

■ 1 Le rocce e gli scavi in galleria

1.1 Tipologie di gallerie

Le gallerie naturali vengono realizzate completamente all'interno dell'ammasso roccioso e possono avere, una volta rivestite con calcestruzzo semplice o armato, una sezione trasversale finita policentrica, mistilinea o perfettamente circolare. Abbiamo essenzialmente gallerie ferroviarie, stradali, idrauliche.

Le gallerie ferroviarie a doppio binario e quelle autostradali a tre corsie di marcia hanno generalmente una sagoma policentrica con dimensioni di larghezza ed altezza che possono assumere valori elevati e variabili dai 10 ai 15 metri. Le aree di scavo assumono di conseguenza valori di oltre 100 mq, generando enormi quantità di materiale lapideo da abbattere e da trasportare a discarica o, se idonei, da impiegare per la formazione di rilevati o per la produzione di inerti per calcestruzzi o per conglomerati bituminosi. Nelle gallerie idrauliche generalmente i diametri sono modesti e le sezioni spesso circolari.

Le gallerie artificiali vengono costruite a cielo aperto e poi interrate. Oggi le tecnologie di costruzione per queste gallerie sono molto più veloci per l'uso di paratie in cemento armato costituite da diaframmi a sezione rettangolare o da pali circolari a grande diametro accostati. Le fasi lavorative consistono in: 1. realiz-

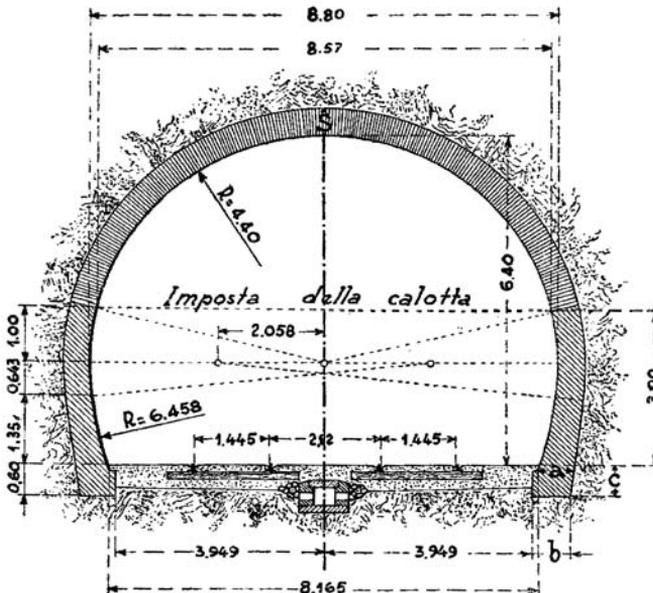


Fig. 1.1 Sezione trasversale galleria ferroviaria.



Fig. 1.2 Galleria artificiale paramassi.



Fig. 1.3 Interramento galleria artificiale.

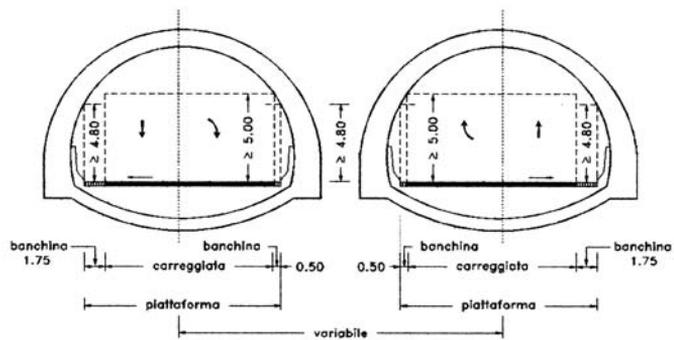


Fig. 1.4 Sezione di una galleria autostradale a doppia canna.

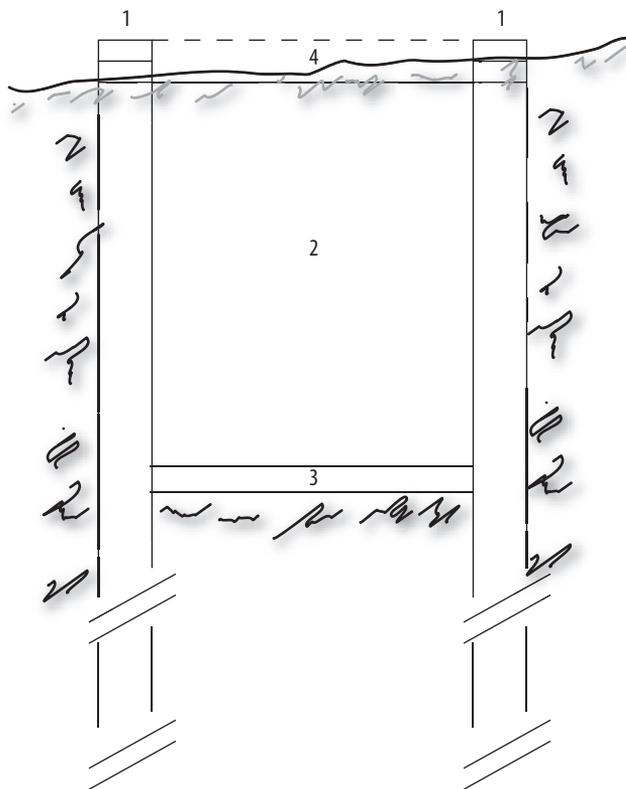


Fig. 1.5 Galleria artificiale con paratie di pali.

zazione della paratia, 2. scavo del nucleo di terra, 3. realizzazione della platea di fondazione e 4. getto successivo della copertura (Fig. 1.5).

Le gallerie per metropolitane urbane hanno generalmente sezione circolare con diametri variabili dai 6 agli 8 metri (Fig. 1.6).

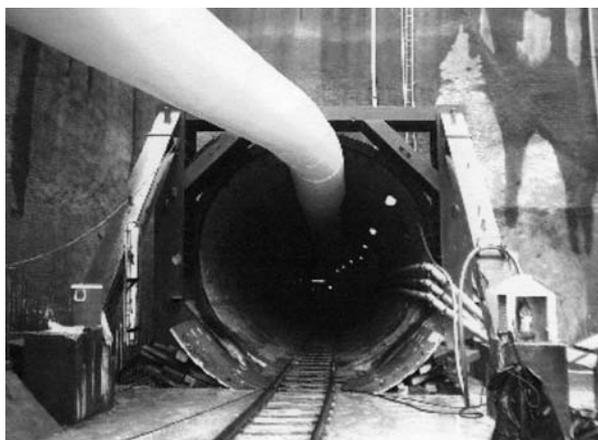


Fig. 1.6 Galleria metropolitana di Caracas – Seli Spa – D (scavo = 5,88 metri).

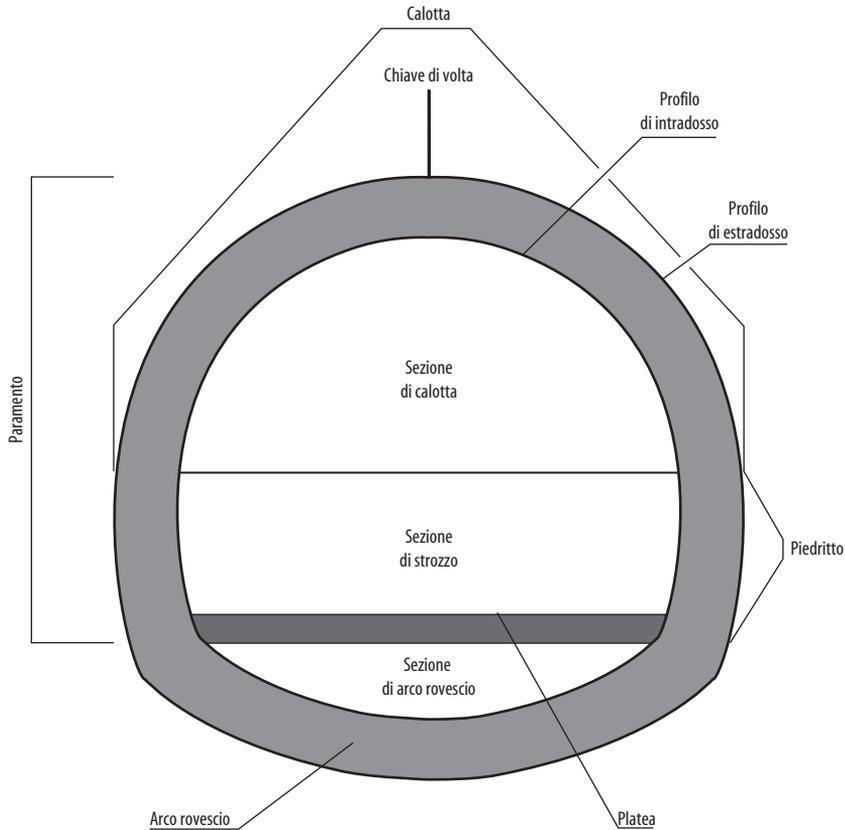


Fig. 1.7 Terminologia.

1.2 Terminologia

La terminologia usata nello scavo di gallerie è quella illustrata nella Fig. 1.7. Si precisa che nel caso in cui gli ammassi rocciosi siano costituiti da rocce compatte ed integre, l'arco rovescio viene sostituito da una semplice platea. L'arco rovescio è sempre necessario in presenza di rocce sciolte coerenti e incoerenti o di rocce spingenti quali le argille e gli scisti argillosi.

1.3 Le rocce e i sistemi di scavo

Una buona conoscenza della mineralogia, della geologia e della geotecnica è indispensabile ad ogni tecnico che si interessi di gallerie per capire la fondamentale connessione che esiste fra le caratteristiche geologiche e geotecniche di un ammasso roccioso che è l'insieme di rocce, acqua e aria, e la costruzione delle gallerie. La geologia studia la genesi delle rocce, la loro composizione mineralogica, la loro struttura e giacitura o disposizione rispetto al nord, mentre la geotecnica ne analizza le caratteristiche fisico-meccaniche, quali ad esempio mo-

dulo di elasticità, resistenza a rottura per compressione, per taglio, pesi specifici, granulometria e vari altri parametri.

Le rocce si dividono in tre grandi gruppi: rocce ignee, metamorfiche e sedimentarie.

Riportiamo nella Tab 1.1 alcune caratteristiche delle più importanti rocce ignee, metamorfiche e sedimentarie.

Tab. 1.1 Tipologie di rocce.

Rocce sedimentarie	Cause di debolezza	Conseguenze
Salgemma	Elevatissima solubilità	Cavernosità, cedimenti nelle rocce soprastanti
Gesso	Alta solubilità	Carsismo con gallerie e cedimenti nelle rocce soprastanti
Anidrite	Modesta solubilità	Carsismo con gallerie e cedimenti nelle rocce soprastanti
Calcarea	Solubile in tempi lunghi per attacco CO ₂ e acqua. Inoltre la stratificazione porta superfici di debolezza	Meno esposto al carsismo dei gessi, ma in tempi lunghi dà luogo a doline, cavità e corsi d'acqua sotterranei. Pericoloso in questi casi per strade, gallerie, edifici
Dolomia	Solubile in tempi lunghi per attacco CO ₂ e acqua. Inoltre la stratificazione porta superfici di debolezza	Meno esposto al carsismo dei gessi, ma in tempi lunghi dà luogo a doline, cavità e corsi d'acqua sotterranei. Pericoloso in questi casi per strade, gallerie, edifici
Calcarei marnosi	Hanno caratteri intermedi con le marne e marne calcaree.	
Selci	Stratificazione accentuata, che le predispone a rari franamenti.	
Arenarie	Se alterate, perdono il cemento calcareo, o argilloso, o siliceo e si trasformano in sabbie	Se argillose e calcaree hanno discreta franosità
Marne	Soprattutto se alterate, si suddividono in scaglie minute e si polverizzano in frammenti	Determinano facilmente frane in presenza di acqua
Argille e argilliti	Sono pseudocoerenti	Determinano facilmente frane anche di grandi dimensioni (colamenti)
Siltiti	Hanno coesione molto ridotta	Determinano facilmente frane anche di grandi dimensioni (colamenti)

Rocce piroclastiche	Cause di debolezza	Conseguenze
Tufi	Hanno elevata porosità, fatto che li espone al gelo, e bassa resistenza alla compressione	
Rocce magmatiche intrusive	Cause di debolezza	Conseguenze
Graniti, sieniti, dioriti	Se alterate, danno luogo a suoli superficiali sabbioso-argillosi	Pericoli per fondazioni, dighe e gallerie se lo spessore della coltre di alterazione non è previsto
Gabbri	Si alterano più facilmente delle altre rocce intrusive	Pericoli per fondazioni, dighe e gallerie se lo spessore della coltre di alterazione non è previsto
Rocce metamorfiche	Cause di debolezza	Conseguenze
Marmi	Più soggetti al carsismo dei calcari	Idem come i calcari
Ardesie	Molto scistose, fragili, alterabili	Franosità elevata, ma resistono negli scavi molto meglio delle argilliti
Lavagne	Molto più deboli delle precedenti	Franosità elevata, ma resistono negli scavi molto meglio delle argilliti
Filladi	Deboli, ma più resistenti delle lavagne, hanno inclusioni di quarzo	Idem; in scavo sono più resistenti delle precedenti
Micascisti	Sono scistososi	Frane frequenti, resistenti negli scavi
Gneiss	Non sono scistososi, ma presentano una bancatura	Sono predisposti alle frane solo se sono presenti intercalazioni ricche di miche
Serpentinoscisti	Molto scistososi; talora contengono amianto	Franosità alta; inquinamento aria e acqua da amianto
Eclogiti	Non scistose. Deboli solo se alterate	
Rocce di faglia	Cause di debolezza	Conseguenze
Brecce di frizione	Possono anche avere punti di debolezza, dove si riduce la cementazione	Frane localizzate
Miloniti	Deboli se non ricementate da quarzo o calcite	Producono in alcune occasioni frane
Cataclasi	Debolissime, pulverulente o scistose	Franose e portatrici di acqua in gallerie

Un sistema semplice per riconoscere in indagini di campagna le rocce è quello di cospargere sul campione prelevato delle gocce di acido cloridrico per capire se nella composizione della roccia vi sia o meno la presenza di carbonato di calcio. Infatti se la goccia schiuma vuol dire che siamo in presenza di carbonato di calcio e quindi la roccia può appartenere soltanto al gruppo delle sedimentarie o delle metamorfiche. Occorre poi scalfire la superficie del campione con l'unghia o con un temperino per saggiarne la durezza e quindi verificare l'esistenza o meno di quarzo che è specifico in linea di massima delle rocce ignee, ed è un minerale che riga o scalfisce un semplice frammento di vetro.

1.4 Rocce ignee o magmatiche

Riportiamo nella Tab. 1.2 la suddivisione delle rocce ignee in funzione della percentuale di silice SiO_2 presente.

Le rocce ignee derivano dal consolidarsi, in ambiente sotterraneo o subaereo, di una massa fluida incandescente denominata magma. Se il consolidamento per raffreddamento di questo magma avviene in ambiente sotterraneo, hanno origine allora le rocce ignee intrusive che si evidenziano in grandiosi ammassi geologici, costituenti spesso delle vere e proprie catene montagnose. Se il consolidamento avviene rapidamente in ambiente subaereo o aereo, hanno origine le rocce ignee effusive che costituiscono delle notevoli distese geologiche, abbastanza spesse, le cosiddette colate laviche, quali quelle che si osservano sui versanti di alcuni vulcani italiani come il Vesuvio e l'Etna. Fra le rocce ignee intrusive, costituite essenzialmente da allumosilicati o silicati di alluminio, sodio, potassio, calcio, magnesio e silice pura, cioè ossido di silicio, che costituisce il quarzo, uno dei minerali più duri, ricordiamo il granito che è presente in misura notevole nelle catene alpine e in Sardegna, caratterizzato dall'associazione

Tab. 1.2 Rocce magmatiche.

Tipo di roccia magmatica	Rocce intrusive	Rocce effusive
Rocce sialiche o acide $\text{SiO}_2 > 65 \%$	Graniti Granodioriti	Lipariti o Rioliti Porfido quarzifero Ossidiane Pomice
Rocce femiche o basiche $\text{SiO}_2 < 52 \%$	Gabbri	Basalti Leucititi
Rocce neutre $\text{SiO}_2 52 - 65 \%$	Dioriti Sieniti Monzoniti	Andesiti Trachiti
Rocce ultrabasiche $\text{SiO}_2 < 45 \%$	Peridotiti	

di quarzo e ortoclasio (allumosilicato di potassio), la sienite, la diorite, mentre fra le rocce ignee effusive ricordiamo il porfido quarzifero, il basalto, la leucite del Vesuvio.

Le rocce ignee, siano esse intrusive che effusive, sono caratterizzate da elevati moduli di elasticità longitudinale e trasversale, E e G, e da una notevole resistenza alle sollecitazioni di compressione, come si evidenzia dalla seguente Tab. 1.3 ove vengono riportate anche le resistenze a compressione di alcune rocce metamorfiche, quali scisti cristallini e gneiss, e di rocce sedimentarie quali tufi, arenarie e travertini.

Un cubetto di granito può presentare una resistenza a rottura a compressione anche di oltre 2000 kg/cmq, un cubetto di sienite circa 1450 kg/cmq, uno di basalto può raggiungere anche valori di 4000 kg/cmq.

Quindi queste rocce caratterizzate da altissimi valori delle resistenze alle sollecitazioni di compressione e di taglio costituiscono, da un punto di vista statico, il meglio che si possa incontrare nello scavo di una galleria, sempre che siano sane, omogenee e non siano state interessate da fortissimi movimenti tettonici. Infatti le rocce ignee sottoposte alle rimarchevoli sollecitazioni meccaniche di movimenti tettonici si frantumano, si spaccano appunto per la loro notevole rigidità, in una tela di fessurazioni, dette litoclasti e diaclasi, nelle quali possono circolare le acque che possono innescare un lentissimo processo di disfacimento chimico fisico. Le acque circolanti nelle fratture di un ammasso granitico possono, quindi, ingenerare un lento processo di argillificazione degli allumosilicati. Nelle cavità createsi si formano sacche di argille plastiche che alcune volte sono state intercettate durante lo scavo di gallerie.

Tab. 1.3 Caratteristiche meccaniche di alcune rocce

Roccia	Rottura a Taglio kg/cmq	Rottura a compressione kg/cmq	Modulo di elasticità longitudinale kg/cmq	Rottura a flessione kg/cmq
Graniti-sieniti	100/150	1600/2400	500.000/600.000	100/240
Dioriti	130/180	1700/3000	800.000/1.200.000	100/200
Basalti	100/150	2500/4000	1.050.000	150/250
Tufi vulcanici	8	30/70		
Tufi calcarei		75		
Scisti cristallini		700		
Gneiss		1100	210.000/970.000	180
Arenarie	10/40	400/1300	25/250	
Travertini		450		

Ma in generale possiamo dire che le rocce ignee intrusive ed effusive garantiscono l'adozione di metodi di scavo a piena sezione di galleria altamente meccanizzati con forti produzioni e con un abbattimento della roccia a mezzo di esplosivi. Si potrebbero abbattere queste rocce anche con frese puntiformi o con frese *full face* cioè a piena sezione di scavo, ma gli elevati costi della macchina, milioni di euro, e gli elevati costi di frequenti sostituzioni degli utensili di taglio, dovuti alla forte abrasività di queste rocce contenenti minerali duri quali il quarzo e i silicati di alluminio, fanno propendere la scelta verso l'abbattimento a mezzo di esplosivi. In sintesi, il sistema di lavoro per le grandi gallerie autostradali e ferroviarie in rocce ignee, si estrinseca nella fase di scavo della galleria a piena sezione mediante l'abbattimento della roccia per mezzo di volate lunghe anche due o tre metri, i cui fori da mina vengono perforati da carri Jumbo a più bracci di perforazione.

L'organizzazione del lavoro si sviluppa praticamente su due cantieri distinti e separati, non interferenti fra loro, posti anche ad un centinaio di metri di distanza: il fronte di scavo ed il fronte di getto. Sul fronte di scavo il carro *Jumbo* effettua la perforazione dei fori da mina che sono centinaia, subito dopo si effettua il caricamento dei fori con candelotti di dinamite gelatinosa, per ogni foro la colonna di candelotti viene interrotta da un candelotto armato con una capsula di detonatore elettrico a tempo munito di due fili elettrici; tutti questi fili vengono infine collegati fra loro onde formare un circuito elettrico continuo, i cui due estremi vengono collegati mediante un cavetto bipolare ad un esploditore elettrico posto a grande distanza. Una volta effettuata la volata, cioè l'esplosione dei fori da mina, si aspetta che i fumi dell'esplosione vengano eliminati dalla ventilazione, per raggiungere subito dopo il fronte di scavo per effettuare un disaggio, cioè una specie di pulizia delle pareti eliminando eventuali massi pericolanti a mezzo bracci meccanici snodabili portanti alle estremità palanchini o utensili metallici specifici. Si effettua lo smarino con grandi pale gommate caricando il materiale su *dumper* e, dopo aver effettuato lo smarino, si procede alla messa in opera di centine metalliche a doppio T, intervallate di un metro e collegate fra loro con catene metalliche. Subito dopo si effettua un prerivestimento a mezzo *spritz-beton* che consiste nel lancio violento contro le pareti dello scavo di una miscela a base di cemento ed acqua con additivi chimici atti ad accelerarne la presa. Tale rivestimento viene effettuato con macchine pneumatiche o pompe azionate da motore elettrico o ad aria compressa.

Prima di effettuare lo *spritz-beton*, alcune volte si pone sulla volta degli scavi una rete elettrosaldata chiodata alle pareti, oppure si associa alle miscele cementizie una certa quantità di fibre metalliche o sintetiche atte a costituire una specie di betoncino armato, per scoraggiare eventuali distacchi di materiale non perfettamente agganciato al corpo dell'ammasso roccioso.

Effettuate queste operazioni, che richiedono almeno due turni di lavoro, si riprende la perforazione del fronte di scavo con carro Jumbo come prima descritto. Ad alcune centinaia di metri di distanza si procede sul fronte di getto al rivestimento definitivo della galleria con calcestruzzo non armato con resistenza caratteristica di 300 - 250 kg/cm² e dello spessore generalmente pari a 50 cm, mediante il posizionamento di casseri metallici assemblati su di un carro porta casseri munito di pistoni idraulici, atti a contenere il getto. Si armano e gettano tratte di lunghezza pari ad 8 metri.

È chiaro che durante il posizionamento dei casseri il traffico veicolare proveniente dal fronte di scavo viene ridotto, per cui occorre organizzare le fasi in modo specifico e puntuale. Generalmente prima di effettuare il rivestimento definitivo della galleria, si pone a contatto delle pareti, rivestite con betoncino, un manto impermeabile atto ad impedire infiltrazioni di acqua nel calcestruzzo, che ne potrebbero rapidamente compromettere le caratteristiche di resistenza meccanica, e che creano fastidiosi gocciolamenti in fase di esercizio sui mezzi transitanti.

In queste tipologie di roccia possiamo avere avanzamenti medi giornalieri di galleria finita dell'ordine di 5 e anche 6 metri, il che presuppone lo smarino di centinaia di mc di roccia e di altrettante centinaia di mc di calcestruzzo da porre in opera. Da questi numeri ci si rende conto dei numerosi problemi di carattere tecnico ed organizzativo che devono essere affrontati dai tecnici preposti, quali:

1. centrale di betonaggio ad alta produzione ed estremamente meccanizzata;
2. autobetoniere idonee a svolgere un servizio continuo su percorsi in sotterraneo;
3. officina attrezzata di uomini e mezzi onde poter effettuare una manutenzione periodica di mezzi meccanici impegnati in terreni fortemente abrasivi;
4. centrale di frantumazione delle rocce provenienti dallo scavo per la produzione e selezione degli inerti per il calcestruzzo;
5. centrale di compressione dell'aria progettata per sopperire a tutte le utenze ubicate lungo il percorso della galleria;
6. centrale elettrica e relative diramazioni atte a fornire l'energia in tutte le zone del cantiere;
7. mezzi meccanici quali dumper, pale meccaniche, escavatori, ruspe, martelli perforatori e demolitori, carri Jumbo di perforazione, argani, pompe, tubazioni, pompe per il getto dei calcestruzzi, pompe per spritz-beton, perfettamente idonei al metodo di scavo applicato;
8. centrale di ventilazione progettata in modo tale che per tutta la durata del lavoro vengano eliminate dal sotterraneo tutte le impurità provenienti dai gas di combustione dei motori a scoppio, dalle polveri, dai fumi dell'esplosione delle volate e da eventuali e, in questo caso, improbabili fughe di gas immagazzinati nell'ammasso roccioso. La ventilazione deve provvedere inol-

tre al raffreddamento dell'aria in sotterraneo surriscaldata dall'aumento del gradiente termico, dal calore sviluppato dalla presa del calcestruzzo, dalla combustione dei motori termici e da altre fonti di energia;

- laboratorio prove munito di tutti gli attrezzi necessari a controllare le resistenze caratteristiche dei materiali usati, a monitorare lo stato di tensione nell'ammasso roccioso, a misurare e controllare il grado di impurità dell'aria in sotterraneo.

Occorre sottolineare il fatto che lo scavo in queste rocce con elevate caratteristiche meccaniche risulta molto facile, considerato che si può addirittura evitare ogni sostegno provvisorio delle pareti dello scavo. Infatti nello scavo della galleria dello scarico di fondo della diga di Pattada (SS), che si sviluppava in un ammasso granitico compatto, si realizzò prima tutto lo scavo della galleria con abbattimento a mezzo esplosivo, senza apporre alcuna armatura provvisoria, e poi si realizzò il rivestimento definitivo. Soltanto il disgiungimento delle pareti doveva essere molto accurato per staccare dei massi o cunei di roccia pericolanti e lesionati dalle vibrazioni dell'esplosione. Cosa che si sarebbe potuto evitare con un pretaglio o *pre-splettling* da realizzare con l'esplosione simultanea di fori perimetrali, posti ad interasse di 20 cm e caricati solo con miccia detonante, che avrebbero isolato dalle rocce retrostanti il nucleo centrale dello scavo ove realizzare la volata vera e propria.



Fig. 1.8 Galleria scarico di fondo – diga di Pattada.