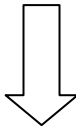


Aspetti geologico-tecnici da affrontare nelle fasi di progettazione/costruzione delle

GALLERIE

Pro parte da Scesi L., Papini M., Gattinoni P.: Geologia applicata[volume 2] Applicazione ai progetti di ingegneria civile

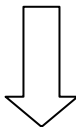
- Analisi della geologia a livello regionale (anche foto aeree)
- Censimento dati disponibili



Scelta “corridoio” o possibili tracciati

lungo questi:

- Rilevamento geologico di dettaglio
- Perforazioni (in punti idonei, max 300-400 m, fino a qualche decina di m sotto la quota “ferro”, rotazione con car. cont., prelievo campioni indisturbati x indagini lab., attrezzati a piezometro e/o per altre prove)
- Geofisica (geoelettrica o sismica, utile x copertura, alterazioni, fatturazioni)



Scelta tracciato più conveniente (non sempre il più breve!)

Progetto esecutivo:

- rilievo geologico di dettaglio (profilo geologico-tecnico longitudinale e sezioni trasversali)
- altre perforazioni
- altra geofisica

- Scelta tracciato
- Scelta sagoma
- Scelta rivestimento
- Scelta metodo di scavo

Evitare spinte dissimmetriche (es. fianco di un versante)

Stabilità imbocco

Importanza giacitura rocce stratificate

Importanza pieghe (A: colpi di montagna! S: accumuli idrici) e faglie

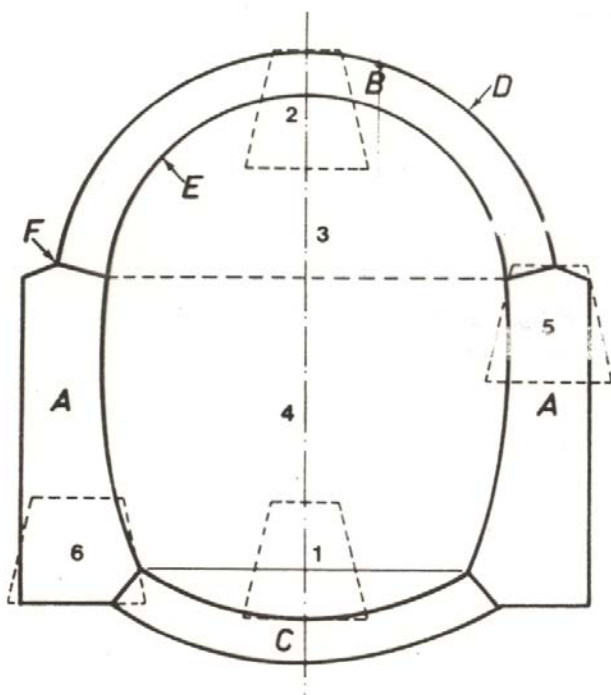
Idrogeologia:

- Tipo e grado permeabilità
- Presenza/assenza di falda
- Quota falda (acqua gravifica, in falda, falda sotto)
- Chimismo falda (acque selenitose)
- Complessi idrogeologici a diversa K lungo il tracciato
- Attenzione depauperamento falda!

Studio idrogeologico: censimento punti d'acqua, piezometri nei fori di sondaggio, studio di P, bilancio idrogeologico.

Presenza di gas (metano: $\text{CH}_4 \Rightarrow$ grisou, CO_2)

Temperature (alta prof. e/o elevato grad. geotermico: Sempione, Campi F.)



Terminologia delle diverse parti di una galleria: A, piedritti; B, rivestimento di calotta; C, arco rovescio; D, profilo di estradosso; E, profilo di intradosso; F, imposta di calotta; 1, cunicolo di base centrale; 2, cunicolo di sommità o di calotta; 3, sezione di calotta; 4, strozzo; 5, cunicolo d'imposta di calotta; 6, cunicolo di base laterale

Problematiche geologiche riscontrabili durante l'esecuzione di una galleria

Tali problematiche sono connesse ai seguenti elementi.

- **Natura litologica e assetto geologico-strutturale**
- **Morfologia**
- **Idrogeologia**
- **Reperimento di gas**
- **Rinvenimento di acque aggressive**
- **Rinvenimento di materiale rigonfiante**

NATURA LITOLOGICA E ASSETTO GEOLOGICO-STRUTTURALE

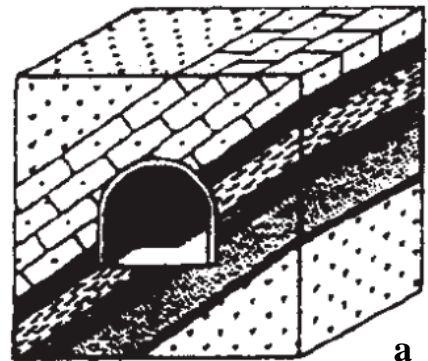
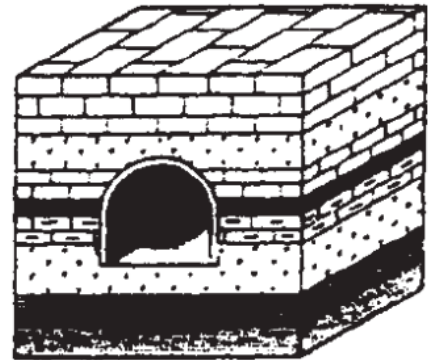
Terreni sciolti: situazione gravosa (dipende da coesione, attrito e presenza di acqua). Se si tratta di terreni coesivi o di rocce rigonfianti o spingenti o rocce sottoposte a elevati carichi litostatici, si possono avere fenomeni di convergenza del cavo. In corrispondenza del fronte di scavo si possono avere deformazioni di tipo duttile con "estrusione" del fronte stesso, cioè con fuoriuscita di materiale dal fronte di scavo a causa della scarsa rigidità del nucleo di avanzamento in relazione ai carichi agenti.

Materiali lapidei: le problematiche geologiche dipendono da natura litologica e stato di fratturazione. Casi che si possono presentare:

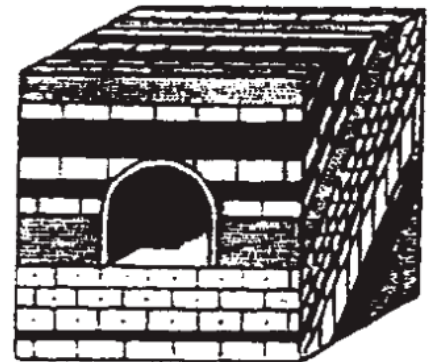
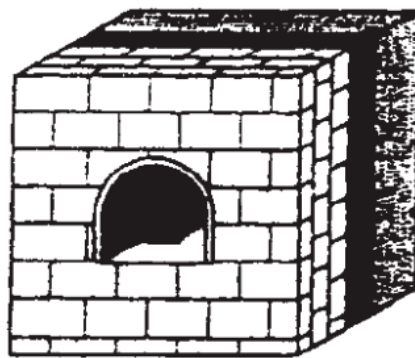
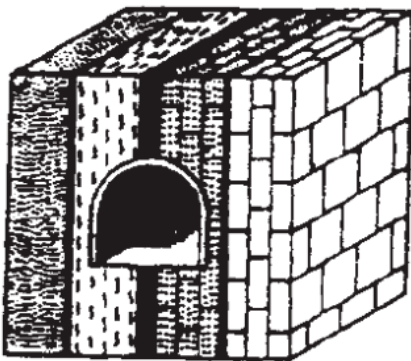
- **rocce massive** (ad esempio rocce magmatiche), poco fratturate: condizione favorevole allo scavo;
- **ammassi stratificati e/o fratturati:** la stabilità del cavo dipende da spessore degli strati, loro orientazione rispetto all'asse della galleria e caratteristiche strutturali della roccia.

Per quanto riguarda la stratificazione

- **Strati orizzontali:** se lo spessore è elevato, il comportamento è analogo a quello di ammassi non stratificati; se lo spessore è ridotto saranno frequenti episodi di instabilità in calotta, per flessione e rottura di strati incapaci di autosostenersi e quindi destinati al crollo.
- **Strati inclinati:** le condizioni di equilibrio variano in funzione della direzione dell'asse della galleria rispetto all'orientazione degli strati.
 - a. Galleria parallela alla direzione degli strati (*galleria in direzione*): sui paramenti spinte laterali dissimmetriche e costanti in senso longitudinale; problemi in caso di inclinazione degli strati superiore ai 45°;
 - b. Galleria perpendicolare alla direzione degli strati (*galleria traversobanco*): al contorno della galleria carichi simmetrici, mentre in senso longitudinale si avrà una variazione di resistenza in funzione della natura e dello spessore degli strati di volta in volta intercettati.
 - c. Galleria che taglia "in obliquo" strati inclinati: situazione intermedia fra le due precedenti.
- **Strati subverticali:** condizioni favorevoli se la galleria è perpendicolare alla direzione degli strati (*effetto trave*). Con il diminuire dell'angolo formato dalla direzione della galleria con la stratificazione le condizioni diverranno sempre più sfavorevoli, con strati la cui portanza è affidata unicamente alla resistenza al taglio presente lungo i giunti.



a

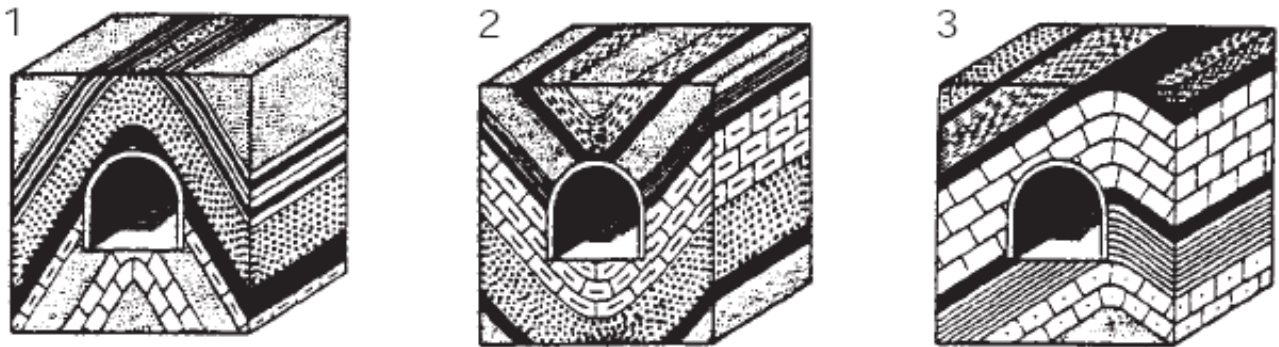


b

Per quanto riguarda l'assetto tettonico

- **Pieghe:** ospitano tensioni residue di varia entità; in particolare si avranno sforzi di compressione in corrispondenza del nucleo e di trazione nella cerniera. Se le pieghe sono situate a grande profondità, gli sforzi tensionali in gioco sono elevati e si può avere la brusca e violenta proiezione all'interno del cavo di blocchi di roccia contigui alla cavità (*colpo di montagna*).
Sinclinale: forti spinte laterali sui fianchi e venute d'acqua
Anticlinale: modesti rilasci e crolli in calotta
Fianco di una piega: pressioni dissimmetriche
- **Faglie:** le rocce sono più o meno *cataclosate*, le condizioni di autoportanza sono scarse o nulle. Il materiale può arrivare ad avere un comportamento assimilabile a quello di un materiale sciolto. Inoltre le faglie costituiscono vie preferenziali per le acque sotterranee e per i gas, pertanto in galleria è possibile il reperimento di venute d'acqua di ingente portata o di gas nocivi.

Sovraccorrimenti: **problematiche analoghe a quelle delle faglie; in questo caso il basso angolo di inclinazione dell'elemento tettonico comporterà il reperimento di materiale scadente alla quota di scavo per tratte di particolare lunghezza.**



PROBLEMATICHE GEOMORFOLOGICHE

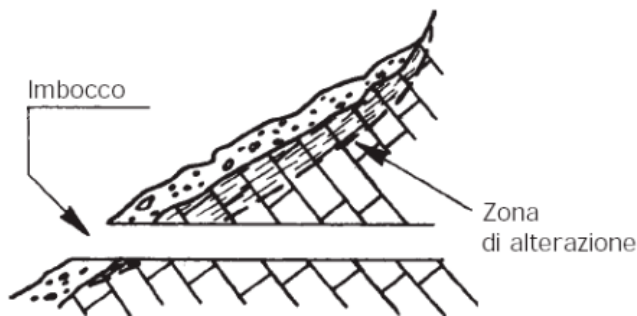
Gallerie superficiali: coperture costantemente ridotte, mai superiori a qualche diametro di galleria (da 5-10 fino a 60 m di profondità). L'equilibrio delle pareti è influenzato dalla ridotta copertura in gioco e dalla conseguente presenza di materiali sciolti. Inoltre, si ha l'influenza degli aspetti meteorici e della permeabilità dei materiali con cospicue venute d'acqua con conseguente alterazione delle rocce

Gallerie parietali: si sviluppano all'interno di un fianco vallivo con andamento trasversale allo stesso, mantenendo condizioni di copertura particolarmente ridotte (qualche metro al massimo) in corrispondenza del paramento di valle.

Le problematiche connesse sono le medesime delle gallerie superficiali, con in più la presenza di carichi dissimmetrici.

Gallerie profonde: coperture dell'ordine di qualche centinaio di metri o, addirittura, del migliaio di metri. Problematiche:

- convergenze elevate alla quota di scavo con fenomeni di plasticizzazione anche in materiali rocciosi originariamente resistenti;
- bruschi detensionamenti negli ammassi rocciosi con conseguente possibile violenta proiezione di materiale in galleria (*colpo di montagna*);
- elevate temperature: a parte i primi 20-25 m di profondità, influenzati dalla temperatura esterna, la



temperatura aumenta con la profondità; tale aumento è mediamente dell'ordine di un grado ogni 30 m di profondità (alte profondità: es. Sempione). Tale gradiente geotermico può subire delle variazioni: aumenta laddove si hanno bacini magmatici vulcanici o acque termali (Campi Flegrei) e diminuisce in presenza di acque sotterranee

PROBLEMATICHE IDROGEOLOGICHE

Il rinvenimento di acqua sotterranea durante gli scavi di una galleria è un'evenienza molto frequente. Fattori che favoriscono i rifluimenti idrici in galleria:

- presenza di materiale dotato di elevata permeabilità (terreni granulari, rocce permeabili per porosità o per fratturazione), di bruschi cambi di permeabilità, di dislocazioni tettoniche fortemente alimentate, di corpi soggetti a fenomeni carsici, di sinclinali, di alvei sepolti, di faglie, di sovrascorrimenti ecc.;
- interazione fra quota della galleria e falda idrica. Se la galleria si trova al di sopra della falda, le problematiche sono molto ridotte. Solo in presenza di ammassi rocciosi carsificati si possono avere venute d'acqua di ingente portata anche al di sopra della superficie piezometrica. Se invece la galleria si snoda al di sotto della falda gli afflussi idrici possono diventare così rilevanti da rendere difficile l'avanzamento.

PROBLEMATICHE CONNESSE AL REPERIMENTO DI GAS (metano: $CH_4 \Rightarrow$ *grisou*, CO_2)

Il reperimento di gas durante gli scavi può dare origine a situazioni particolarmente rischiose per l'incolumità delle maestranze, soprattutto se il gas è in pressione. La presenza di gas dipende da:

- natura litologica delle formazioni intercettate;
- presenza di fratture beanti.

PROBLEMATICHE CONNESSE AL RINVENIMENTO DI ACQUE AGGRESSIVE

Durante gli scavi di una galleria è possibile intercettare acque in grado di aggredire chimicamente i calcestruzzi (pH minore di 6,5) e quindi, il disfacimento del rivestimento definitivo dell'opera. Il loro rinvenimento dipende dai caratteri litologici delle formazioni attraversate dalle acque che raggiungono la galleria.

PROBLEMATICHE CONNESSE AL RINVENIMENTO DI MATERIALI RIGONFIANTI

Si tratta di materiali che, una volta privati del loro naturale confinamento, a seguito dell'apertura della cavità, tendono ad aumentare significativamente di volume. Ciò avviene a seguito di fenomeni di adsorbimento di acqua, anche sotto forma di umidità presente nell'aria.

I materiali rigonfianti più diffusi sono quelli che contengono i minerali del gruppo delle smectiti, in misura minore delle illiti e, in toni ancora più sfumati, delle caoliniti.

I problemi da questi provocati sono piuttosto simili a quelli dei materiali spingenti (le due condizioni possono peraltro coesistere): i relativi fenomeni di instabilità, che variano di entità, si manifestano attraverso una progressiva chiusura delle pareti di scavo.

METODI DI SCAVO

SCAVO MECCANICO

Mezzi meccanici tradizionali

- **pale meccaniche**, riservate a materiali incoerenti o debolmente coerenti
- **"rippers"**, il cui braccio termina con un tagliente appuntito, particolarmente adatto ai terreni coesivi;
- **martelli demolitori** (detti anche "martelloni"), capaci di abbattere rocce aventi caratteristiche scadenti ed utilizzati anche per correggere la profilatura di scavo dopo l'abbattimento con esplosivo.

Mezzi meccanici non tradizionali

- **frese**: per materiale roccioso con caratteristiche meccaniche da medie a elevate. Si dividono in:
 - a. **frese ad attacco puntuale**: versatili, poco ingombranti; il metodo di scavo è abbastanza lento, ma consente lo scavo di sezioni di qualsiasi forma e dimensione purché non superiore a 30 m²;
 - b. **frese ad attacco integrale**: poco versatili, sono costituite da una testa rotante, avente diametro pari a quello della galleria. È necessario un buon grado di stabilità dell'ammasso roccioso per consentire l'avanzamento della fresa. Alla fresa è collegato un nastro trasportatore avente la funzione di convogliare i detriti dal fronte al retro della macchina e quindi ai mezzi di sgombero.
- **scudi**: utilizzati per terreni sciolti o rocce così fratturate da avere un comportamento ad essi assimilabili. Si compongono di una camicia esterna sulla cui parte anteriore è collocato il sistema di scavo. Gli scudi si dividono in:
 - a. **scudi aperti**: simili a delle frese collocate all'interno di un grosso cilindro la cui funzione è essenzialmente quella di proteggere lo scavo da possibili distacchi localizzati;
 - b. **scudi chiusi o a pressione**: effettuano lo scavo del terreno mediante una testa di taglio a fronte chiuso, ovvero in cui non esiste alcuna comunicazione tra il fronte di scavo e l'interno della galleria. La stabilità del fronte, in tal caso, è garantita mediante la pressione esercitata dallo scudo chiuso sul fronte stesso.

SCAVO MEDIANTE ESPLOSIVO



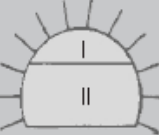
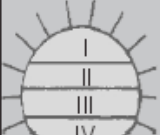
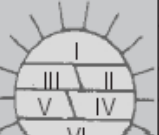

Lo scavo mediante esplosivo prevede, in primo luogo, la realizzazione di un certo numero di fori da mina all'interno del fronte di scavo da abbattere.

Tali fori vengono, di norma, realizzati utilizzando speciali mezzi, denominati **jumbo** che ospitano una serie di perforatrici provviste di aste metalliche ("fioretti") attrezzate all'estremità con idonei taglienti. Nei fori così realizzati vengono inserite le mine, il cui insieme costituisce la cosiddetta **"volata"**.

Le stesse mine vengono fatte brillare contemporaneamente o in fasi successive distanziate fra loro di pochi millisecondi.

La lunghezza dei fori da mina e la quantità di esplosivo utilizzata sono direttamente proporzionali alla qualità geomeccanica del mezzo.

Metodologie di avanzamento

Classi di roccia	I da stabile a leggermente friabile	II molto friabile	III da franoso a molto franoso	IV spingente	Va molto spingente	Vb materiale sciolto
Caratteristiche	Materiale compatto, fessurazione da leggera a media	Suddivisione accentuata per stratificazione e fratturazione; le singole fessure sono piene di materiale argilloso	Elevato grado di suddivisione per stratificazione e fratturazione in più piani; le fessure risultano piene di materiali argillosi	Roccia molto alterata; ripiegata e scistosa; fasci di faglie; materiale sciolto ben consolidato, coerente	Materiale completamente milonizzato e alterato, ridotto a ghiaietto, sciolto non consolidato, leggermente coerente	Materiale sciolto, incoerente
Comportamento	La resistenza della roccia alla compressione uniaxiale σ_{gd} è maggiore della tensione tangenziale σ_t ; condizioni di equilibrio permanente assicurato da: misure di protezione locale	rinforzo dell'anello di roccia portante in calotta	Il limite di resistenza della roccia viene raggiunto e superato al contorno della sezione. Sono necessari sostegni e la creazione di un anello di roccia portante	Le tensioni tangenziali superano la resistenza della roccia. Il materiale, a comportamento plastico, tende verso la cavità riducendone la sezione; fenomeno di intensità: media	forte	Vedi classe Va
Influenza dell'acqua	Nessuna	Irrelevante	Prevalentemente sul materiale contenuto nelle fratture	Discreta	Anche forte (il materiale tende a imbibirsi)	
Scavo	A piena sezione 	A piena sezione 	Calotta e strozzo 	A sezioni parziali I - IV 	A sezioni parziali I - VI 	A sezioni parziali I - VI 

SCAVO A FORO CIECO

Si realizza quando le rocce e/o i terreni inglobano completamente la sagoma della galleria appena scavata. I più moderni metodi prevedono

- **Avanzamento a piena sezione**

Viene adottato in presenza di situazioni geologiche particolarmente favorevoli o dopo opportuni preconsolidamenti.

L'avanzamento a piena sezione prevede una fase di abbattimento del materiale con piano di scavo coincidente con la base dei piedritti, a cui segue, a breve distanza dal fronte, lo scavo e il getto delle murette (strutture di raccordo tra piedritto e arco rovescio) e dell'arco rovescio.

Più le condizioni geomeccaniche saranno gravose, più lo stesso arco rovescio andrà realizzato vicino al fronte di scavo e in tempi brevi. Da ultimo andrà eseguito il getto di rivestimento della calotta.

- **Avanzamento a sezione parzializzata**

Prevede, dopo gli eventuali preconsolidamenti, l'abbattimento del fronte con piano di scavo di poco più elevato rispetto al piano dei centri. Dopo l'applicazione del rivestimento di prima fase si passa alla fase di ribasso: scavo di strozzo, scavo e getto delle murette. Piuttosto distanziato dal fronte di avanzamento viene infine eseguito lo scavo e il getto dell'arco rovescio, lasciando, da ultimo, la realizzazione del getto di rivestimento di calotta. Solo in alcuni casi, quest'ultima operazione può precedere la fase di ribasso, che viene realizzata per sottomurazione.

SCAVO A CIELO APERTO

La realizzazione della galleria in questo caso è caratterizzata dal preliminare scavo di una trincea, da una successiva fase di esecuzione delle opere strutturali, a cui può far seguito una terza fase di ricopertura completa dell'opera stessa. Lo scavo a cielo aperto viene in genere utilizzato per la realizzazione di gallerie urbane o per le gallerie artificiali (paramassi, paravalanghe ecc).

Tecniche costruttive

La realizzazione di una galleria può sostanzialmente suddividersi nelle seguenti differenti fasi costruttive:

a. **Interventi di preconsolidamento**

b. Quando necessari, sono finalizzati a migliorare le qualità meccaniche dei materiali da attraversare, consentendo loro di manifestare condizioni di equilibrio all'apertura della cavità. Tali interventi, dovendo interessare l'ammasso oltre il fronte di scavo, vengono realizzati in avanzamento, anche se, alcune volte, quando le condizioni morfologiche lo consentono, vengono eseguiti direttamente dalla superficie topografica. In considerazione delle problematiche esistenti, i trattamenti possono interessare la sola zona di calotta oppure anche lo stesso fronte di scavo. Le tecniche di preconsolidamento maggiormente utilizzate sono le *iniezioni* di miscele cementizie e/o chimiche, il *jet-grouting*, la *chiodatura* del fronte mediante tubi in vetroresina eventualmente valvolati, ecc..

c. Inoltre, i drenaggi e la realizzazione di un ombrello di infilaggi metallici sul fronte di scavo, hanno una funzione di presostenere il cavo della galleria.

d. Qualora la realizzazione dell'opera sia preceduta dallo scavo di un foro pilota, si ricorre frequentemente a interventi di consolidamento radiale da cunicolo, generalmente mediante tubi in vetroresina eventualmente valvolati e iniettati, le cui parti contenute entro la sagoma della futura galleria sono facilmente removibili in sede di allargo.

e. **Scavo**

f. Prevede la scelta del più idoneo mezzo di abbattimento del fronte, in funzione delle caratteristiche del materiale e del metodo di avanzamento.

g. Una volta demolito il nucleo viene allontanato dal fronte il materiale di risulta ("smarino").

h. **Consolidamenti radiali al contorno della cavità**

i. Consistono nella messa in opera di bulloni, iniezioni o, assai più raramente, tecniche di congelamento, laddove si hanno terreni in falda, al fine di garantire la stabilità dello scavo già effettuato.

j. **Rivestimento provvisorio o di prima fase**

k. Finalizzato al conseguimento di condizioni di equilibrio a breve termine della cavità, è generalmente realizzato mediante calcestruzzo proiettato ("spritz-beton") eventualmente armato con rete elettrosaldata o rinforzato con fibre in acciaio e, in presenza di condizioni particolarmente gravose, ulteriormente armato con *centine*.

l. **Impermeabilizzazione della galleria**

m. Consiste nell'applicazione sulle pareti di scavo di un manto in P.V.C.

n. **Rivestimento definitivo o di seconda fase**

o. Getto di calcestruzzo eventualmente armato lungo le pareti della cavità, di spessore variabile in funzione delle condizioni geomeccaniche esistenti e generalmente compreso tra 30 (situazioni particolarmente buone) e 120 cm (situazioni eccezionalmente scadenti).