

L'acciaio inossidabile per il consolidamento strutturale di opere sotterranee

Prof. Pietro Lunardi,
Università di Parma

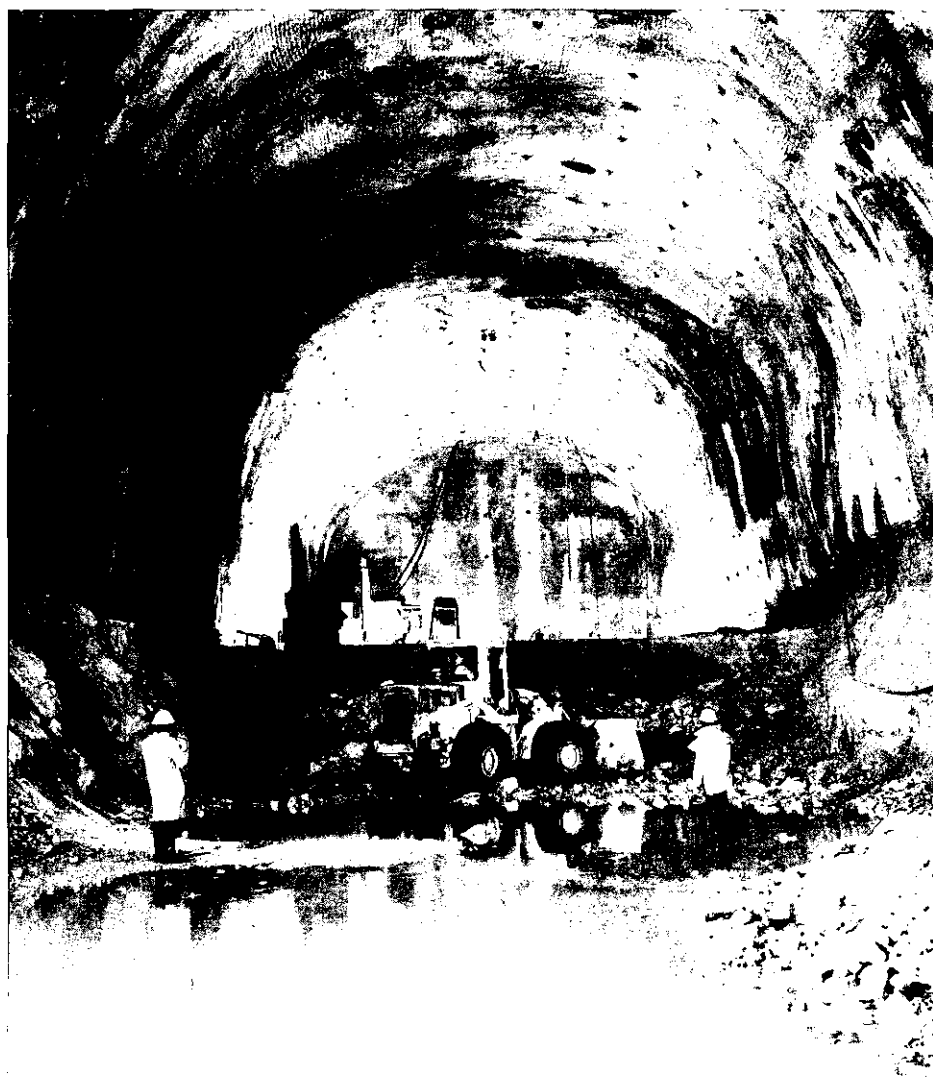


foto 1: Laboratorio Nazionale di fisica sub-nucleare del Gran Sasso - la caverna laboratorio "B" in fase di scavo

Introduzione

La realizzazione di una qualsiasi opera in sotterraneo comporta automaticamente l'alterazione di equilibri naturali preesistenti nel terreno circostante.

Immaginando la situazione rappresentata, in termini di sollecitazione, da un campo di tensioni uniformemente crescenti con l'aumentare della profondità, l'introduzione di una cavità induce inevitabilmente una modificazione di questo campo comportando un flusso di tensioni deviato 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

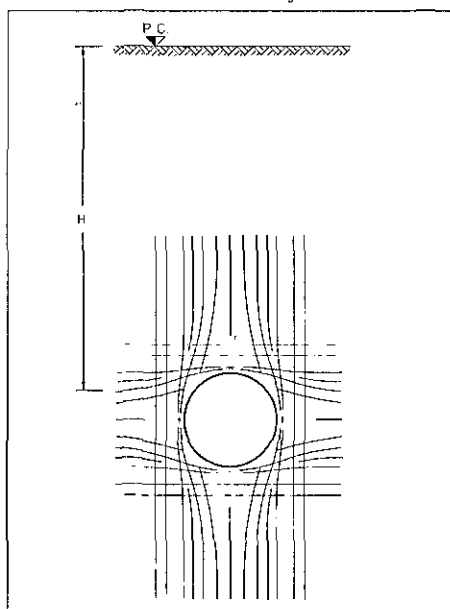


Fig. 1: deviazione del flusso di tensioni al contorno di una cavità in sotterraneo

termine.

A questo scopo occorre distinguere due situazioni principali:

- le caratteristiche di resistenza del materiale sono tali da sopportare senza rotture le nuove sollecitazioni ed i fenomeni deformativi si evolvono in campo elastico: ne deriva un serraggio del materiale che trova in se stesso le risorse per assorbire le sovratensioni più prossime al contorno della galleria fino a formare un arco naturale che assicura la stabilità globale del cavo;
- la resistenza intrinseca del materiale è superata dalle sollecitazioni indotte dall'avanzamento della galleria ed i fenomeni deformativi si evolvono in campo elastoplastico: nell'ammasso al contorno della galleria si forma una zona di rottura entro cui, non potendosi avere, oltre una certa soglia, un aumento di sollecitazione, si verificheranno importanti deformazioni accompagnate da perdita di resistenza del materiale.

Prefabbricati e Strutture

Le situazioni del primo tipo (fig. 2a) sono le meno preoccupanti per il progettista di gallerie e per gli operatori degli scavi, essendo la natura da sola in grado di assicurare la stabilità globale della cavità lasciando all'operativo il compito di intervenire localmente per prevenire possibili distacchi gravitativi di blocchi isolati dall'intreccio delle discontinuità del materiale roccioso.

Le situazioni del secondo tipo (fig. 2b) richiedono invece di essere considerate attentamente perché possono evolvere facilmente verso l'instabilità del cavo non essendo il materiale roccioso in grado di sopportare il nuovo stato tensionale venutosi a creare.

La stabilizzazione del cavo in tal caso può essere conseguita solo se riusciremo a fornire in qualche modo al terreno la capacità di resistere alle nuove sollecitazioni.

Ciò è possibile attraverso due vie:

1) Conservare le caratteristiche geomeccaniche del terreno circostante il cavo applicando sulle sue pareti una pressione di contenimento P_a tale da metterlo in grado di sopportare le nuove sollecitazioni senza rotture;

2) migliorare le caratteristiche geomeccaniche del terreno circostante il cavo in modo da aumentare adeguatamente la sua capacità di resistenza.

L'effetto di interventi del primo tipo è schematizzabile sul piano di Mohr come un limite posto al decadimento della tensione principale minore verso valori nulli (fig. 3a): si ottiene così uno stato tensionale di tipo biassiale compatibile con le caratteristiche di resistenza dell'ammasso roccioso circostante.

Al contrario, l'effetto di interventi del secondo tipo è schematizzabile con un innalzamento della curva intrinseca, grazie al quale il cerchio delle tensioni di Mohr è ancora una volta interamente contenuto entro il dominio di rottura (fig. 3b).

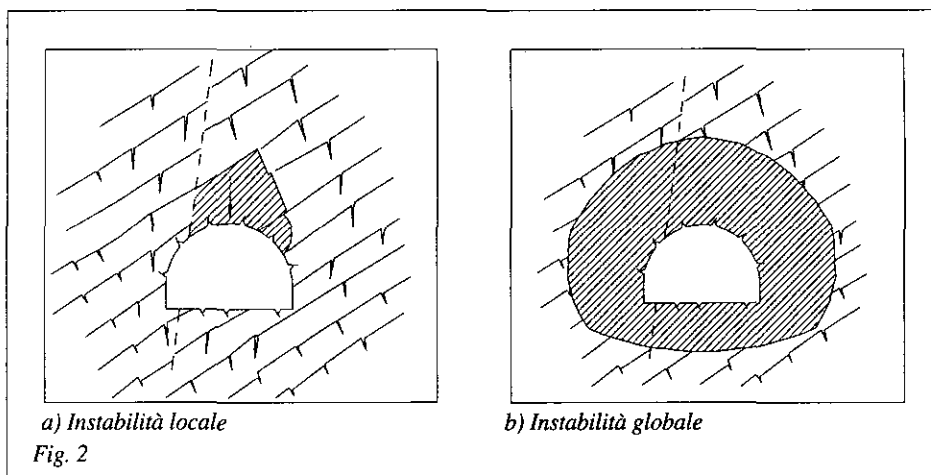
In passato, fino a qualche decina di anni fa, si era costretti ad operare esclusivamente per la prima via, non essendo disponibili adatte tecniche di consolidamento dei terreni.

I sistemi di scavo poco perfezionati spesso obbligavano ad avanzare a sezione parzializzata ed intercorrevano parecchi mesi tra lo scavo e la messa in opera del rivestimento definitivo.

Questo portava ad importanti allentamenti nel terreno che veniva a gravare sulla galleria con tutto il suo peso.

Si ricorreva quindi a pesanti opere di rivestimento del cavo per «sostenere» le spinte di imponenti masse di terreno allentato.

Oggi, essendo disponibili sistemi di



consolidamenti e preconsolidamento adatti per qualsiasi tipo di terreno e situazione, è possibile, mediante l'azione eventualmente combinata di interventi «conservativi» o «migliorativi», far collaborare il terreno stesso alla statica del cavo rendendolo autoportante.

Si conseguono così diversi vantaggi:

- minori fenomeni deformativi, quindi minori volumi da scavare a parità di sezione finita;
- fascia di rottura attorno al cavo più ridotta, quindi minori spinte sui rivestimenti a lungo termine;

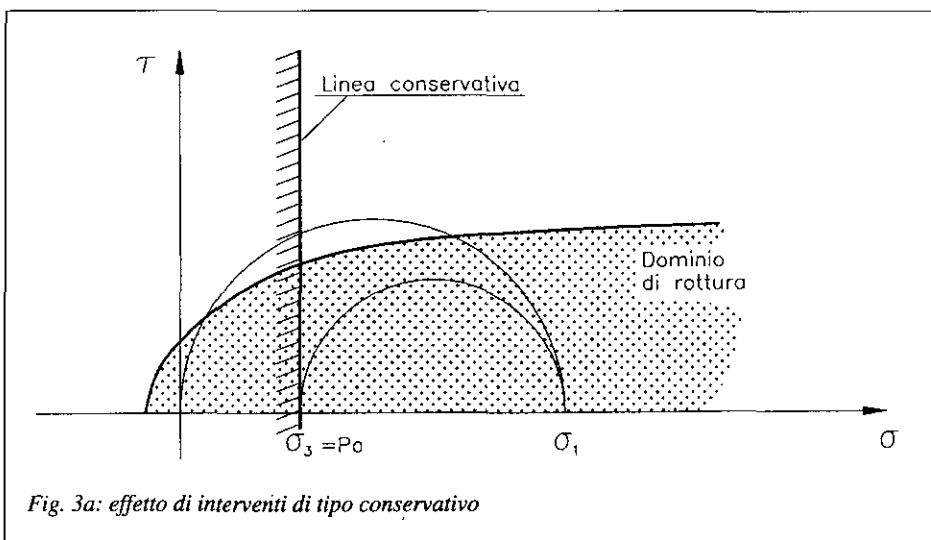


Fig. 3a: effetto di interventi di tipo conservativo

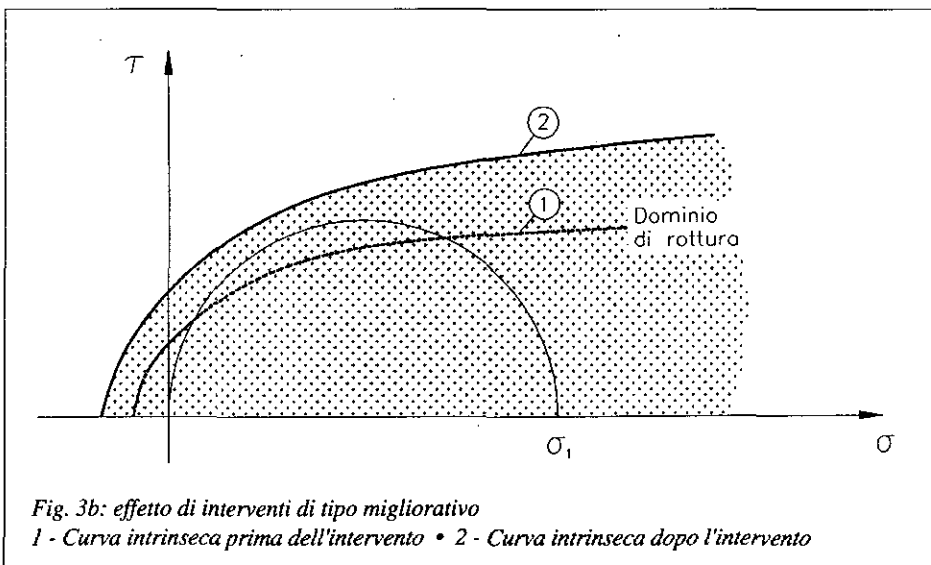


Fig. 3b: effetto di interventi di tipo migliorativo
1 - Curva intrinseca prima dell'intervento • 2 - Curva intrinseca dopo l'intervento

• maggior sicurezza del cantiere.

Naturalmente, le tecniche di consolidamento da impiegare variano a seconda del materiale da trattare e dello scopo da raggiungere.

Oggi abbiamo possibilità d'intervento efficaci su qualsiasi tipo di terreno e per qualsiasi situazione operativa.

In terreni a comportamento sciolto si ricorre generalmente ad interventi quali:

- iniezioni tradizionali o jet-grouting, per incrementare la coesione a scala di matrice (figg. 4a e 4b);
- drenaggi, per ottenere una migliore resistenza per attrito (fig. 4c);
- congelamento, in casi particolari ove non è possibile intervenire altrimenti (fig. 4d).

In terreni a comportamento lapideo il consolidamento generalmente ha lo scopo di aumentare la coesione lungo le discontinuità, quindi a scala d'ammasso, essendo quella di matrice già elevata.

Si ricorre allora ad interventi strutturali di cucitura dei giunti, mediante chiodi od ancoraggi d'acciaio (fig. 4e).

Naturalmente per essere efficaci e realmente vantaggiose le opere di consolidamento devono avere carattere permanente.

Ciò impone l'uso di materiali di grande affidabilità e garantiti nel tempo.

I grandi progressi compiuti in questo senso dall'industria siderurgica nella produzione di acciai speciali hanno favorito la loro crescente affermazione nel campo delle costruzioni in sotterraneo.

Gli acciai inossidabili e le costruzioni in sotterraneo

Fra gli acciai speciali, gli acciai inossidabili (leghe a base di ferro, di cromo e di carbonio ed anche di altri elementi quali il nichel, il molibdeno, il manganese, il silicio, il titanio, ecc.) risultano particolarmente resistenti alla corrosione.

Questa caratteristica di buona resistenza alla corrosione è dovuta alla proprietà di queste leghe di passivizzarsi in un ambiente sufficientemente ossidante tramite la formazione di una particolare pellicola superficiale di ossigeno assorbito che protegge il materiale sottostante dall'attacco corrosivo.

Naturalmente variando l'influsso dei diversi elementi si ottengono variazioni sensibili delle caratteristiche intrinseche della lega, quindi vari tipi di acciai. In pratica si distingue in:

- acciai martensitici, aventi un tenore di carbonio compreso tra 0,1 e 0,50% con punte anche di 1% ed oltre, nonché un

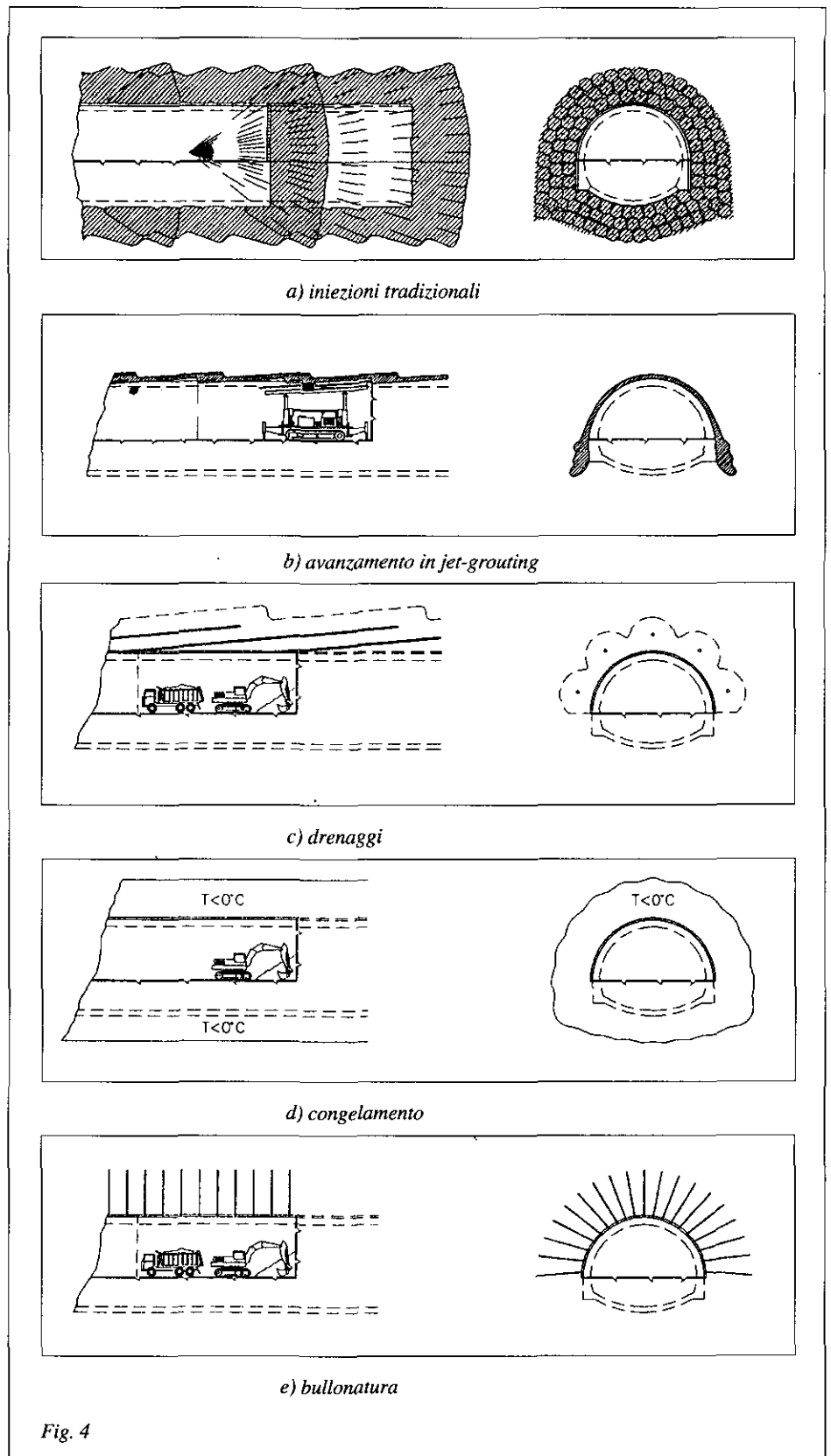


Fig. 4

tenore di cromo tra 11% e 18%;

- acciai ferritici, con tenore di cromo compreso tra 16 e 30% e tenori di carbonio molto bassi, solitamente al disotto dello 0,1%;

- acciai austenitici, che oltre al cromo, in

ragione del 16 + 26%, contengono anche nichel (6 + 22%) e tenori di carbonio molto bassi, solitamente meno di 0,1%.

Talvolta il nichel può essere sostituito dal manganese.

Gli acciai martensitici offrono i massi-

Prefabbricati e Strutture

mi valori di resistenza uniti ad una discreta resistenza alla corrosione.

Inoltre sono gli unici che possono essere temprati.

Gli acciai ferritici offrono una buona resistenza alla corrosione, ma sono caratterizzati da un netto scadimento di caratteristiche meccaniche per temperature inferiori ai 20° C.

Gli acciai austenitici, pur non raggiungendo le resistenze offerte da quelli martensitici, offrono in compenso un'ottima resistenza alla corrosione ed un ottimo comportamento sia alle basse che alle alte temperature.

E' importante conoscere le proprietà dei vari tipi di acciai perché, specie nell'impiego in sotterraneo, in un ambiente quindi dove possono ritrovarsi situazioni ed agenti aggressivi di diversa natura, una scelta errata può portare a seri danni nei riguardi della sicurezza delle opere nel tempo.

La scelta potrà essere basata sui seguenti elementi principali:

- entità delle sollecitazioni previste e tipo di carichi (di trazione, di taglio, ciclici, ecc.);
- temperature di esercizio (depositi di

Caratteristiche Acciai	Carico di rottura [Kg/mm ²]	Carico di snervamento [Kg/mm ²]	Comportamento ad elevata temperatura	Comportamento a bassa temperatura	Resistenza alla corrosione	Ferrama_gnetismo	Note
Martensitici	70 ÷ 105	42 ÷ 88	● ● ●	● ●	● ●	SI	Atti a prendere tempo
Ferritici	42 ÷ 70	23 ÷ 35	● ● ●	●	● ● ●	SI	—
Austenitici	45 ÷ 80	18 ÷ 58	● ● ● ●	● ● ● ●	● ● ● ●	NO	Notevoli aumenti di resistenza per incrudimento

● Scarso ● ● Discreto ● ● ● Buono ● ● ● ● Eccellente

Tabella I

stoccaggio alimentare, centrali nucleari, ecc.);

- presenza di agenti corrosivi.

La Tabella I riassume in maniera sintetica le caratteristiche che contraddistinguono i vari tipi di acciai inossidabili.

Esempi d'impiego

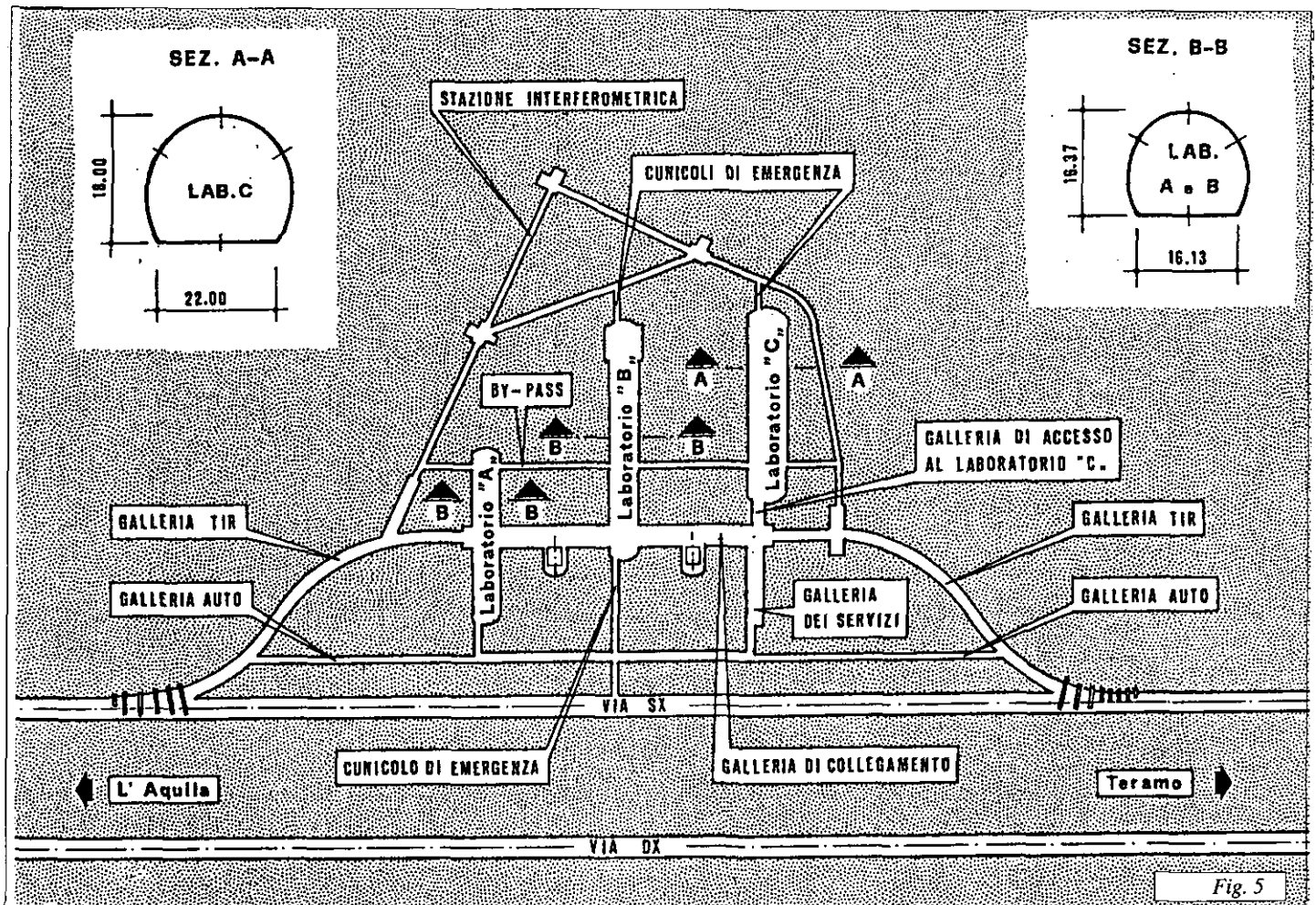
Vediamo ora alcuni esempi di come gli acciai inossidabili vengono utilizzati in elementi strutturali per la realizzazione di opere sotterranee.

Laboratorio Nazionale di fisica sub-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.

Questo (fig. 5) 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 fig. 6 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

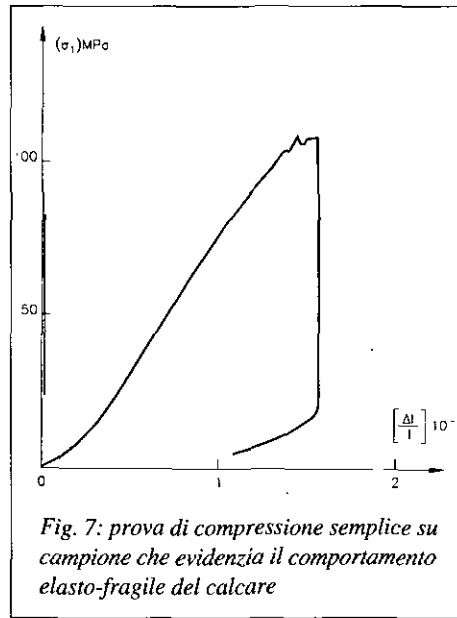


Fig. 7: prova di compressione semplice su campione che evidenzia il comportamento elasto-fragile del calcare

resistenza giungevano alla rottura improvvisamente e bruscamente (fig. 7).

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;
 - dilatazione 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.

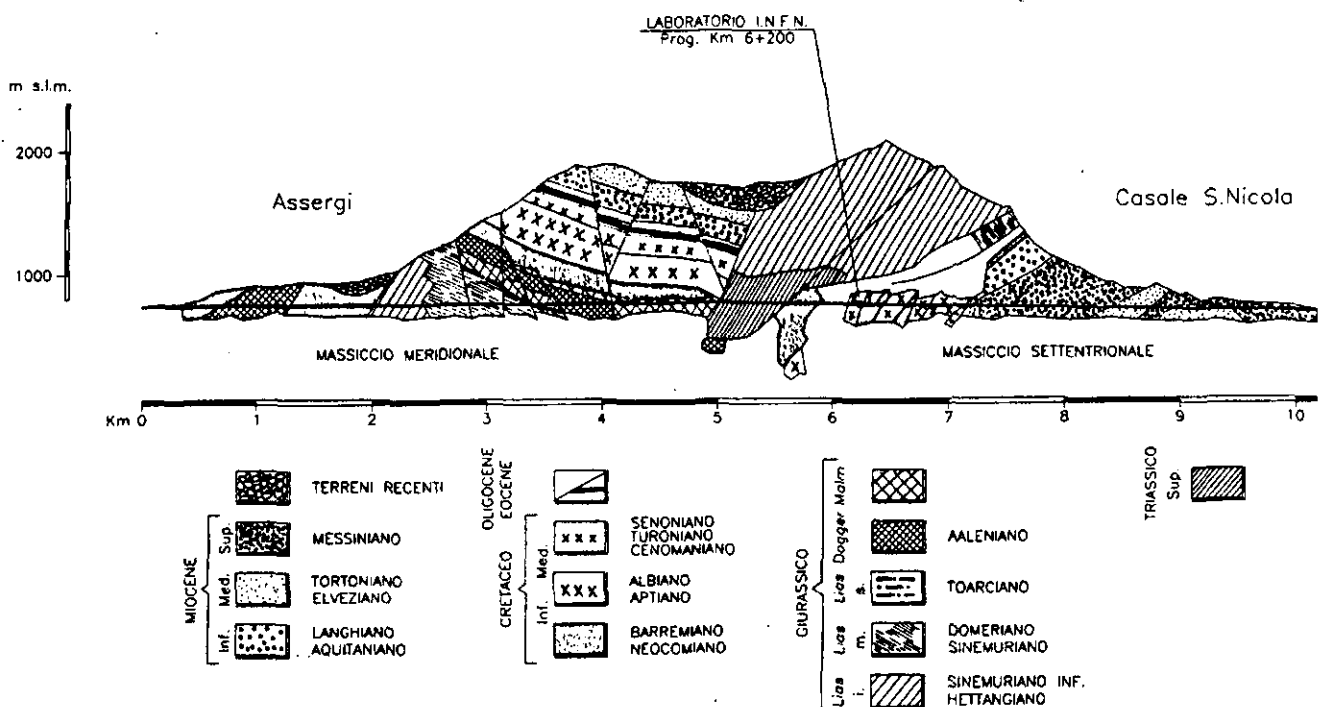
Il comportamento fragile del materiale imponeva quindi di adottare interventi di stabilizzazione che, oltre a garantire la tenuta dei cavi nel breve e nel lungo termine, aumentassero apprezzabilmente la coesione d'insieme dell'ammasso roccioso in una fascia prossima alle pareti di scavo, riducendo al minimo il pericolo di detensionamento naturale, con scoppi di roccia in corrispondenza dei paramenti.

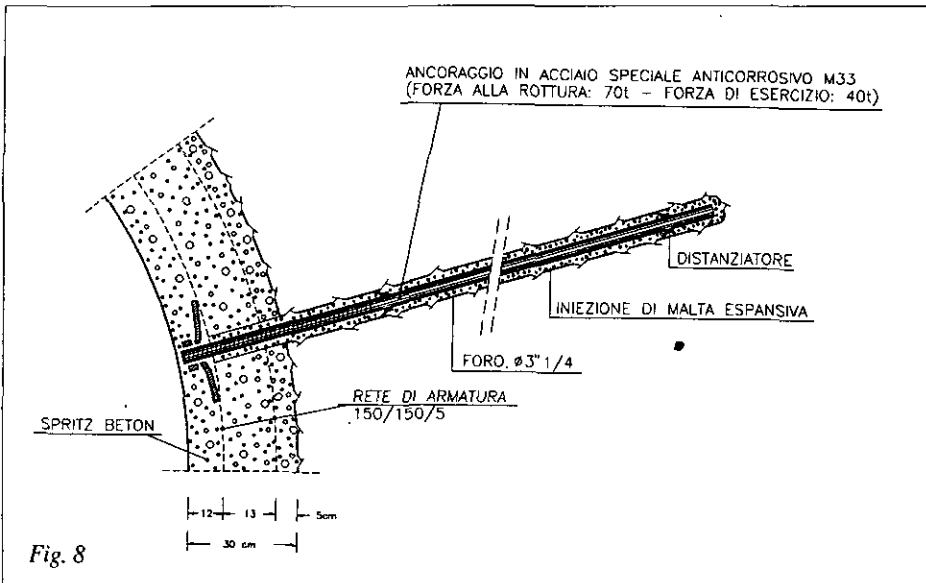
Si pensò quindi di realizzare al contorno delle cavità una fascia di roccia armata mediante la messa in opera sistematica di ancoraggi passivi a protezione totale (fig. 8), che cucendo le superfici di discontinuità potenziali più o meno latenti nell'ammasso roccioso ne aumentassero considerevolmente la resistenza al taglio.

Resa così la roccia autoportante, sareb-

Fig. 6

Traforo Autostradale del Gran Sasso profilo geologico longitudinale





(vedi linee caratteristiche in fig. 9).

Definito 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 venire 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 M 33 (AISI 420), che alle alte doti di resistenza a sollecitazioni di taglio-trazione unisce un'ottima resistenza alla corrosione dovuta all'acqua.

In fig. 10 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.

be stato sufficiente un sottile rivestimento di spritz-beton armato con rete elettrosaldata 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 $19,5 \pm 25$ cm di convergenza radiale media a seconda del valore della dilatazione assunto per i calcoli

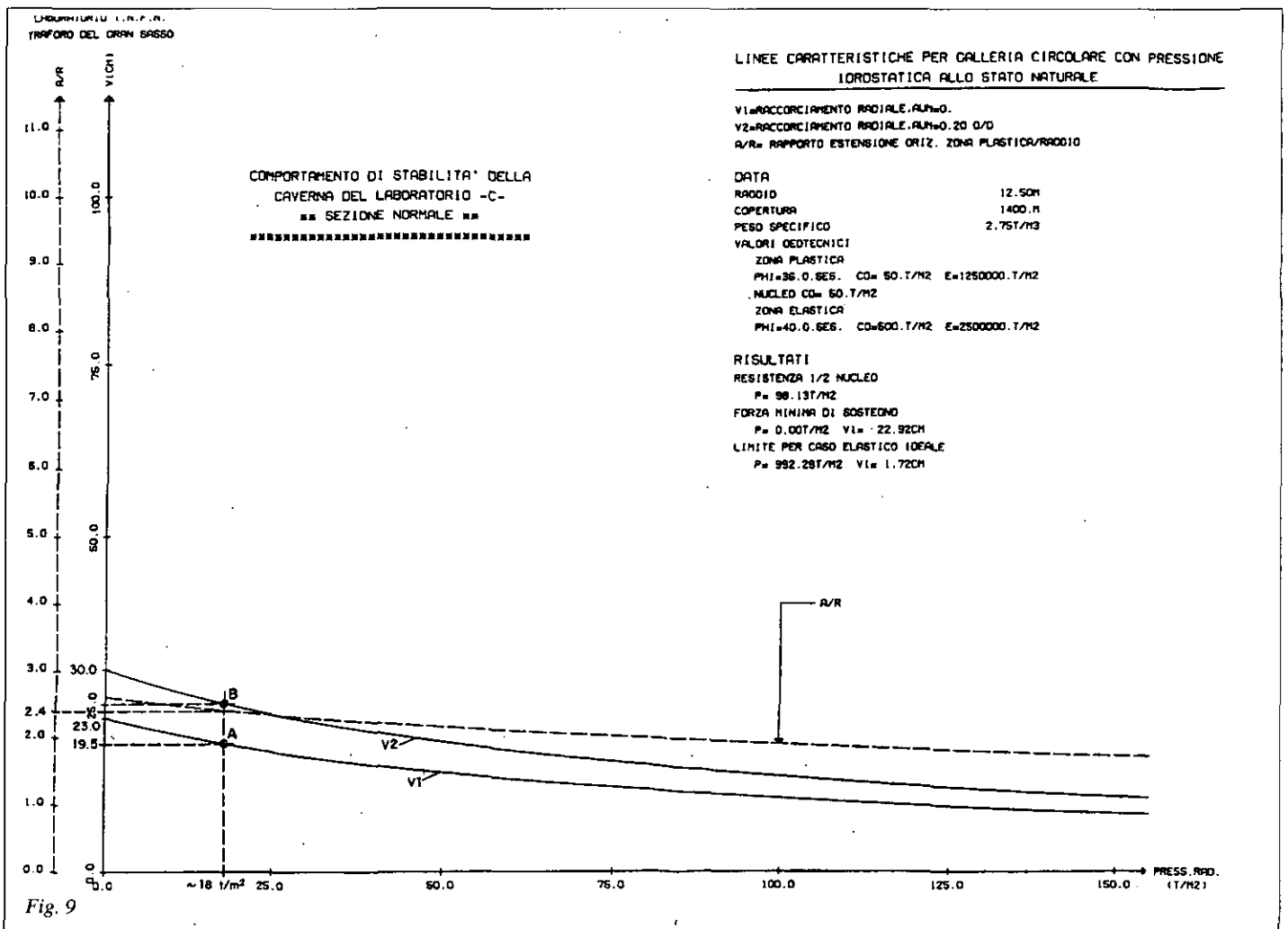


Fig. 9

Il modo di procedere è stato quindi il seguente:

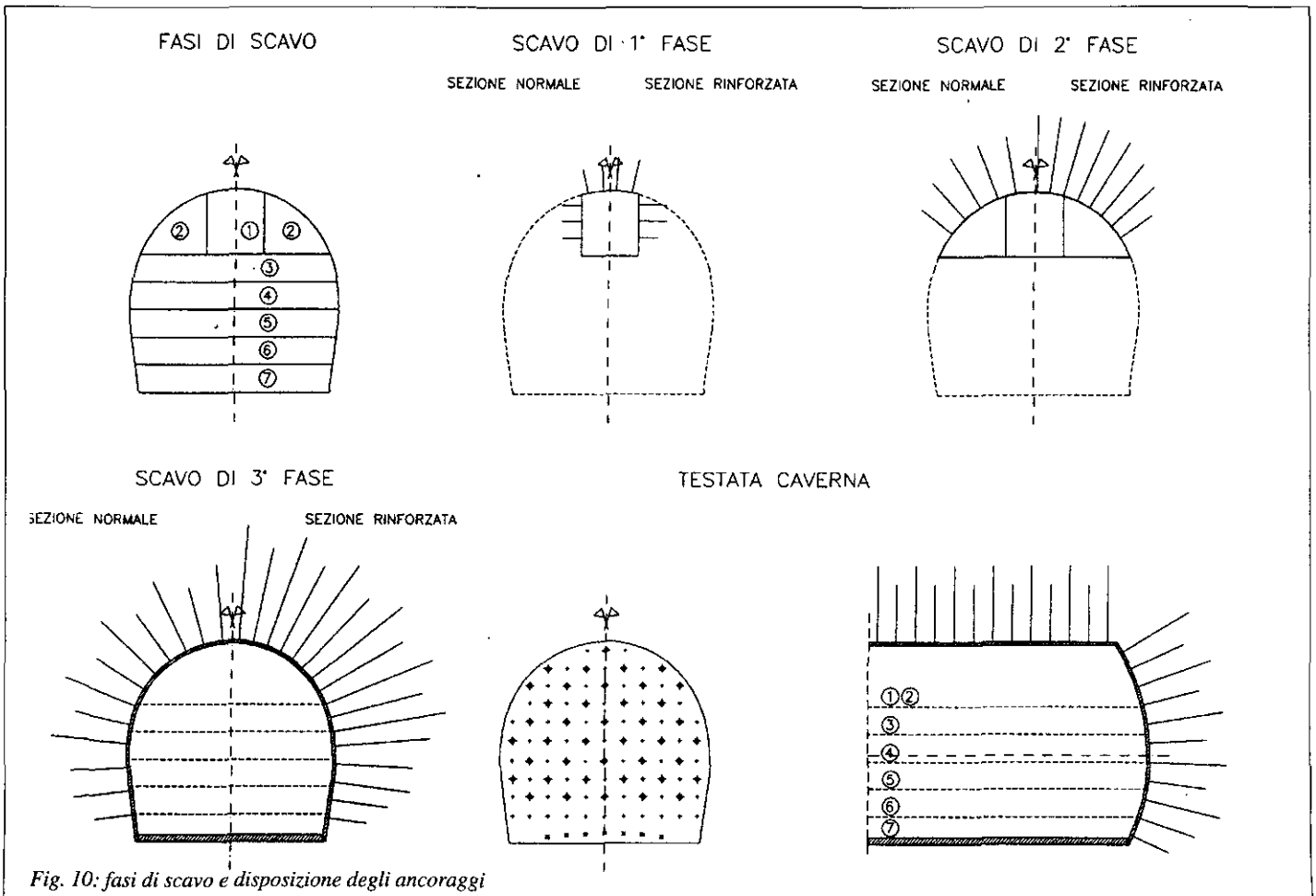
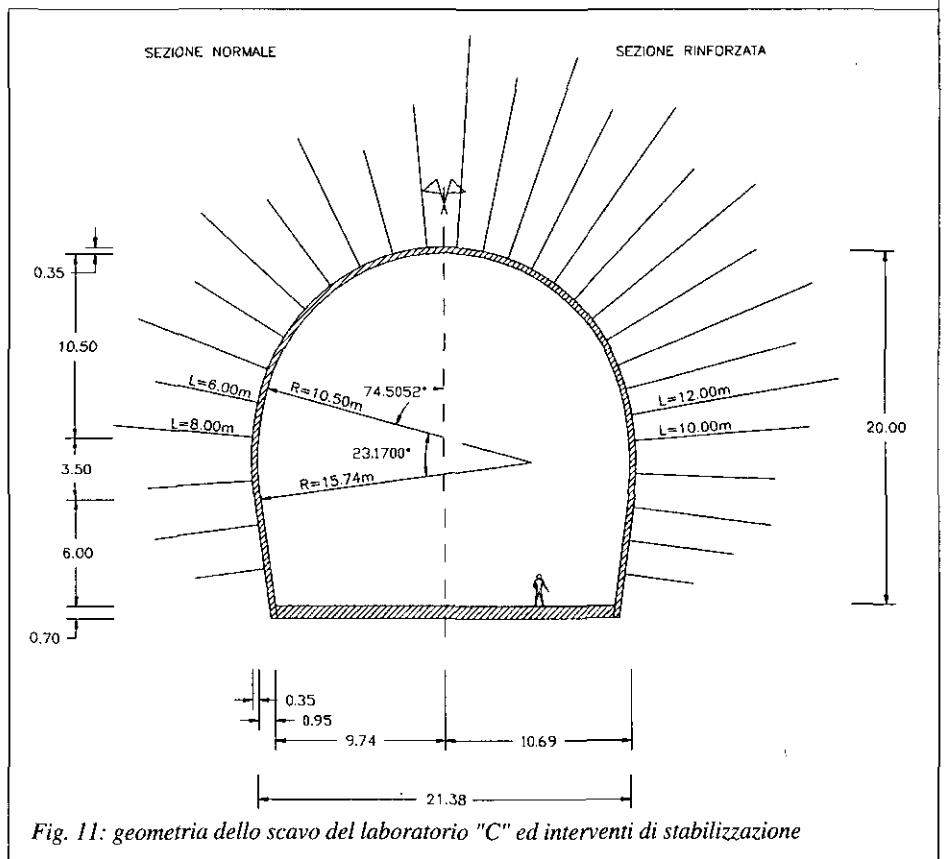
- avanzamento in calotta di un cunicolo di circa 6 m di diametro;
- allargò del cunicolo, per campioni, a tutta la calotta, con contemporanea stabilizzazione dello scavo mediante la posa di ancoraggi passivi d'acciaio inossidabile $\varnothing 30,6$ mm, lunghezza $6 \div 8$ m, tiro di esercizio 40 t, disposti secondo una maglia di due metri di lato, e di un primo strato di spritz-beton (fig. 11 e foto 1 e 2).

In zone ove la roccia risultava più fratturata l'intervento veniva rinforzato adottando ancoraggi di maggiore lunghezza ($10 \div 12$ 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



Prefabbricati e Strutture

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.

Palestra polifunzionale del Comune di Merano

Nell'ambito del progetto infrastrutture sotterranee della Provincia Autonoma di Bolzano è all'esame la realizzazione, a Merano, di una palestra in sotterraneo la cui progettazione è tutt'oggi in corso.

Il luogo prescelto per la costruzione è il Monte S. Benedetto con accesso dalla centralissima via Galilei; si otterrebbe così nel centro della città, senza creare alcun sconvolgimento nè urbanistico nè ambientale, un importante complesso sportivo altrimenti difficilmente localizzabile se non in periferia.

La precisa ubicazione dell'opera e la sua orientazione sono state ipotizzate in seguito ad una campagna geognostica di superficie.

I terreni che sarebbero interessati dagli scavi appartengono al Complesso della zona di Merano-Mules-Anterselva e delle Breonie, tutto costituito da vari litotipi metamorfici tra cui i «Paragneiss a bande s.l.», caratterizzati nella zona in oggetto, da micascisti, anfiboliti, e soprattutto da gneiss minuti ricchi di quarzo e plagioclasio.

La giacitura della scistosità immerge verso W-NW-N con inclinazione media di 60° e spaziatura 25 ÷ 30 cm, mentre quella delle fratture è varia essendo direzione verso SW, W-NW e N-NE, con inclinazione media di 70° e spaziatura 100 cm (fig. 12).

La quota della falda non è stata rilevata, comunque la presenza di torrenti in superficie fa ritenere probabile la presenza di acqua sotterranea.

L'opera nel suo insieme si articolerebbe in due parti principali: una grande hall a pianta circolare di 30 metri di diametro e 12 d'altezza e la palestra vera e propria di 73 metri di lunghezza, 35 di larghezza e 19,50 d'altezza massima.

La capienza dell'impianto è valutata in circa 1.300 persone.

Le problematiche connesse alla realizzazione dell'opera sono legate alle inusuali dimensioni delle cavità che non permettono, se non a costi proibitivi, la realizzazione di un rivestimento interno continuo esteso a tutta la volta.

Data la debole copertura, l'ammasso roccioso in seguito allo scavo sarebbe sollecitato in campo elastico, per cui i fenomeni d'instabilità potrebbero essere essenzial-

mente di tipo gravitativo e regolati dall'intreccio di discontinuità nella roccia e dalle caratteristiche geomeccaniche dei giunti.

Lo studio geostrutturale ha consigliato di estendere longitudinalmente le opere di scavo da SW a NE.

In tal modo, iniziando lo scavo da SE, quasi tutte le discontinuità potrebbero incontrarsi praticamente a reggipoggio, con notevoli vantaggi per la stabilità dell'opera e la sicurezza dei lavori.

Ai fini dei calcoli di stabilità, ancora in fase preliminare, si sono ipotizzati dei parametri geotecnici medi d'ammasso desunti, in assenza di una più approfondita campagna geognostica, dalle risultanze della campagna geologica di superficie.

In particolare si sono valutati i seguenti parametri caratteristici del criterio di rottura di Hoek e Brown:

- σ_c : 7.500 t/mq;
- m: 2,5;
- s: 0,02;

dove, in particolare, σ_c è la resistenza della matrice rocciosa, m dipende dalla natura del materiale ed ha lo stesso significato dell'angolo d'attrito, s riflette lo stato di fratturazione dell'ammasso (per roccia sana $s = 1$).

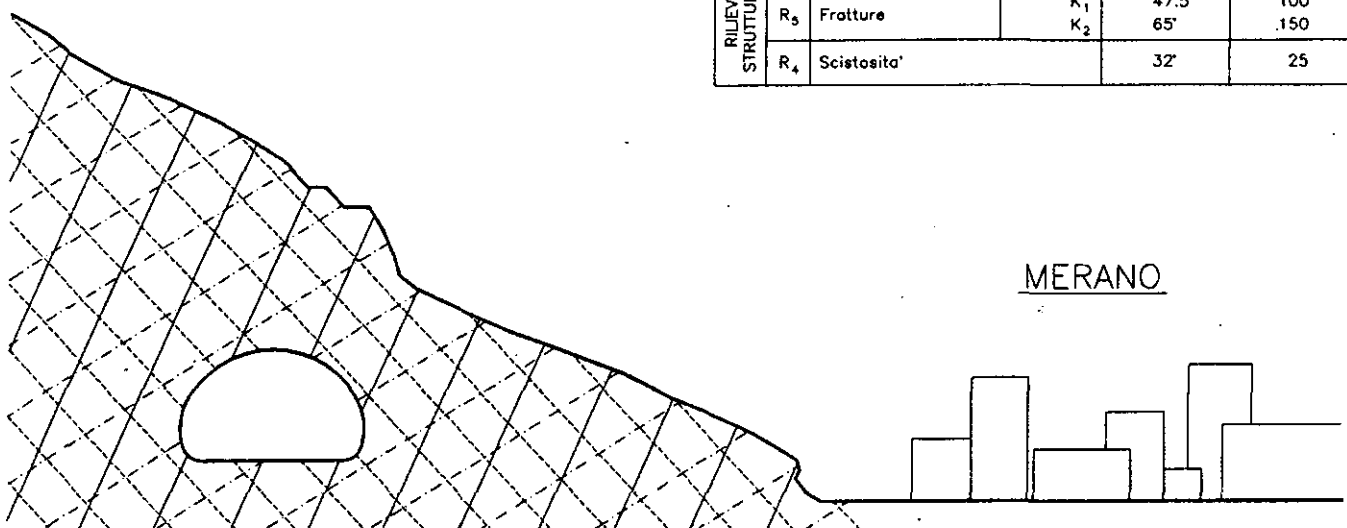
Il peso di volume del materiale è circa 2,7 t/mc.

Si è costruita quindi la curva intrinseca dell'ammasso roccioso (vedi fig. 13).

Lo stato tensionale in seguito all'apertura della cavità è stato valutato, in prima analisi, attraverso un calcolo nel continuo

Fig. 12: sezione strutturale trasversale alla caverna-palestra

RILIEVO STRUTTURALE	DIREZIONE		FAMIGLIA	i APPARENTE	SPAZ. cm
	R ₃	Fratture		K ₁ K ₂	47.5° 65°
R ₄	Scistosità			32°	25



mediante il metodo degli elementi finiti in stato di deformazione piana.

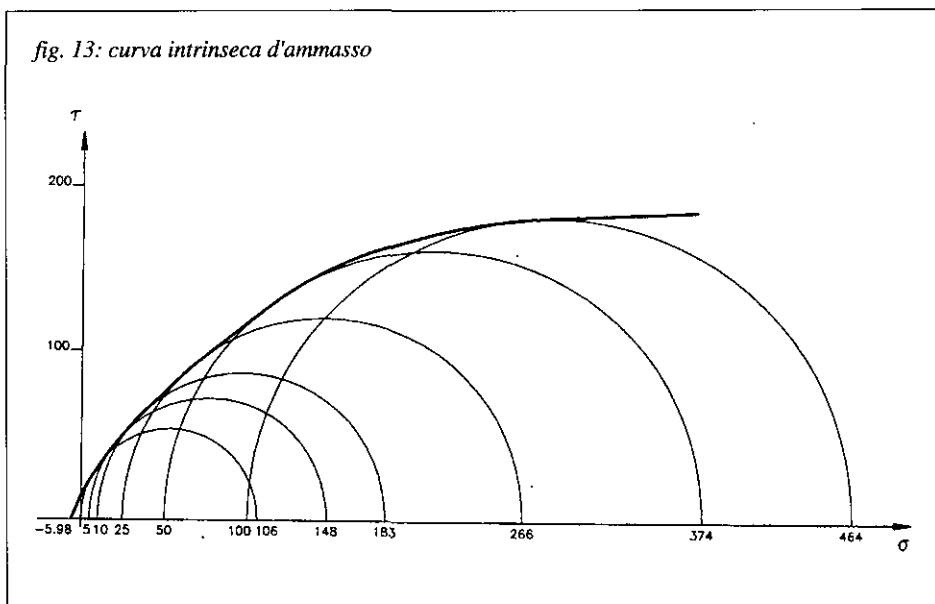
I risultati ottenuti hanno evidenziato la formazione, in calotta alle caverne, di una fascia di circa 6 m di spessore di materiale sollecitato da tensioni di trazione, a conferma che i fenomeni d'instabilità da contrastare saranno dovuti al detensionamento dell'ammasso roccioso.

L'intervento di stabilizzazione allora dovrà essere scelto e dimensionato per impedire la caduta di blocchi rocciosi per effetto del proprio peso.

A questo scopo potrà essere sufficiente applicare alle pareti delle cavità una pressione di contenimento di circa 16 t/mq.

La tipologia d'intervento che meglio risponde a questa esigenza statica consiste nel «cucire» la fascia di roccia soggetta a decomprimersi a zone più profonde, non decomprese e sicuramente stabili, dell'ammasso roccioso.

Si è previsto, quindi, di stabilizzare i cavi mediante una bullonatura sistematica dell'ammasso roccioso, realizzata mediante barre in acciaio $\varnothing 26,5$, ad aderenza continua, di $10 \div 12$ m di lunghezza e 32 t di tensione d'esercizio, dotate in testa di tas-



sello meccanico d'ancoraggio ad espansione e disposte con frequenza di una ogni 2 mq (fig. 14).

L'intervento sarebbe perfezionato con la messa in opera di un sottile manto di spritz-beton armato con fibre d'acciaio e rete elettrosaldata.

Naturalmente, affidando la stabilizzazione delle cavità in gran parte alla bullonatura, anche in questo caso occorre avere precise garanzie sull'integrità e durabilità dell'intervento nel tempo.

I bulloni d'acciaio inossidabile di tipo martensitico, grazie alle loro doti

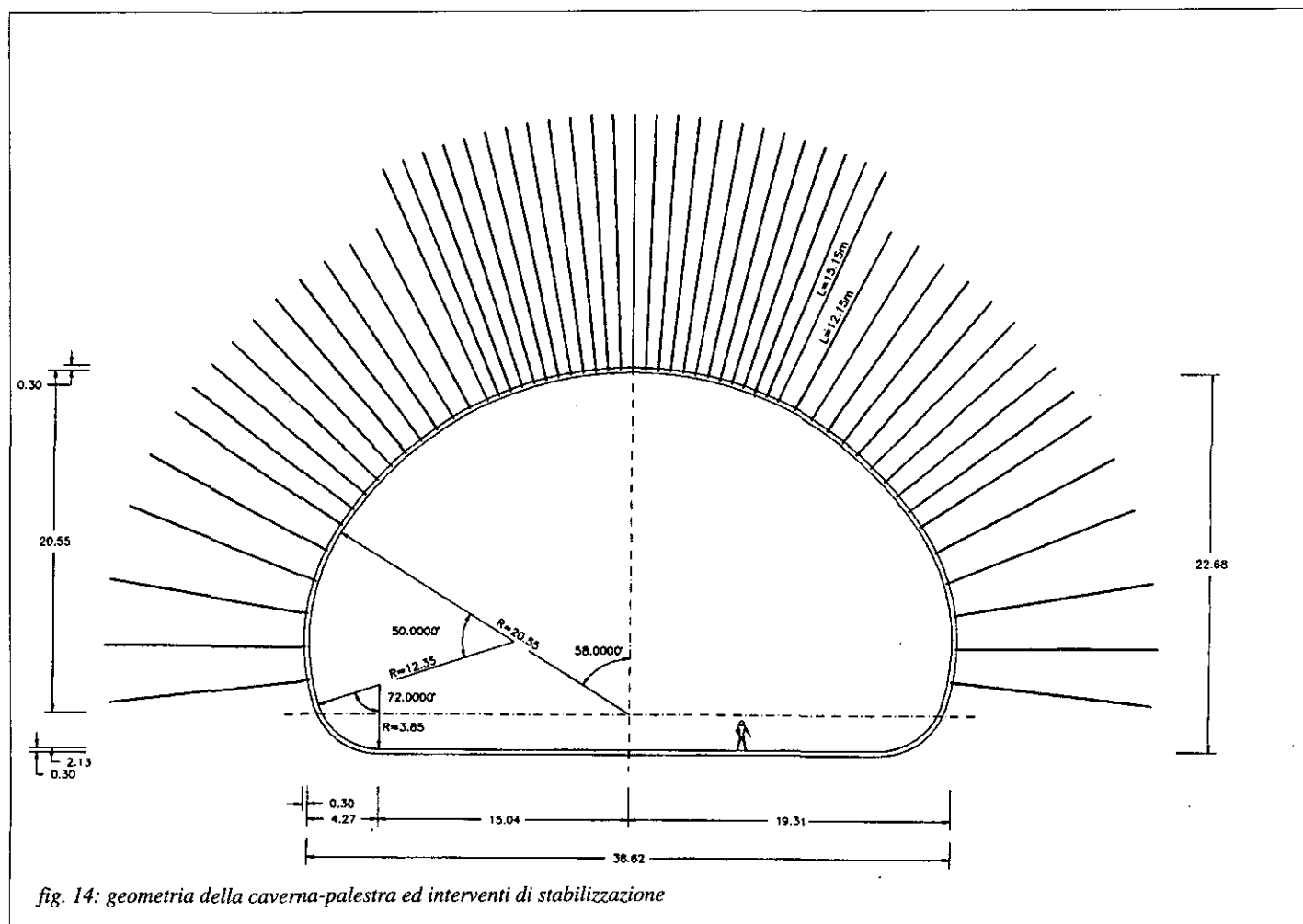




foto 2: Laboratorio Nazionale di fisica sub-nucleare del Gran Sasso - caverna laboratorio "C"

anticorrosione ed all'elevato limite elastico, possono rispondere ottimamente a questa esigenza.

Conclusioni

Sono stati presentati due esempi di realizzazioni in sotterraneo in cui trovano applicazione gli acciai inossidabili, una già ultimata, l'altra in fase di progettazione.

Sono dei primi esempi, ma si ritiene che in futuro potranno essere seguiti da altri se prenderà sempre più piede la tendenza a

pianificare il sottosuolo per utilizzazioni di tipo civile, industriale e militare, quali: impianti di depurazione, impianti di stoccaggio di liquidi, combustibili, derrate alimentari, ecc., impianti di produzione di energia elettrica da centrali tradizionali o nucleari, impianti d'immagazzinamento di scorie radioattive o rifiuti in genere.

Lo spazio sotterraneo è ormai diventato una risorsa naturale sempre più necessaria per la vita dell'uomo e numerosi sono gli stimoli favorevoli alla sua utilizzazione: l'affollamento delle 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.

Oggi, grazie alla messa a punto di nuove tecnologie di scavo, le strutture in sotterraneo sono diventate, sotto il profilo costruttivo ed economico, persino più competitive delle stesse realizzazioni all'aperto e questo è certamente un ulteriore importante motivo che giocherà a favore della loro diffusione.

