 4) $800 \div 1000 \text{ t/m}^2$
- 5) $> 1000 \text{ t/m}^2$

Fig. 10
Evidenziazione delle zone di rottura in prossimità dei giunti di decompressione.

Endroit de la cassure près des joints de décompression.
Failure zones near stress-release joints.



DEFORMAZIONE RADIALE MEDIA LUNGO LA CIRCONFERENZA (R = 50 m) $\delta_r^m = 3,766$ cm

SCHIACCIAMENTO DEI GIUNTI

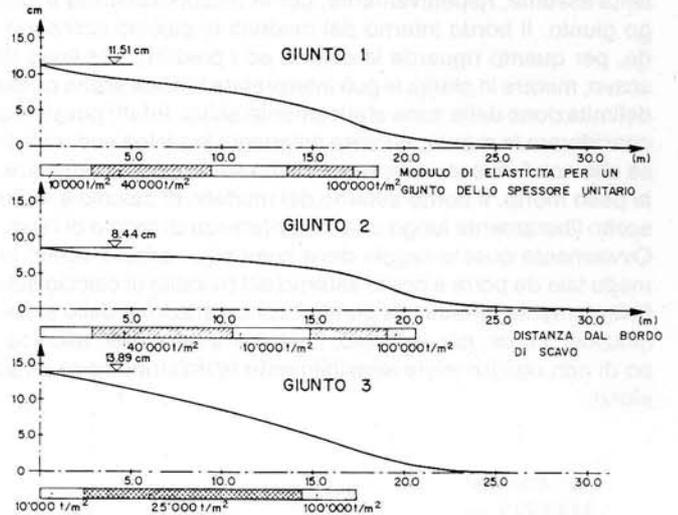


Fig. 11 Stato di deformazione al contorno della caverna-laboratorio che sarebbe conseguito con la realizzazione dei giunti di decompressione.

Etat de déformation de la caverne laboratoire avec les joints de décompression.

Calculated rock deflections at the laboratory cavern.

cioso per una pressione di stabilizzazione interna di 20 t/mq (azione di contenimento esercitata dallo spritz-beton e dagli ancoraggi). La pressione esterna di mediamente 2480 t/mq è risultata dal rispetto delle condizioni di congruenza.

Notiamo la forte concentrazione delle sollecitazioni all'estremità del giunto di decompressione: la figura 11 mostra una interpretazione dello stato di sollecitazione basato sul criterio di rottura secondo Coulomb. Si osserva la comparsa di un inizio di cedimento della roccia nelle zone vicine ai giunti. Riteniamo che non occorre dare particolare importanza a queste rotture in fasce rocciose arretrate, mentre non sono da trascurare quelle che si verificano al bordo dello scavo, nei riguardi della loro possibile evoluzione nella direzione di un bordo libero.

La figura 12 illustra lo stato di deformazione e dà l'entità degli spostamenti lungo i giunti. Notiamo che la convergenza media lungo il bordo di scavo sarebbe risultata di circa 7 cm, mentre i giunti, schiacciandosi, avrebbero assorbito un volume complessivo di circa 7.5 mc per ogni m di caverna. Eventualmente si sarebbe dovuta accettare, in calotta, la presenza di una piccola zona di rottura, che, opportunamente stabilizzata con ancoraggi e spritz-beton, non avrebbe creato nel tempo ulteriori problemi.

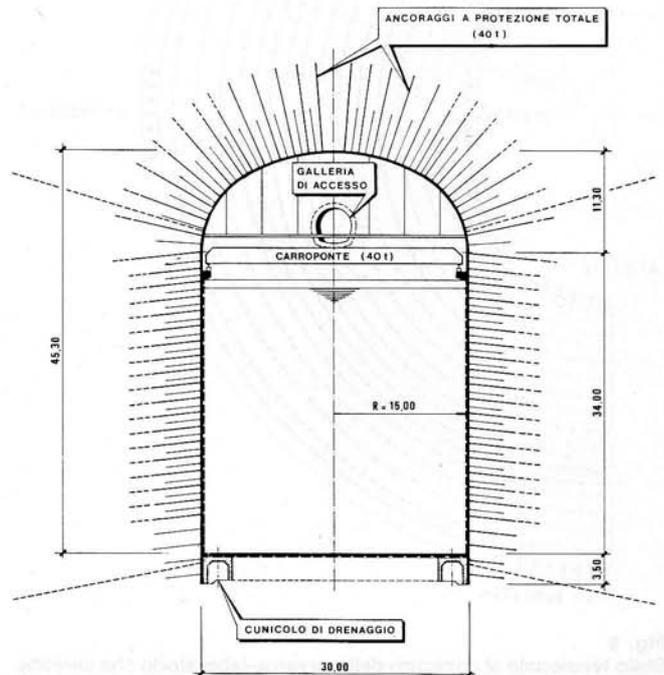


Fig. 12 Sezione trasversale del laboratorio "C" (progetto n. 2).

Coupe transversale du laboratoire "C" (projet n. 2).

"C" laboratory cross section (scheme no. 1).

3.4 Considerazioni relative al progetto n. 1

In considerazione delle importanti dimensioni della caverna-laboratorio, dello spessore notevole della copertura rocciosa, e soprattutto del comportamento fragile della roccia, si ritiene opportuno studiare una tecnica di stabilizzazione che permettesse di contenere i movimenti di convergenza del cavo ad un livello di sicurezza per la stabilità a breve e a lungo termine.

L'intervento proposto si basava sull'idea di limitare al massimo possibile il fenomeno di rottura della roccia attorno alla cavità praticando artificialmente, prima dello scavo, dei giunti di decompressione in senso radiale. L'anello roccioso attorno alla cavità avrebbe potuto, così, chiudersi senza provocare aumenti troppo elevati delle sollecitazioni tangenziali. Rimanendo la roccia in campo elastico, si poteva, in tal modo, usufruire della sua resistenza di picco.

All'atto pratico la soluzione si sarebbe dovuta attuare nel modo seguente:

- 1) costruzione, a due differenti livelli, attorno alla futura cavità a circa 10 m dai paramenti, di cunicoli a sviluppo anulare, di sezione circa 9 mq: il primo livello in corrispondenza al piano di lavoro del laboratorio, il secondo circa 35 m più in alto. I cunicoli, oltre a fungere da camere di lavoro per l'esecuzione dei giunti di decompressione, avrebbero avuto, come già accennato, anche l'importante funzione di camere di drenaggio. Infatti una serie di fori drenanti lanciati a partire dagli stessi cunicoli, ed opportunamente orientati, avrebbero garantito una importante schermatura contro la pressione idrostatica, per l'ammasso roccioso, già prima dell'apertura della caverna;
- 2) esecuzione dei giunti di decompressione, a partire da ciascun cunicolo, realizzati con una raggiera di fori paralleli sia in direzione della futura cavità che verso l'esterno, in direzione opposta. In linea di massima i fori avrebbero potuto avere diametro 30 cm ed interasse circa $40 \div 50$ cm.
- 3) esecuzione dello scavo per campioni con stabilizzazione della roccia mediante spritz-beton armato (spessore circa 25 cm) ed ancoraggi di tipo passivo iniettati con malta cementizia (fig. 8). Appena lo scavo avesse messo a nudo un giunto di decompressione, si sarebbero dovuti praticare dall'interno della caverna nella zona tra due fori di diametro 30 cm due fori supplementari del diametro di circa 15 cm e di lunghezza circa 3 m onde aumentare localmente la compressibilità del giunto. Il giunto in platea si sarebbe realizzato analogamente a quelli praticati a partire dai cunicoli, mediante una serie di fori paralleli perforati a partire da fondo scavo.

Circa la zona dei timpani della caverna-laboratorio, la tecnica di stabilizzazione prevista era simile a quella utilizzata lungo la caverna stessa. Grazie all'effetto tridimensionale, le deformazioni da assorbire mediante giunti di decompressione sarebbero state, però, minori. Sarebbe stato opportuno conferire al timpano una certa curvatura nei due sensi a mo' di cupola. Le misure di stabilizzazione del timpano sarebbero state dello stesso tipo di quelle adottate per i paramenti della cavità.

Ad ultimazione dello scavo ed a stabilizzazione avvenuta, per aumentare la sicurezza dell'opera eseguita, tutti i fori costituenti i giunti avrebbero dovuto essere riempiti con malta cementizia.

4. PROGETTO N. 2

La disposizione planimetrica delle opere previste nel progetto rielaborato viene riportata in fig. 3.

Nell'illustrazione del progetto si riferirà in particolare, considerate la singolarità dell'opera per forma e dimensioni, sugli studi di stabilità condotti per verificare la fattibilità del laboratorio "C". Si illustreranno le considerazioni e i calcoli geomeccanici che hanno permesso una valutazione del comportamento della cavità durante e dopo la fase di costruzione, e che saranno la base per il dimensionamento delle opere di stabilizzazione.

Oltre a questa opera principale (laboratorio "C"), il progetto prevede due grosse caverne di circa 300 mq di sezione trasversale, lunghe circa 100 m cadauna (laboratori "A" e "B"), e diverse altre opere sotterranee minori con funzioni specifiche di collegamento e di servizio.

4.1 Caratteristiche plano-volumetriche

Come i laboratori "A" e "B", anche il laboratorio "C" sarà destinato alla ricerca fisica di base. La sua forma è cilindrica (\varnothing 30 m per un'altezza di circa 30 m) con la volta a cupola: risulta, in definitiva, una cavità larga 30 m ed alta circa 45 m. Il laboratorio è accessibile in basso attraverso una galleria principale di circa 45 mq di sezione, mentre la parte alta è collegata, attraverso un cunicolo, con un pozzo situato all'esterno del laboratorio.

Come illustrato dalla figura 12, il laboratorio "C" dovrebbe ospitare le seguenti strutture interne fisse:

- una via di corsa circolare, a livello dell'imposta della calotta, che servirebbe d'appoggio ad un carro ponte girevole (portata complessiva 40 t);
- un grigliato sospeso, realizzato a distanza di 1.5 m al di sopra del carro ponte, dimensionato in modo da poter portare tutte le apparecchiature necessarie al controllo dell'esperimento ed alla raccolta e trasmissione dei dati; questo sarebbe accessibile attraverso una apposita galleria di collegamento.

Per garantire un efficace drenaggio dell'ammasso roccioso attorno al laboratorio, è prevista la realizzazione di due raggere di fori di drenaggio, una a livello del grigliato sospeso, l'altra a quota platea. In particolare, il drenaggio basso sarebbe eseguito a partire da un cunicolo circolare situato al di sotto del laboratorio. Questo cunicolo, che verrebbe costruito in modo tale da poter permettere anche in futuro il potenziamento del sistema drenante se ciò si rendesse necessario, consentirà, tra l'altro, di sistemare in maniera razionale le diverse tubazioni necessarie per alimentare il volume interno e per raccogliere le acque di scarico e di drenaggio.

4.2 Criteri di stabilizzazione e di scavo

Quando si apre una cavità in un ammasso roccioso se ne altera inevitabilmente lo stato di sollecitazione naturale che risulta dalla sovrapposizione del campo gravitazionale con i campi tensionali dovuti alle spinte tettoniche residue ed agli altri stati coattivi esistenti al suo interno. In particolare, la presenza di una cavità entro un ammasso roccioso comporta una modificazione del campo tensionale preesistente, e quindi la deviazione del flusso di tensioni circostanti; ne consegue un aumento delle sollecitazioni al contorno dello scavo. Quando queste superano la capacità di resistenza della roccia, que-

sta entra in crisi ed il fenomeno della rottura si propaga all'interno dell'ammasso roccioso finché, ad una certa distanza dal cavo, non si ristabilisce uno stato tensionale compatibile con la resistenza della roccia stessa.

Nel caso del tipo di roccia entro cui sarebbe realizzato il laboratorio, come abbiamo già avuto modo di accennare, la decoesione dell'ammasso potrebbe avvenire in maniera brusca ed inaspettata, con grave pericolo per la sicurezza delle operazioni di scavo. Si sono quindi progettati degli interventi di stabilizzazione che, oltre a garantire la tenuta del cavo nel breve e nel lungo termine, aumentassero apprezzabilmente la coesione media d'insieme dell'ammasso roccioso in una fascia prossima alle pareti di scavo, e riducessero quindi al minimo il pericolo del detensionamento naturale e dei "colpi di montagna".

In particolare si è pensato di realizzare al contorno della cavità cilindrica una fascia di roccia armata mediante la messa in opera sistematica di ancoraggi passivi a protezione totale, che cucendo le superfici di discontinuità potenziali più o meno latenti nell'ammasso roccioso ne aumentano considerevolmente la resistenza al taglio.

La loro azione sarebbe coadiuvata dall'applicazione, sulle pareti di scavo, di un manto di spritz-beton, armato con tripla rete elettrosaldata, capace di esercitare una certa pressione di contenimento al contorno della cavità. Si realizza in tal modo uno stato tensionale triassiale, in corrispondenza alle pareti di scavo, che si traduce in un ulteriore aumento di resistenza al taglio della roccia.

Dalla combinazione dei due interventi si ottiene quindi una fascia di roccia consolidata al contorno del cavo di qualità meccaniche nettamente superiori a quelle della roccia naturale, in grado quindi di fornire un contributo importante alla stabilizzazione degli scavi.

Il rivestimento definitivo in c.a., a questo punto, avrebbe solo il compito di aumentare il coefficiente di sicurezza dell'opera, e potrà essere contenuto in spessori molto ridotti. In fig. 13 sono illustrate le possibili fasi di lavoro per la realizzazione della caverna del laboratorio "C".

Durante la stesura del programma scavi 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.

Un possibile modo di procedere potrebbe essere il seguente:

- esecuzione della caverna d'accesso alla zona bassa del laboratorio;
- scavo, dal basso verso l'alto, di due pozzi provvisori per portarsi a livello calotta. Il primo pozzo, chiamato d'accesso, potrebbe essere costruito sull'asse del futuro pozzo per scale e montacarichi, e darebbe la possibilità d'iniziare lo scavo a campioni procedendo dall'alto verso il basso: il secondo pozzo, collegato con il primo attraverso un cunicolo in alto, servirebbe allo smarino;
- esecuzione della fase di scavo 1 (vedi fig. 13), durante la quale il cunicolo di collegamento in alto sarebbe allargato per campioni fino a raggiungere tutta la zona di scavo 1. Questo lavoro dovrebbe essere realizzato a tappe. Contemporaneamente verrebbero messe in opera le misure di sicurezza previste in questa fase e costituite dalla messa in opera degli ancoraggi e di un eventuale primo strato di spritz-beton.

La messa in opera delle misure di sicurezza definitive sarebbe iniziata al termine di questa fase di scavo;

- esecuzione della fase di scavo 2 e completamento della messa in opera delle misure di sicurezza definitive;
- esecuzione della fase di scavo 3, similmente a quelle pre-

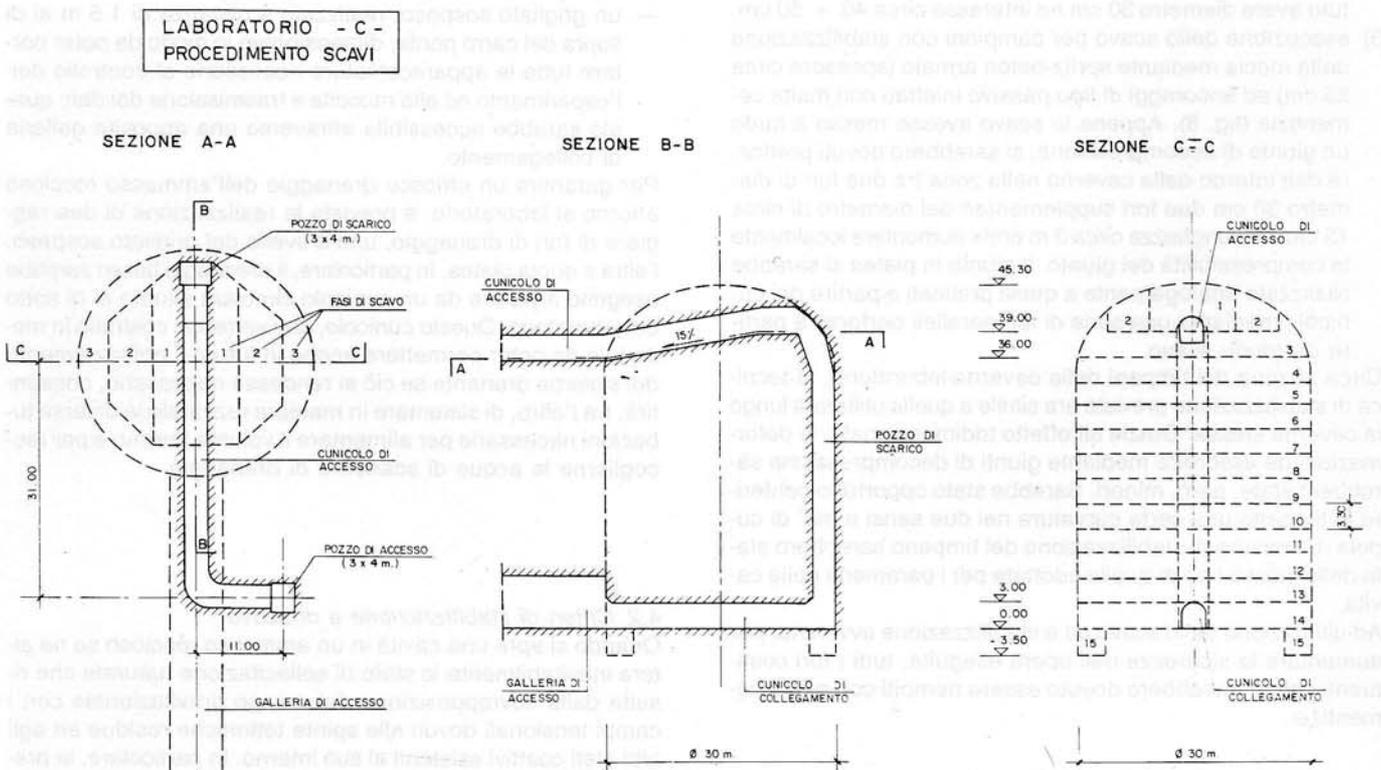


Fig. 13
Procedimento scavi laboratorio "C".
Procédé des excavations du laboratoire "C".
"C" laboratory excavation scheme.

1 - 15 FASI DI SCAVO

cedenti, e contemporanea messa in opera delle misure di sicurezza definitive lungo il bordo di scavo di tutta la calotta.

- una volta completata la calotta, si potrebbe procedere allo scavo a tappe della parte cilindrica della cavità (esecuzione fasi di scavo 4 ÷ 15). In corrispondenza ad ogni fase di scavo sarebbero messe in opera le misure di sicurezza rispettivamente necessarie. Occorrerebbe, infine, eseguire la raggiera inferiore di fori di drenaggio e quindi gettare il rivestimento in calcestruzzo armato.

4.3 Calcoli di stabilità

Il metodo di calcolo utilizzato per analizzare il comportamento di deformabilità della cavità è il cosiddetto "metodo delle linee caratteristiche".

4.3.1 Comportamento di stabilità della calotta della caverna

Nel calcolo rappresentato in fig. 14, si è assimilato il comportamento della calotta a quello di una cavità sferica del diametro di circa 40 m. Ciò può essere ritenuto ammissibile considerato che la caverna è quasi sferiforme.

Nella parte sinistra della figura sono riportate le linee caratte-

ristiche relative al comportamento di deformabilità della cavità sferica.

Dal calcolo è risultato che la stabilità globale del profilo della cavità è garantita. Infatti, senza alcuna pressione di stabilizzazione, risulta una convergenza radiale di 12.5 cm o di 15.9 cm a seconda del valore ammesso per la dilatanza. Considerando il comportamento rigido-fragile della roccia, non è però possibile in realtà lasciare il profilo scavato senza alcun rivestimento. Ciò per:

- evitare l'insorgere d'instabilità locali di tipo gravitativo (cunei di roccia isolati dall'intreccio delle superfici di discontinuità);
- impedire o limitare gli effetti dei cosiddetti "colpi di montagna";
- ragioni di sicurezza per gli operatori;

In considerazione delle dimensioni della cavità e tenendo conto delle esperienze già maturate nella zona, si è ritenuta adeguata l'assunzione di una pressione di stabilizzazione pari a circa 25 t/mq.

4.3.2 Comportamento di stabilità della cavità nel senso laterale

Per valutare il comportamento della cavità nel senso laterale, è stato eseguito un calcolo bidimensionale di una sezione orizzontale, situata circa a metà altezza del laboratorio "C".

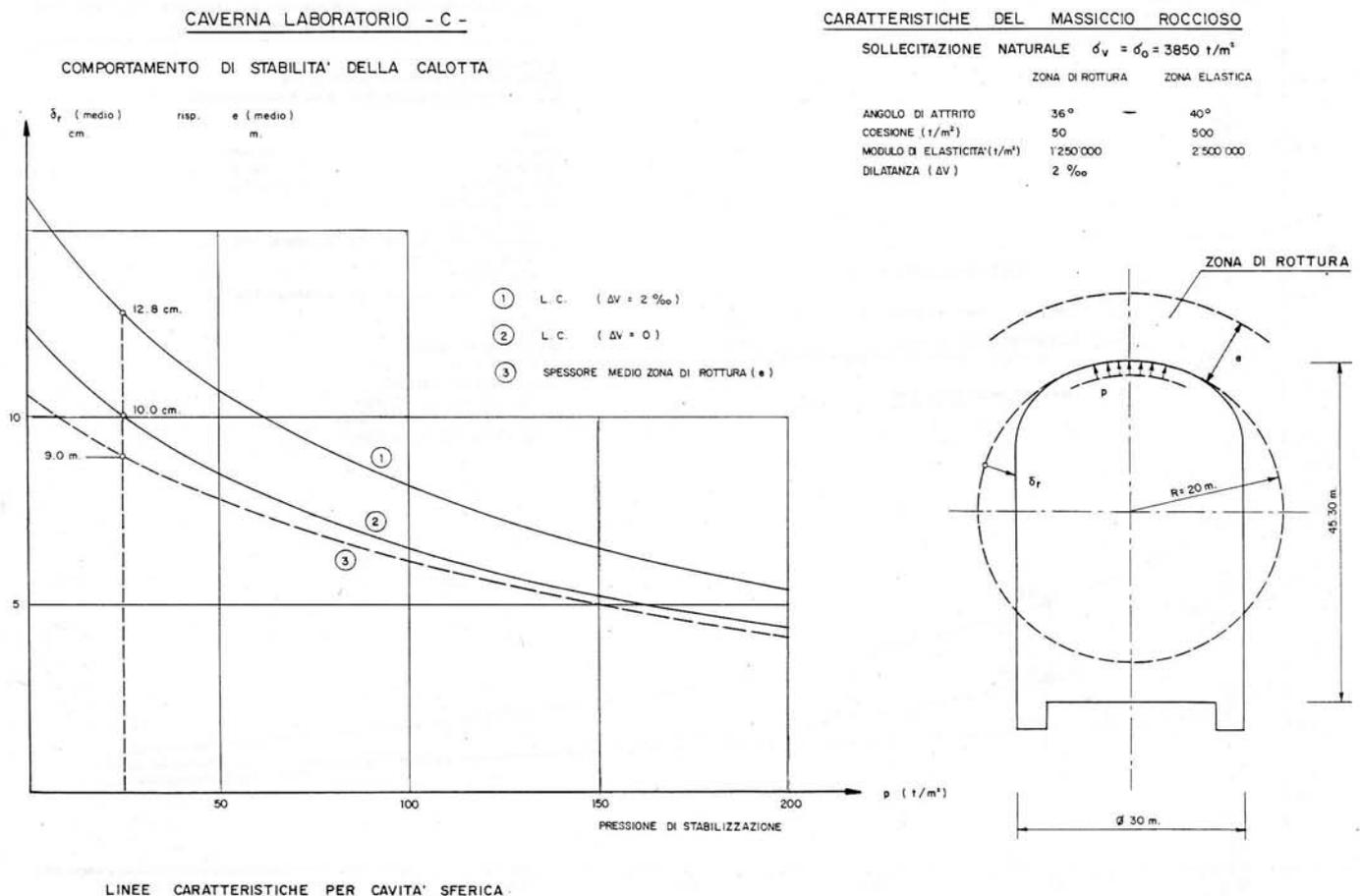


Fig. 14
Linee caratteristiche per la valutazione della stabilità della calotta del laboratorio "C".
Courbe caractéristique pour l'évaluation de la stabilité de la voûte du laboratoire "C".
Characteristic lines used for "C" laboratory roof stability calculations.

Ovviamente il comportamento reale non sarà esattamente un comportamento bidimensionale, ma sarà caratterizzato dal passaggio da un caso bidimensionale (vicino alla cavità) ad un caso tridimensionale (lontano dalla cavità). Per tener conto di questo fatto si è proposto un calcolo bidimensionale nel quale lo stato di sollecitazione naturale è preso in considerazione in misura del 70% di quello effettivo.

I risultati del calcolo, riportati in fig. 15, mostrano che per la pressione di stabilizzazione scelta ($p = 25 \text{ t/mq}$) si ha:

- una convergenza radiale pari a 10.7 cm, rispettivamente 15 cm, a seconda del valore ammesso per la dilatanza;
- uno spessore medio della zona di rottura di circa 14 m.

4.3.3 Stato di sollecitazione nel massiccio attorno alla cavità ed estensione della zona di rottura

Nel grafico in fig. 16, sulla parte sinistra, è rappresentato lo stato di sollecitazione nel piano di simmetria della calotta ed in un piano orizzontale, situato circa a metà altezza della caverna.

Sulla parte destra della figura, invece, è esposto il controllo dell'equilibrio globale della fascia di rottura che dimostra che le sollecitazioni risultanti dal calcolo tridimensionale in calotta sono compatibili con quelle del calcolo bidimensionale del fusto.

5. Conclusioni

Lo studio di fattibilità per le caverne destinate ad ospitare i laboratori di fisica nucleare sotto il Gran Sasso è stato condotto sulla base di alcuni elementi acquisiti durante la costruzione dell'adiacente Traforo autostradale e di altri raccolti nel corso di una contenuta campagna geognostica condotta prima dell'inizio delle operazioni di scavo.

Le informazioni relative alla situazione litologico-strutturale, idrologica e geo-meccanica dell'ammasso roccioso hanno permesso, grazie all'elaborazione dei dati operata con l'impiego dei metodi di calcolo più avanzati, di pervenire alla previsione del probabile comportamento dell'ammasso roccioso stesso a seguito dello scavo, e quindi all'indicazione degli interventi di stabilizzazione necessari a contenere e regimare i fenomeni deformativi al contorno degli scavi.

Ovviamente, una volta messo a punto il programma operativo e le tecniche di scavo e di stabilizzazione più idonee a rendere accettabili le suddette deformazioni, le previsioni operate attraverso i calcoli numerici verranno verificate e messe a punto in corso d'opera, in funzione della reale risposta dell'ammasso roccioso alle operazioni di scavo e quindi delle risultanze della campagna di controlli e misure sperimentali realizzata in situ.

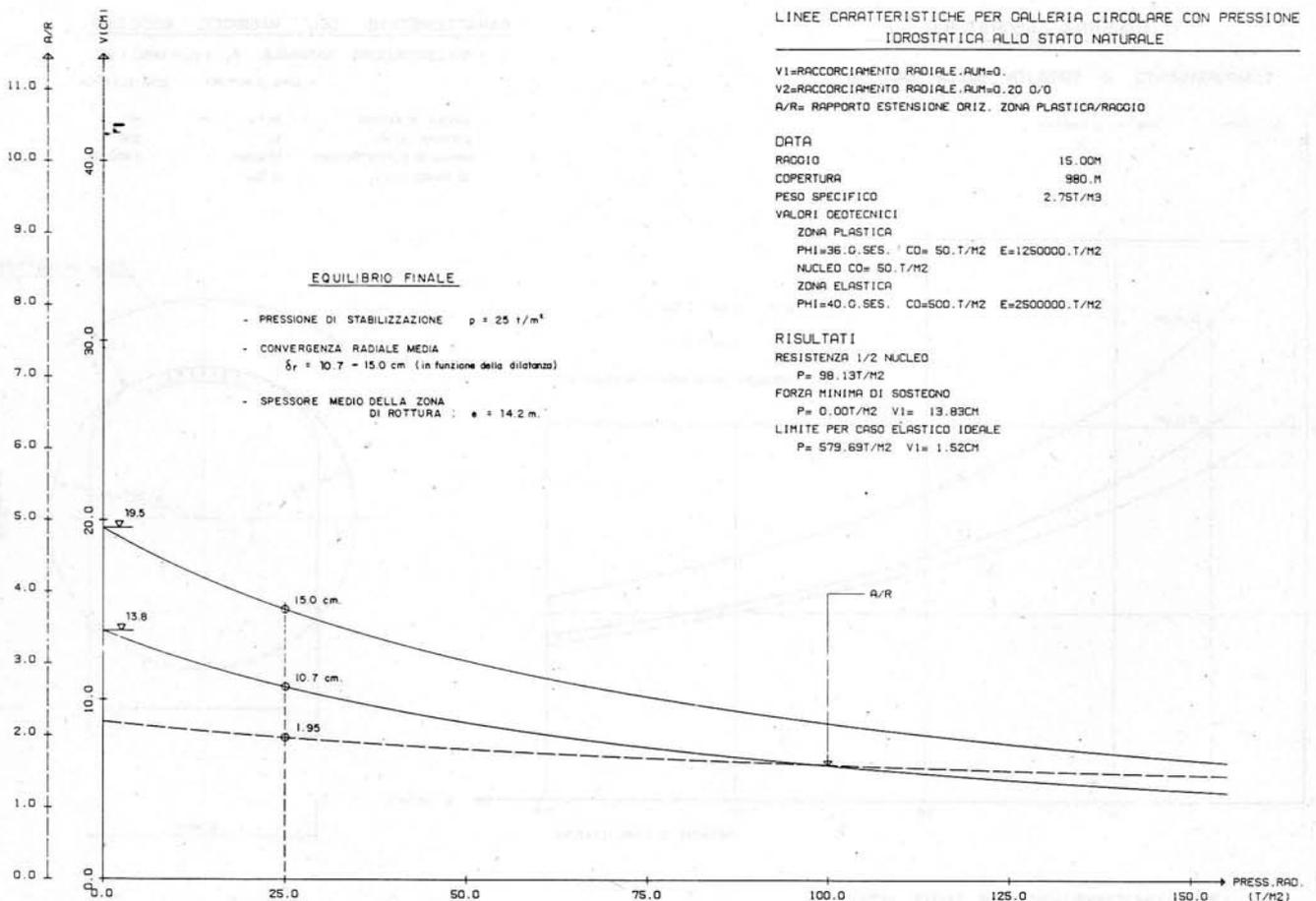


Fig. 15
Linee caratteristiche per la valutazione della stabilità del laboratorio "C" in senso laterale.
Courbe caractéristique pour l'évaluation de la stabilité en direction latéral du laboratoire "C".
Characteristic lines used for "C" laboratory wall stability calculation.

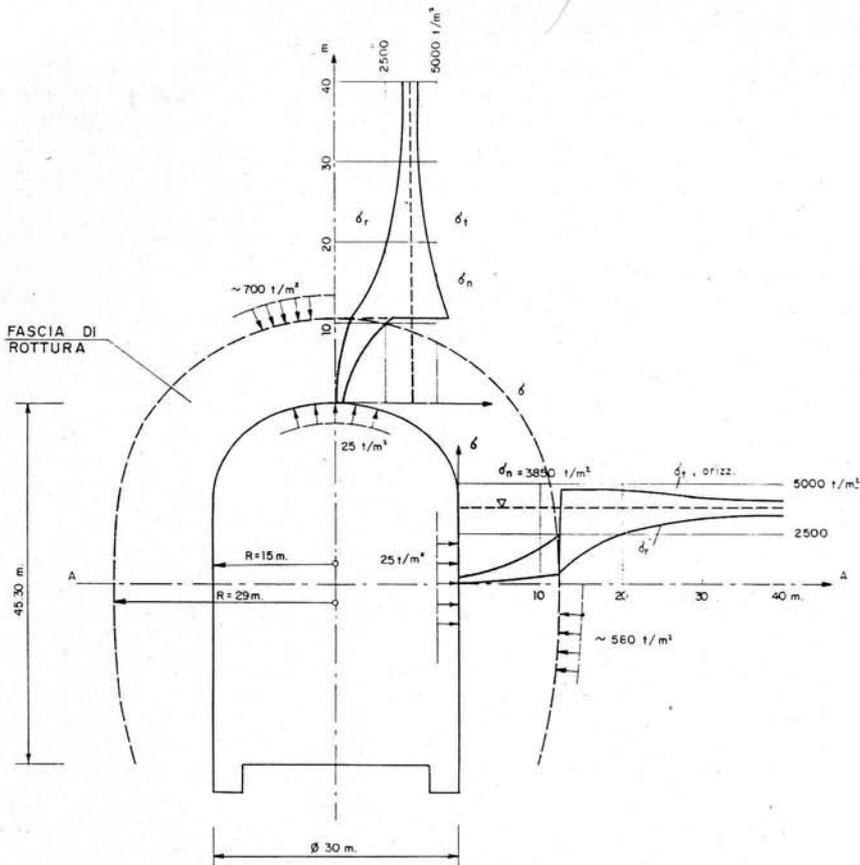


Fig. 16
Stato di sollecitazione nel massiccio attorno al laboratorio "C".
Etat de contrainte du massif autour du laboratoire "C".
Stress field in rock around "C" laboratory.

**CONTROLLO EQUILIBRIO VERTICALE
 DELLA FASCIA DI ROTTURA A
 LIVELLO DELL'ORIZZONTE A - A**

FORZE LUNGO L'ESTRADOSSO

$$N_e = 700 \cdot \pi \cdot 29^2$$

$$N_e = 1.849 \text{ mio. t.}$$

PESO PROPRIO

$$G = 0,5 \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot (30^3 - 20^3) \cdot 2,75$$

$$G = 0.109 \text{ mio. t.}$$

FORZE LUNGO L'INTRADOSSO

$$N_i = 25 \cdot \pi \cdot 15^2$$

$$N_i = 0.018 \text{ mio. t.}$$

$$N_{\text{tot}} = N_e + G - N_i \quad \boxed{N_{\text{tot}} = 1.940 \text{ mio. t.}}$$

1. LA FORZA N_{tot} DEVE ESSERE IN EQUILIBRIO CON LA RISULTANTE DELLE SOLLECITAZIONI VERTICALI NELLA FASCIA DI ROTTURA A LIVELLO DELL'ORIZZONTE A - A.

2. A CAUSA DELLE CONDIZIONI DI ROTTURA QUESTE SOLLECITAZIONI VERTICALI DEVONO ESSERE INFERIORI O UGUALI AL δ_r orizz.

INTEGRALE DEI δ_r orizz. fra 15 e 29 m.

$$\boxed{R_{\text{tot}} = 2.345 \text{ mio. t.}}$$

ESSENDO R_{tot} MAGGIORE DI N_{tot}

L' EQUILIBRIO VERTICALE E' GARANTITO

Allo stato attuale il progetto del laboratorio, per ragioni sperimentali, ha subito una ulteriore variante plano-volumetrica come evidenziato nella figura 17 che in definitiva comporta la sostituzione della caverna cilindrica "C" ad asse verticale con una caverna cilindrica, ad asse orizzontale, di diametro 22 m, per la quale i problemi statici sono riconducibili a quelli delle caverne "A" e "B".

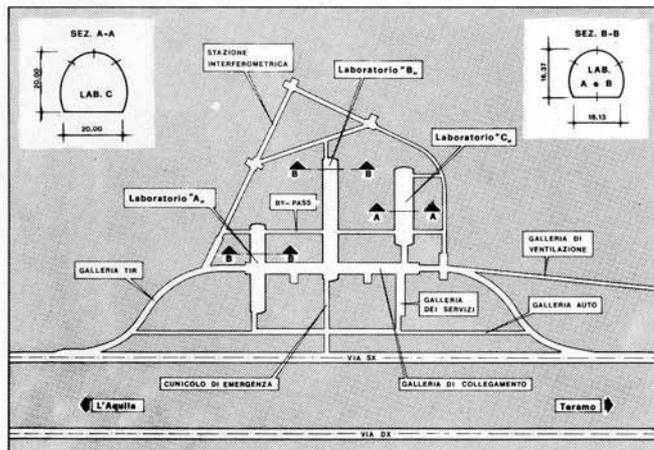


Fig. 17
Schema planimetrico dell'ultima variante.
Schème planimétrique du dernier changement.
Las version plan.

RINGRAZIAMENTI

Gli autori ringraziano per la collaborazione:
 Dott. Ing. Fausto Belletini - vice direttore generale COGEFAR S.p.A.
 Dott. Ing. Cesare Antiga - direttore tecnico del cantiere
 Dott. Ing. Walter A. Amberg - collaboratore Studio Lombardi
 Dott. Ing. Renzo Bindi - collaboratore Studio Lunardi.

