

# APPUNTI DI GEOLOGIA APPLICATA

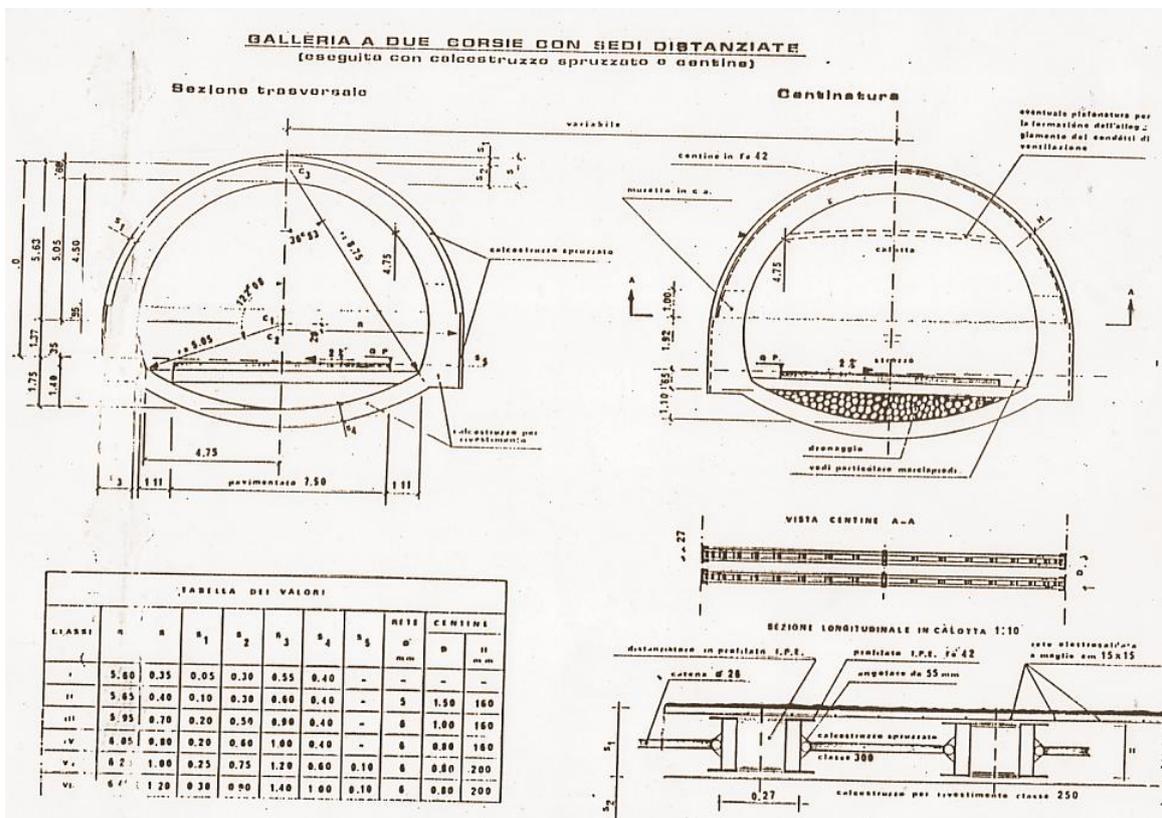
## Capitolo 5 LE GALLERIE

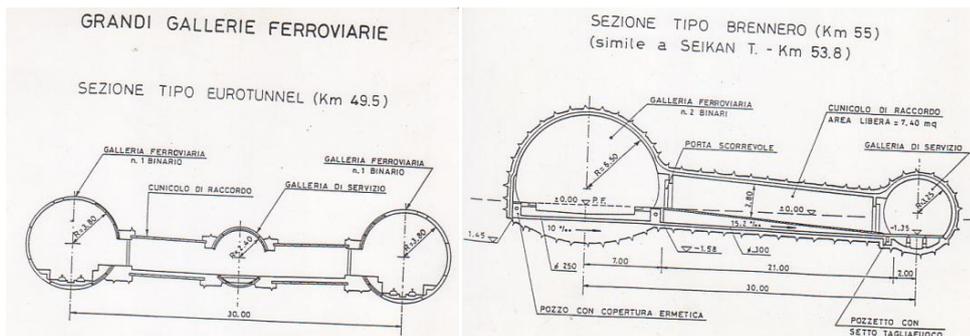
A Cura di V. Francani e C. Rampolla

### LA GEOLOGIA DELLE GALLERIE

Nell'urbanistica e nella pianificazione territoriale, l'utilizzo di spazi nel sottosuolo è diventato di interesse notevole. Si sono discussi e spesso realizzati importanti progetti (metropolitane di Milano e Roma, parcheggi sotterranei fino a 15-20 m di profondità, incanalamento di corsi d'acqua ecc.) che permettono di utilizzare al meglio questa nuova risorsa. La figura successiva mostra una galleria stradale di ampie dimensioni (la larghezza è di circa 8 m).

Le deformazioni del terreno circostante allo scavo interessano volumi tanto più ampi, quanto maggiori sono quelli scavati. Occorre quindi che questi progetti siano promossi con conoscenza di causa, per le notevoli ripercussioni che essi possono avere sull'ambiente, tenendo anche presente il fatto che esistono notevoli margini di incertezza e problemi costruttivi, legati alla natura geologica del territorio, dai quali, se non accuratamente valutati, possono nascere conseguenze gravi e costose.





Nella figura a fianco è rappresentata una galleria ferroviaria. Si notino le grandi dimensioni del vano scavato nella roccia.

## 1. Le indagini per la scelta del tracciato

Un ruolo molto importante nella funzionalità della galleria è rivestito dalla scelta del tracciato in sotterraneo e degli imbocchi. Sono soprattutto questi ultimi a presentare problemi, in quanto da un lato devono essere sempre sicuri da dissesti, costituendo un punto di transito obbligato, e dall'altro risultano in molte circostanze costituiti da terreni poco stabili e da rocce fortemente alterate.

### 1.1. Scelta preliminare

La scelta preliminare del tracciato della galleria viene quindi compiuta in base all'esame diretto sul terreno delle caratteristiche degli imbocchi, in modo da controllarne la stabilità e le problematiche di scavo, e sulla base di un'accurata bibliografia, comprendente fotografie aeree e cartografie geologiche già pubblicate dell'area interessata dall'opera. Questa documentazione generalmente non è di buon dettaglio (il più delle volte è a scala 1/100.000). Sulla base di questi elementi è possibile tuttavia fissare il tracciato di massima.

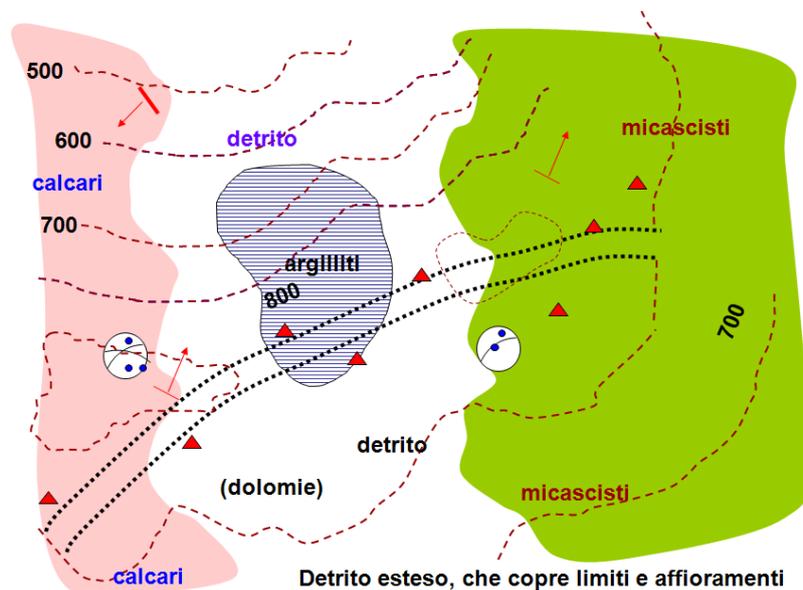
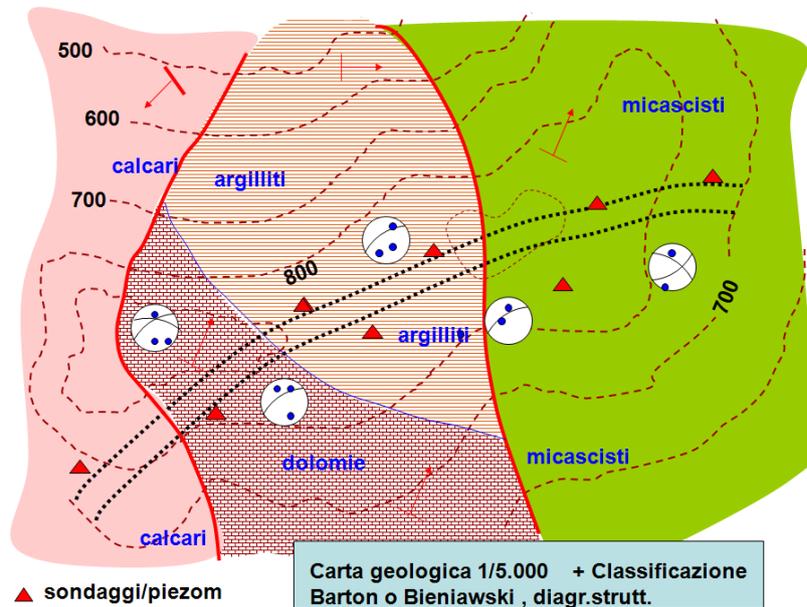
### 1.2. Analisi del tracciato di massima

Una volta identificato il tracciato più idoneo, questo deve essere sottoposto ad attenta verifica: lo studio geologico dovrà indicare le più idonee metodologie di scavo e di rivestimento, segnalare i tratti nei quali si potranno avere situazioni di crisi, per debolezza della roccia o per venute d'acqua, ed evidenziare i possibili rimedi. A tal fine è sempre necessario procedere a prospezioni geognostiche. Anzitutto si rende necessario un rilevamento geologico e idrogeologico (scala 1:10.000 o 1:25.000) lungo le principali direttrici, con raccolta dei dati stratigrafici, piezometrici, di portata delle sorgenti e tracciamento delle linee isopiezometriche, dove necessario. E' importante in questa fase accertare se la galleria interseca o meno la falda e se incontra zone di frattura che possono portare acque in pressione all'interno dello scavo. Il rilevamento geologico sarà accompagnato da rilievi geomeccanici di dettaglio per la valutazione dello stato di fratturazione degli ammassi rocciosi e della loro qualità, con analisi dei diagrammi strutturali e raccolta di campioni per l'esecuzione delle prove tradizionali (RQD, ecc.). A questo faranno seguito:

- Studio geomorfologico  $\Rightarrow$  individuazione di eventuali dissesti
- Sondaggi meccanici (pochi a profondità superiore ai 50m) con recupero campioni per RQD e prove Lugeon (k della roccia)
- Studi geofisici per l'accertamento delle velocità sismiche ( stato generale di fratturazione e alterazione della roccia ) ; prove down-hole e cross-hole. In alcune condizioni geologiche si utilizza la geoletrica (imbocchi, zone di scarsa profondità della galleria, in specie dove c'è rilevante contrasto di resistività roccia-detrito, per valutare la copertura detritica)

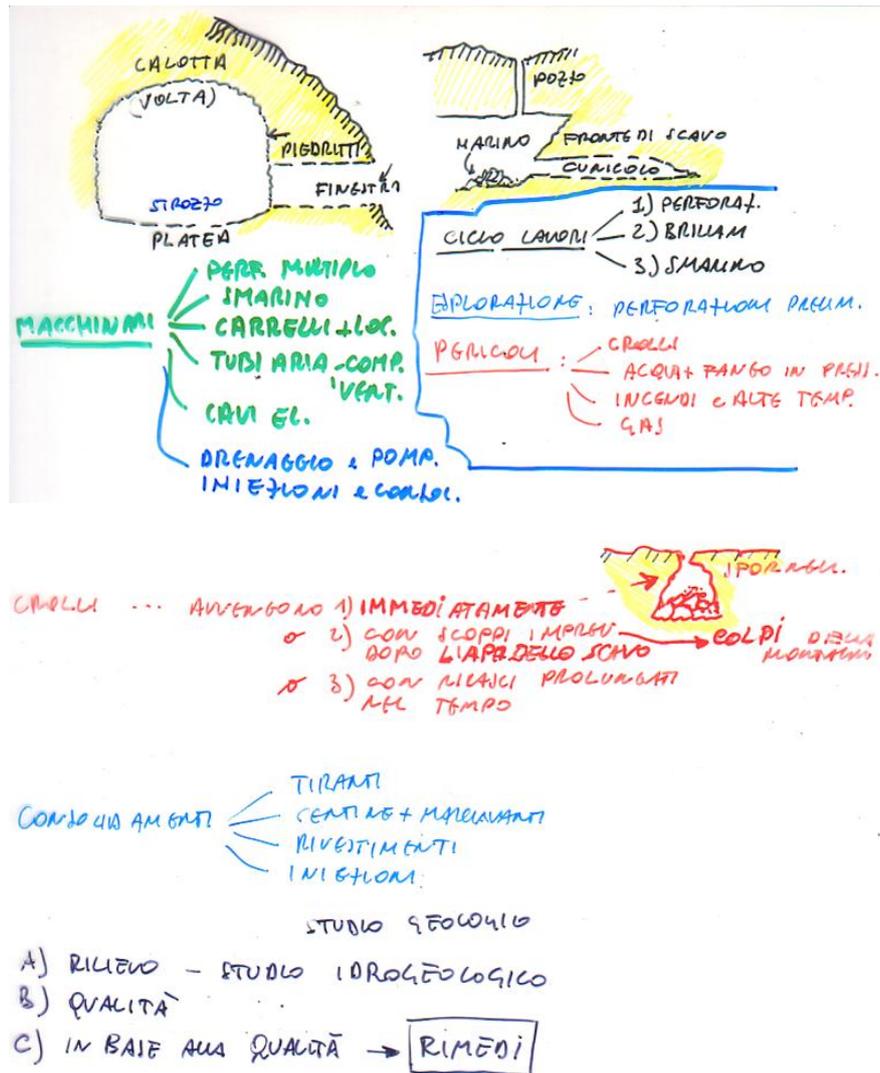
d) Studio climatico, bilancio idrico per valutare l'infiltrazione e quindi l'entità della circolazione idrica sotterranea.

Sulla base dei risultati, viene realizzata una sezione longitudinale di previsione, che indica la tipologia della roccia incontrata e, per ciascun tratto, la classe qualitativa di appartenenza, le venute d'acqua e tutte le altre notizie utili per la scelta della tecnica di scavo.



## 2. Problematiche geologiche riscontrabili durante l'esecuzione di una galleria

In sede progettuale, lo studio geologico è destinato a valutare i tratti critici e a prevederne l'estensione, consentendo un dimensionamento dei costi dei tracciati disponibili, così da scegliere il tracciato più idoneo e prevenire, nel contempo, i rischi evidenziati. I principali problemi geologici sono riassunti nella figura seguente.



Le principali problematiche sono quelle relative alle distribuzioni delle pressioni sul cavo. L'andamento delle pressioni dei terreni differisce, infatti, da quello dei carichi idraulici: le spinte verticali sono in genere più elevate di quelle orizzontali (rapporto 3 a 1) secondo che ci si trovi in gallerie parietali (molto vicine al suolo), superficiali o profonde (più di 60 m dal piano campagna). L'andamento nel tempo delle pressioni deve essere prima valutato, sulla base dei dati noti o degli scavi di assaggio effettuati, poi (una volta aperto lo scavo) misurati tramite idonei strumenti: infatti, un progressivo aumento delle pressioni dopo lo scavo indica una pericolosa tendenza al franamento. Molte delle problematiche interessanti le gallerie, sono connesse a: litologia e assetto strutturale, geomorfologia, idrogeologia, presenza di gas e di acque aggressive, presenza di materiale rigonfiante.

## 2.1 Problemi connessi con la litologia e la giacitura delle discontinuità

Una galleria può essere scavata in terreno sciolto o in materiali lapidei, incontrando problematiche molto differenziate secondo la litologia, la giacitura delle rocce e il loro stato di fratturazione.

I **TERRENI SCIOLTI** costituiscono la 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 ad 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.

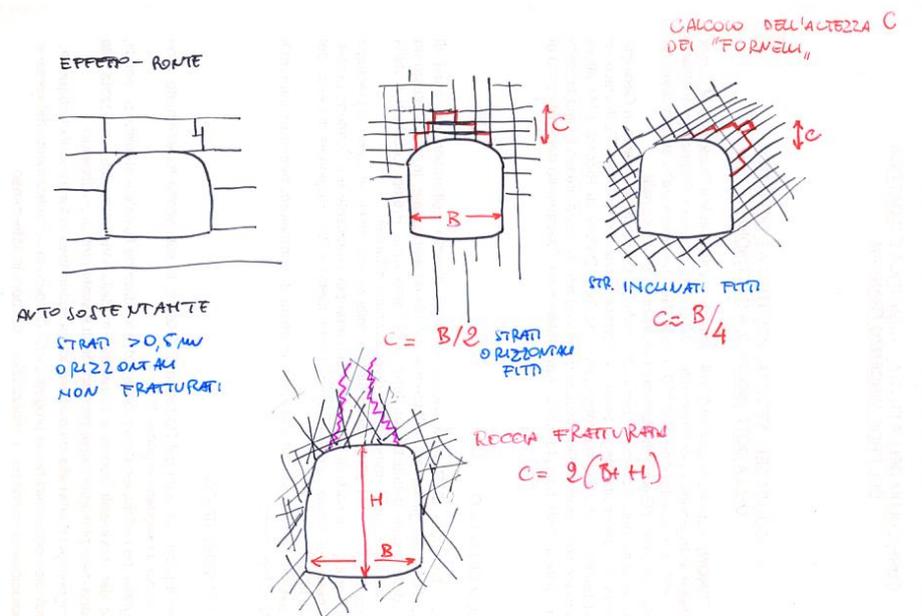
Se, invece, lo scavo interessa **MATERIALI LAPIDEI**, le problematiche geologiche dipendono da natura litologica e stato di fratturazione. Casi che si possono presentare:

- rocce massive (ad esempio rocce magmatiche), poco fratturate  $\Rightarrow$  condizione favorevole allo scavo;
- ammassi stratificati e/o fratturati  $\Rightarrow$  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**  $\Rightarrow$  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**  $\Rightarrow$  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*)  $\Rightarrow$  sui paramenti spinte laterali dissimmetriche e costanti in senso longitudinale; problemi in caso di inclinazione degli strati  $>$  di  $45^\circ$
  - b. galleria perpendicolare alla direzione degli strati (*galleria traversobanco*)  $\Rightarrow$  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  $\Rightarrow$  situazione intermedia fra le due precedenti
- **STRATI SUBVERTICALI**  $\Rightarrow$  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

La figura, tratta da Desio A.(1971), mostra come le gallerie possano incontrare diverse giaciture di strati i quali, tendendo a scendere verso il cavo, possono determinare spinte orientate sulle pareti e sulla calotta della galleria.



Per quanto riguarda l'assetto tettonico:

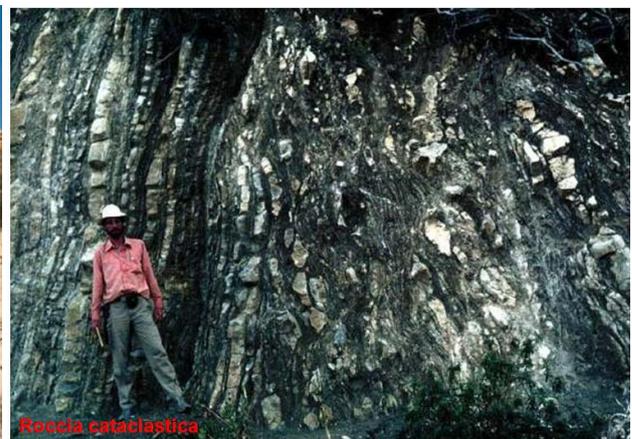
- **PIEGHE**  $\Rightarrow$  ospitano tensioni residue di varia entità; in particolare si avranno sforzi di compressione in corrispondenza del nucleo e di trazione nella cerniera. Se le pieghe sono situate a grande profondità, gli sforzi tensionali in gioco sono elevati e si può avere la brusca e violenta proiezione all'interno del cavo di blocchi di roccia contigui alla cavità (*colpo di montagna*).

Sinclinale  $\Rightarrow$  forti spinte laterali sui fianchi e venute d'acqua

Anticlinale  $\Rightarrow$  modesti rilasci e crolli in calotta

Fianco di una piega  $\Rightarrow$  pressioni dissimetriche

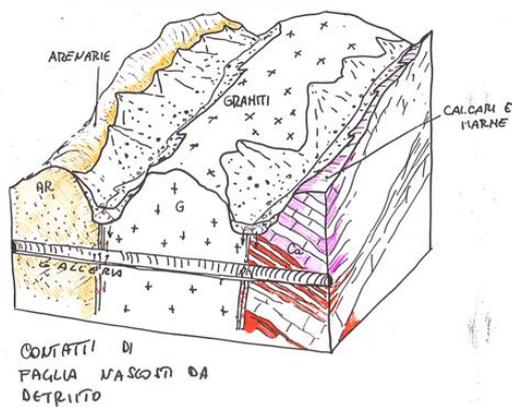
- **FAGLIE**  $\Rightarrow$  le rocce sono più o meno cataclastate  $\Rightarrow$  le condizioni di autoportanza sono scarse o nulle. Il materiale può arrivare ad avere un comportamento assimilabile a quello di un materiale sciolto. Inoltre, le faglie costituiscono vie preferenziali per le acque sotterranee e per i gas, pertanto in galleria è possibile il reperimento di venute d'acqua di ingente portata o di gas nocivi.



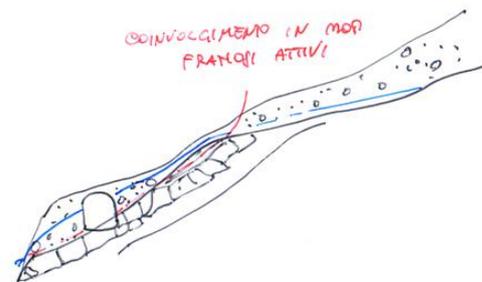
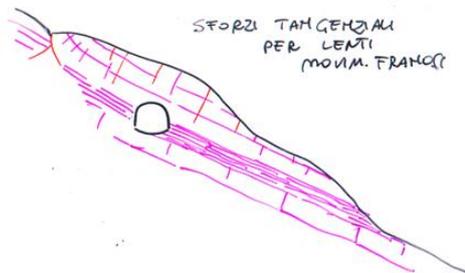
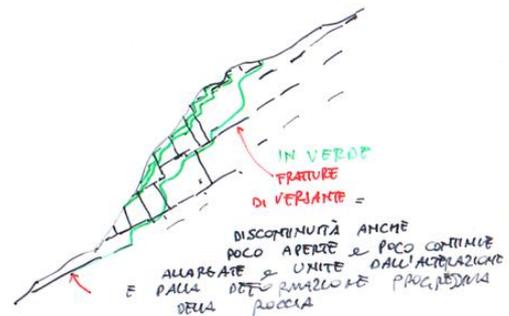
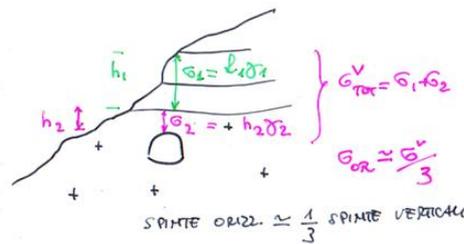
- **SOVRASCORRIMENTI**  $\Rightarrow$  problematiche analoghe a quelle delle faglie; in questo caso il basso angolo di inclinazione dell'elemento tettonico comporterà il reperimento di materiale scadente alla quota di scavo per tratte di particolare lunghezza.



Le gallerie parietali presentano quindi problemi legati alla rilevante alterazione della roccia, resi più gravi lungo le zone di frattura dalla circolazione idrica che vi si instaura quando queste hanno maggiore permeabilità della roccia circostante.



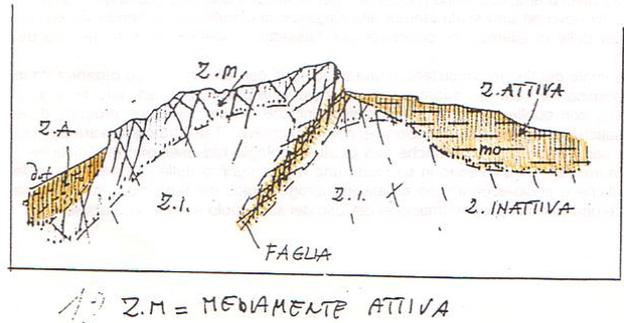
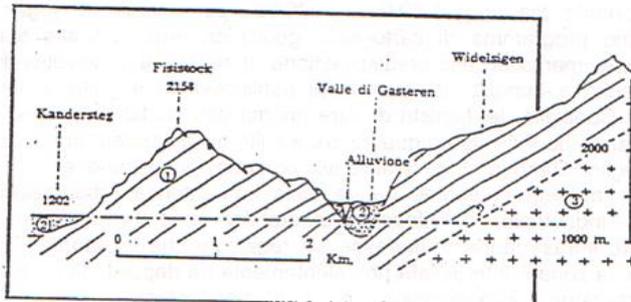
Nella figura a lato sono rappresentati gli inconvenienti dell'attraversamento in galleria parietale o, comunque, poco profonda di una zona di faglia, con dislocazioni disposte lungo valli, dalle quali possono pervenire al cavo notevoli venute d'acqua.



Questa figura indica la distribuzione delle pressioni verticali e di quelle orizzontali, sottolineando il fatto che queste ultime sono ordinariamente circa un terzo di quelle verticali, salvo alcuni casi indotti dalla tettonica o da movimenti del versante nel quale sono scavate gallerie parietali o molto superficiali, che favoriscono il movimento delle masse rocciose. La figura mostra come, in alcune circostanze, la galleria parietale ha la funzione di un dreno che convoglia le acque delle modeste falde che si formano nei terreni superficiali che coprono il versante, fatto che determina la necessità di allontanare le acque dal cavo e di prevenire le infiltrazioni, che ne danneggiano la stabilità e ostacolano le operazioni di scavo. In vista dei provvedimenti di consolidamento e della progettazione dello scavo, si deve definire la "zona attiva" cioè quella entro cui avvengono fenomeni di circolazione idrica e alterazione capaci di mutare le condizioni di progetto. In questo senso si distinguono: zona attiva, zona mediamente attiva e zona inattiva secondo l'intensità dei fenomeni.

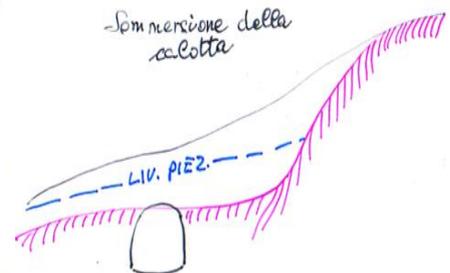
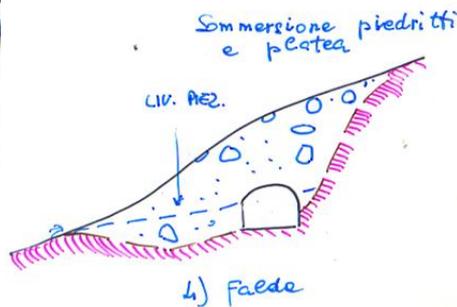
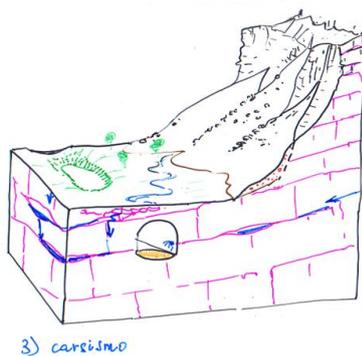
Le zone attive corrispondono a volumi di roccia nei quali è molto efficace la circolazione idrica sotterranea, come:

- zone di frattura lungo faglie o sovrascorrimenti
- depositi detritici
- morene
- eluvio (orizzonti alterati di roccia superficiale)



Come esempio evidente di zona attiva, riportiamo la figura seguente, che mostra tre casi:

- l'attraversamento di una roccia carsificata, prevedibile dalla presenza di doline in superficie
- lo scavo in deposito glaciale
- lo scavo in roccia, con l'esposizione della sola calotta alle infiltrazioni.

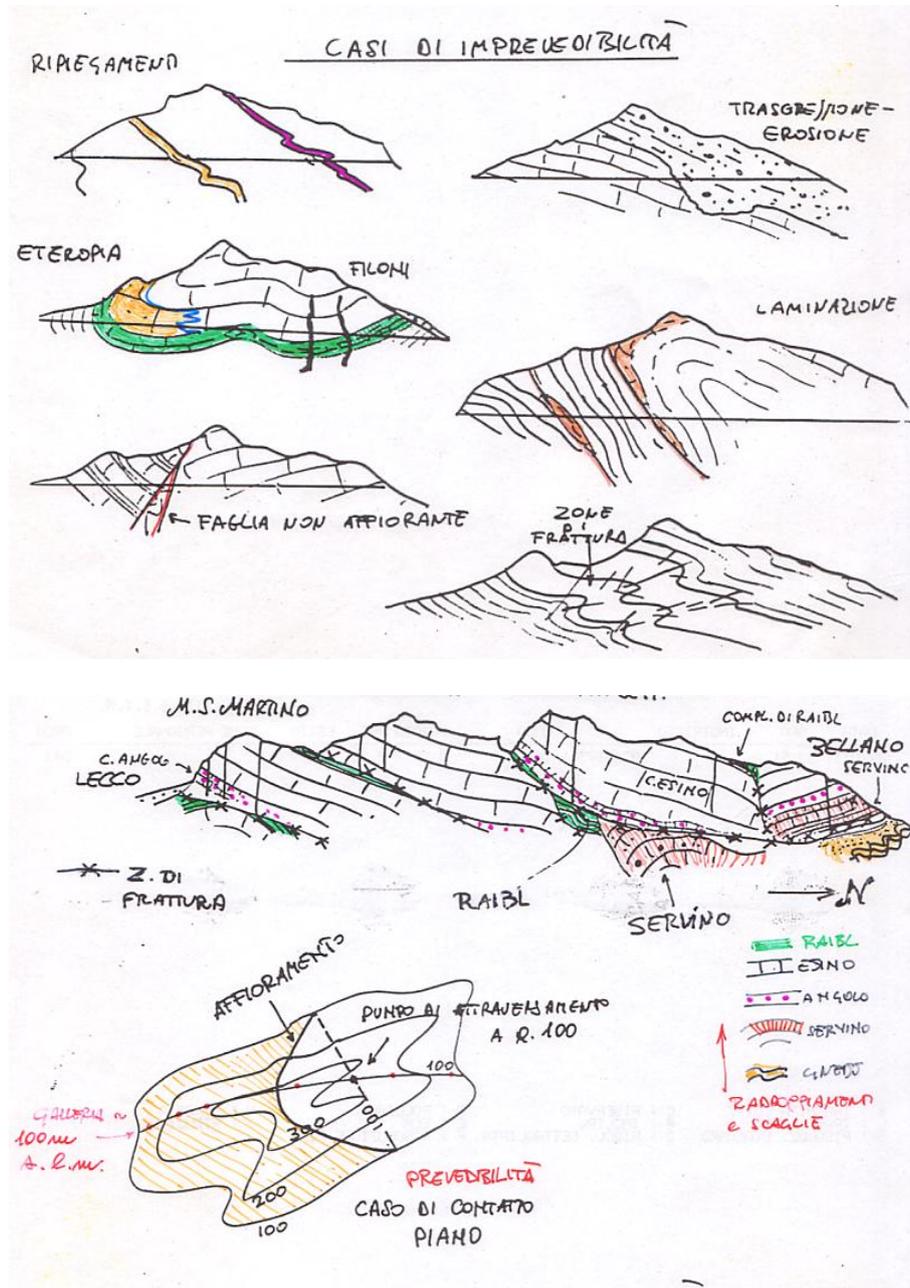


Si osserva come in tutti questi casi il rilevamento geologico, se accurato, consente di prevedere la presenza di condizioni disagiati per lo scavo e di porre in atto le necessarie verifiche (geofisica, sondaggi, piezometri).

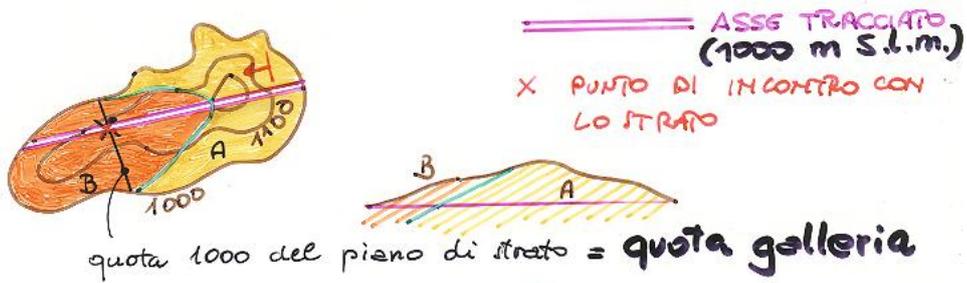
### 2.2.2. Problematiche delle gallerie profonde

- 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. Tale gradiente geotermico può subire delle variazioni: aumenta laddove si hanno bacini magmatici vulcanici o acque termali e diminuisce in presenza di acque sotterranee.

La prevedibilità delle condizioni geologiche è legata alla possibilità di estrapolare i dati esistenti (ad esempio in base alla stratimetria). Esistono però condizioni di parziale o totale imprevedibilità, indicate dalle figure, che rendono impossibile determinare in sede progettuale tali elementi.

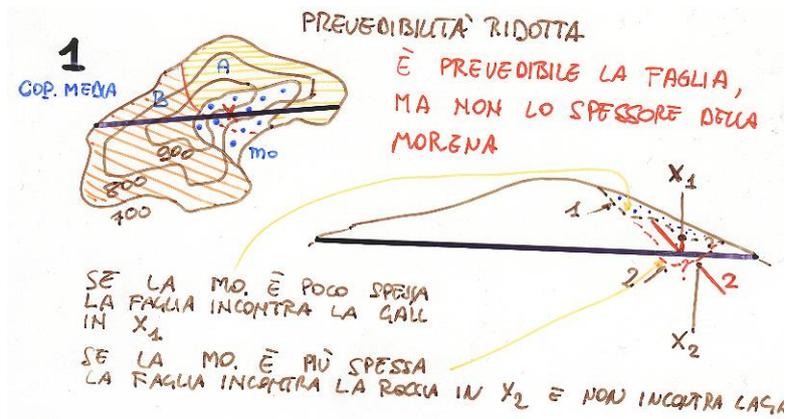
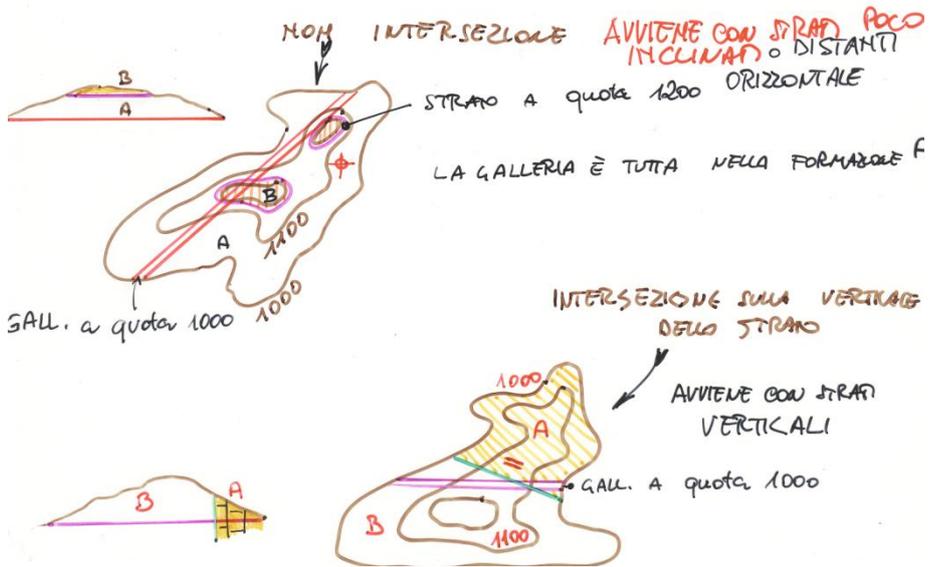


PREVISIONI



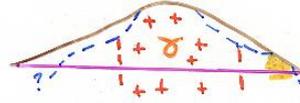
SE GLI STRATI SONO PARI, È SUFFICIENTE CONGIUNGERE I DUE PUNTI DI AFFIORAMENTO ALLA STESSA QUOTA E DETERMINARE L'INTERSEZIONE CON LA GALLERIA. QUALUNQUE SIA L'ORIENTAMENTO DEL TRACCIATO È POSSIBILE COSTRUIRE LA SEZIONE (SI USA LA STRATIGRAFIA)

CASI PARTICOLARI



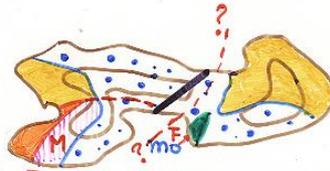


G = GRANITO  
CA = CALCARI  
MS = MICASCHISTI



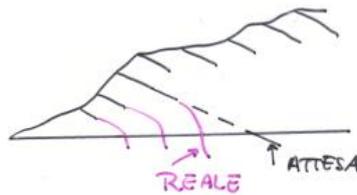
- LE FAGLIE SONO PROBABILI, MA NON È POSSIBILE POSIZIONARLE NÈ SAPERNE LA GIACITURA
- NON È NEPPURE INDIQUABILE SE INCONTRANO O NO LA GALL.

3  
TETTONICA COMPLESSA e COP. MEDIA

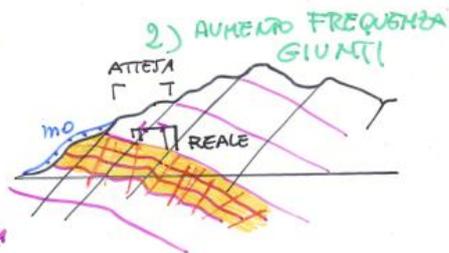


L'ANDAMENTO E LA POSIZIONE DELLA FAGLIA È SCOMOSCIUTO; PERCHÈ IL DUBBIO DELLA POSSIBILE SCAGLIA TETTONICA SE M e F NON SONO IN SUCCESSIONE NORMALE

**IMPREVEDIBILITÀ**

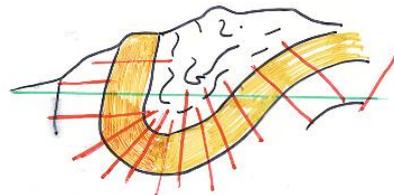


1) VARIAZIONI DI PENDENZA

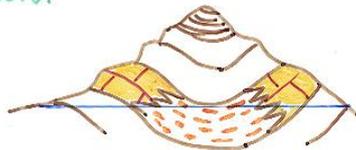


2A LA MAGGIORE DUTTILITÀ DELLA ROCCIA PIÙ STRATIFICATA DÀ LUOGO A UNA INFERA FREQUENZA

2B NEL NUCLEO DELLA SINCLINALE LA FREQ. RISULTA PIÙ ALTA



3) ETEROPIA



LOCALMENTE SI HA UNA VARIAZ. LITOLOGICA (es. ARGILLI INVECE DI CALCARI)  
NON VISIBILE DALLA SUPERFICIE

4) SCAGLIE TETTONICHE



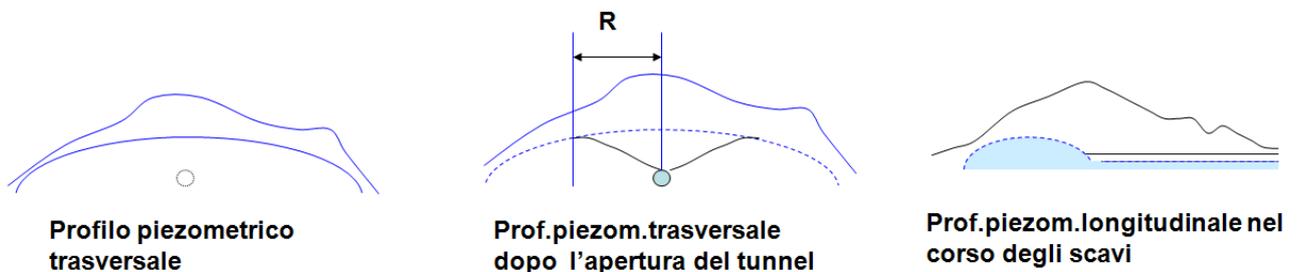
IL SOVRASCORRIMENTO È VISIBILE, MA LE SCAGLIE NON SONO AFFIORANTI, COPERTE DA DETRITO

## 2.3 Problematiche idrogeologiche

I fattori che favoriscono i rifluimenti idrici in galleria sono:

- la 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.
- l'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.

Delle problematiche idrogeologiche si parlerà più diffusamente nel seguito, in relazione all'impatto ambientale dell'opera in sotterraneo.



## 2.4 Problematiche connesse al reperimento di gas

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:

- dalla natura litologica delle formazioni intercettate,
- dalla presenza di fratture beanti.

## 2.5 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. E' questo il caso dell'attraversamento di gessi e anidridi, rocce ricche di solfati, che nel tempo possono produrre il degrado dei cementi se questi non sono miscelati con opportuni correttivi (esempio con pozzolane, rocce vulcaniche).

## 2.6 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.

### 3. Profili geomeccanici di previsione

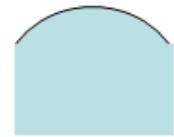
Nel seguito verranno brevemente trattate le procedure più diffuse per la stima della qualità della roccia e dei provvedimenti che devono essere adottati nel corso del progetto di massima. In sede previsionale, quando non si possiedono elementi che permettono un elevato dettaglio, è utile applicare una classificazione delle caratteristiche tecniche delle rocce come quella di Rabcewicz e Pacher, che non richiede una perfetta conoscenza delle condizioni geologiche; questa classificazione ha dimostrato la sua validità anche in sede di progetto definitivo, in quanto, una volta acquisiti i dati reali sull'ammasso roccioso, può venire utilizzata per applicare il metodo di scavo e rivestimento detto NATM.

#### CLASSIFICAZIONE DI RABCEWICZ-PACHER

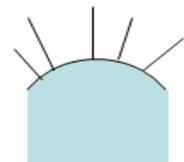
Considera cinque classi in funzione di:

- CARATTERISTICHE LITOLOGICHE E GEOMECCANICHE DEI MATERIALI INTERCETTATI
- □ COMPORTAMENTO ALLO SCAVO

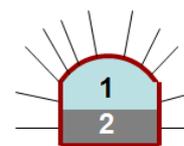
**I classe** rocce sane, compatte, non degradate. L'eventuale instabilità è limitata esclusivamente a isolati blocchi o lastre che possono essere stabilizzati da ancoraggi puntuali. Il comportamento della roccia non è influenzato dall'acqua eventualmente presente nel sottosuolo.



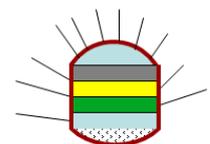
**II classe** rocce friabili, stratificate e fratturate, che però non si deformano durante gli scavi. L'acqua del sottosuolo influenza debolmente la resistenza meccanica delle rocce.



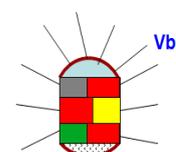
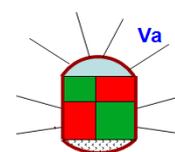
**III classe** rocce da franose a molto franose, caratterizzate da una stratificazione sottile o da un grado di fratturazione medio. L'acqua del sottosuolo influenza moderatamente il comportamento del terreno.



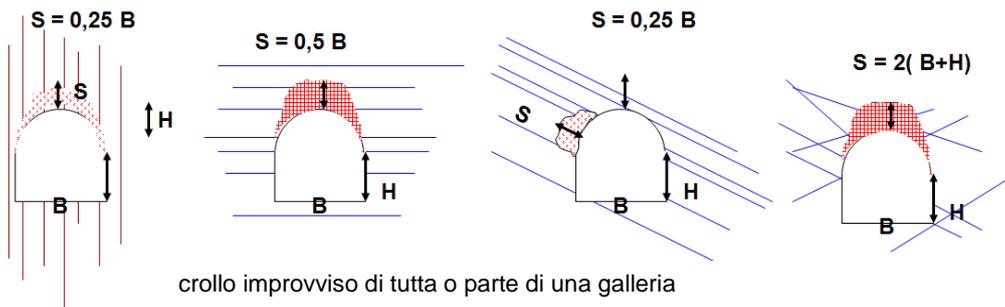
**IV classe** rocce spingenti che risentono fortemente dell'influenza dell'acqua e si deformano sensibilmente durante gli scavi. In questa classe troviamo anche i materiali sciolti, purché coerenti e consolidati.



**V classe** (suddivisa in Va e in Vb) rocce molto spingenti, cataclase ed alterate, aventi la tendenza a muoversi verso il cavo ( $\Rightarrow$  Va), sia terreni sciolti, completamente incoerenti ( $\Rightarrow$  Vb).



Relazioni pratiche per la stima della lunghezza degli sfornellamenti



In base alla classe e quindi alla categoria dell'ammasso si hanno indicazioni sul comportamento del materiale, sugli interventi da adottare per ridurre l'eventuale instabilità durante lo scavo e sulle modalità di avanzamento. Va detto che con terreni spingenti si intendono quelli che tendono a richiudere il cavo (per sfornellamenti o cedimenti di parte del vano), come ad esempio rocce molto fratturate o argillose, o corpi di frana. Le argille, che sono tipici terreni spingenti, hanno anche notevole capacità di rigonfiamento; sono quindi anche terreni rigonfianti.

Sulla base di questi presupposti teorici è successivamente nato il metodo semiempirico di progettazione e costruzione noto come N.A.T.M. (*Nuovo Metodo Austriaco per lo scavo di Gallerie*). Attraverso questo metodo è possibile, in funzione della risposta deformativa della cavità, determinare le modalità di avanzamento e gli interventi di stabilizzazione più idonei alle caratteristiche geologiche dei materiali attraversati. In particolare, il Metodo NATM prevede, per ciascuna delle sei classi di Rabcewicz, una sezione tipo nella quale vengono indicati i diversi interventi da adottare (si veda la tabella successiva).

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 micronizzato e alterato, ridotto a ghiaietto, sciolto non consolidato, leggermente coerente	Materiale sciolto, incoerente
Comportamento	La resistenza della roccia alla compressione uniaxiale $\sigma_{gd}$ è maggiore della tensione tangenziale $\sigma_t$ ; 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  spinte laterali e sollevamento della platea. I movimenti vengono contrastati dall'anello portante completamente chiuso	Vedi classe Va	
Influenza dell'acqua	Nessuna	Irrilevante	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 

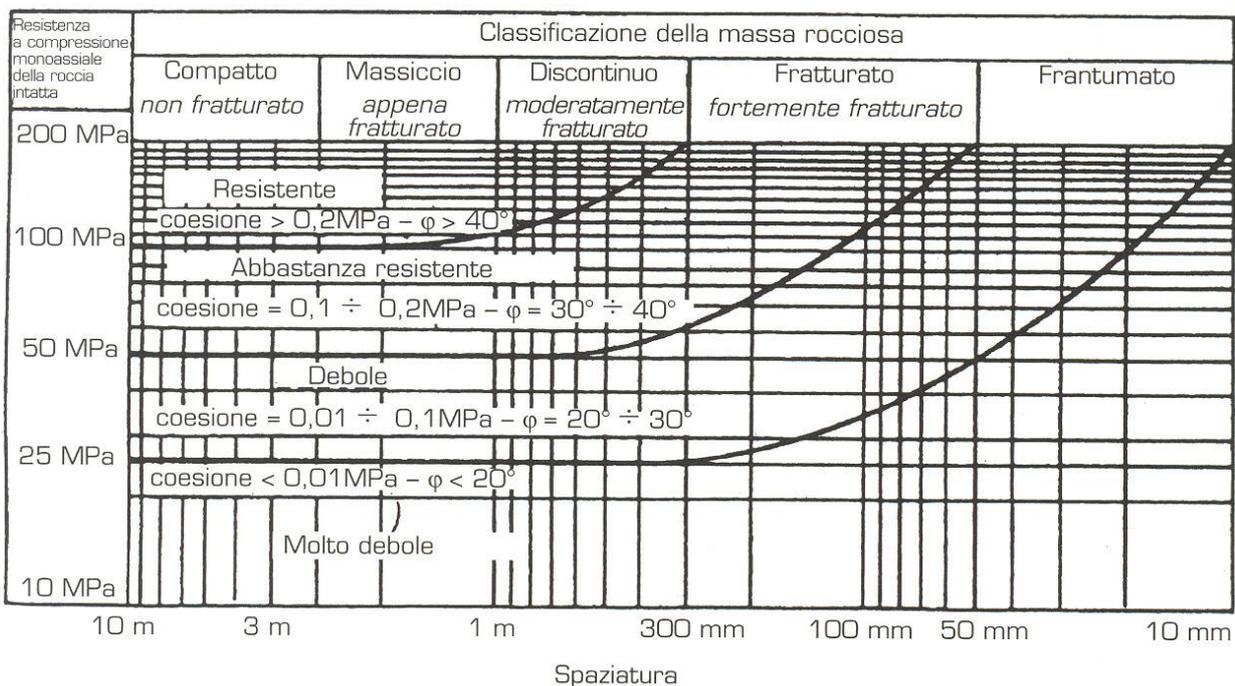
Attualmente la necessità di garantire maggiore sicurezza nel corso dei lavori e la maggiore aderenza possibile delle previsioni con la realtà geologica riscontrata dall'opera, richiede l'impiego di classificazioni geomeccaniche (come quelle di Barton di Bieniawski) che possono fornire risultati più precisi su un peggior di parametri e garantire una migliore funzionalità delle tecnologie di scavo.

CLASSIFICAZIONE GEOMECCANICA DI BIENIAWSKI

(o dell'indice RMR, applicabile ai soli ammassi rocciosi)

Si basa su un punteggio da assegnare alla roccia, ricavato dall'analisi di cinque parametri:

1. RESISTENZA ALLA COMPRESSIONE ottenuta tramite le prove di compressione monoassiale o il Point Load Test;



- 2) RQD rappresenta la percentuale di recupero modificata di un sondaggio.

- 3) Spaziatura dei giunti;

- 4) Condizione dei giunti (apertura, rugosità, alterazione, riempimento, persistenza delle discontinuità);

- 5) Condizioni idrauliche (portata degli afflussi idrici in galleria o rapporto tra la pressione dell'acqua nei giunti e le sollecitazioni naturali in sito, oppure condizioni idriche generali).

La somma dei punteggi attribuiti ai cinque parametri fornisce il "punteggio qualità" dell'ammasso.

**RMR** è variabile fra 0 e 100: più è alto migliore è la qualità della roccia. L'indice RMR così ottenuto viene poi corretto in base all'orientazione dell'asse della galleria rispetto a quella dei giunti.

Parametri	Intervallo di valori							
Resistenza roccia sana	Resistenza al «Point Load test» (MPa)	> 10	4 + 10	2 + 4	1 + 2	Per questi bassi valori è preferibile la prova di compressione monoassiale		
	Resistenza a compressione monoassiale (MPa)	> 250	100 + 250	50 + 100	25 + 50	5 + 25	1 + 5	< 1
Coefficienti numerici		15	12	7	4	2	1	0
Rock Quality Designation RQD (%)		90 + 100	75 + 90	50 + 75	25 + 50	< 25		
Coefficienti numerici		20	17	13	8	3		
Spaziatura delle discontinuità		> 2 m	0,6 + 2 m	200 + 600 mm	60 + 200 mm	< 60 mm		
Coefficienti numerici		20	15	10	8	5		
Condizione dei giunti		Superfici molto rugose. Discontinuità chiuse e non persistenti. Pareti non alterate	Superfici debolmente rugose. Apertura delle discontinuità < 1 mm. Pareti leggermente alterate	Superfici debolmente rugose. Apertura delle discontinuità < 1 mm. Pareti completamente alterate	Superfici lisce o riempimenti argillosi di potenza < 5 mm o discontinuità collegate e con apertura di 1 - 5 mm	Riempimenti di argilla molle di potenza > 5 mm o discontinuità collegate e con apertura > 5 mm, persistenti		
Coefficienti numerici		30	25	20	10	0		
Presenza di acqua	Venute d'acqua in 10 m di galleria (l/min)	Nulla	< 10	10 + 25	25 + 125	> 125		
	Rapporto tra la pressione dell'acqua nelle discontinuità e la massima sollecitazione principale	0	< 0,1	0,1 + 0,2	0,2 + 0,5	> 0,5		
Condizioni generali della roccia		Perfettamente asciutta	Umida	Bagnata	Stillicidi	Venute d'acqua		
Coefficienti numerici		15	10	7	4	0		

Dall'RMR si ricava la classe di appartenenza della roccia, da cui:

- coesione e angolo di attrito
- giudizio sulle difficoltà di scavo e sui tempi di autosostentamento del materiale (cioè la capacità che hanno i materiali al contorno del cavo di sostenersi senza alcuna armatura).
- modalità di avanzamento ed il tipo di sostegno provvisorio da adottare: centine, bulloni o "spritz-beton".

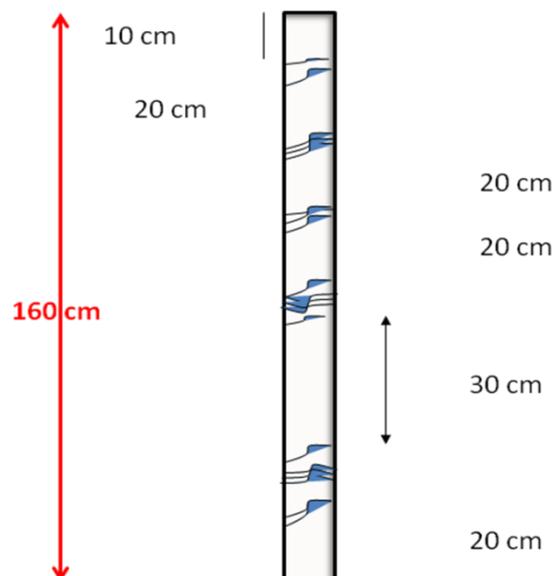
### CLASSIFICAZIONE GEOMECCANICA DI BARTON (o "Q-System", applicabile ai soli ammassi rocciosi)

E' basato sulla definizione dell'indice di qualità "Q" (**Rock Mass Quality**), che si ricava dalla seguente relazione:

$$Q = RQD/J_n \cdot J_r/J_a \cdot J_w/SRF$$

dove:

- 1) RQD è la percentuale di recupero modificato. Il valore si ottiene estraendo dal campionario dei sondaggi il cilindro (carota) di roccia perforata. Si sommano le lunghezze degli spezzoni **pari o superiori ai 10 cm** e si calcola la **percentuale** della lunghezza totale così ottenuta rispetto alla lunghezza totale della perforazione.  
Sommando gli spezzoni di (10+20+20+20+30+20) cm = 120 cm  
e confrontando questo totale con la lunghezza



della perforazione (160 cm)

si ottiene :  $120/160 = 0,75 \rightarrow$  L'RQD è quindi pari al 75%

Quando non si hanno a disposizione dei sondaggi, il valore di RQD può essere stimato tramite delle relazioni empiriche, quali ad esempio:

$$RQD=(115-3.3*J_v)$$

$J_v$ = numero di discontinuità per unità di volume

$$RQD = 100(0.1 f + 1)^{-0.1f}$$

f = numero di discontinuità per metro (frequenza)

2)  $J_n$  indica il numero di famiglie di giunti

3)  $J_r$  rappresenta la scabrezza delle superfici dei giunti distinguendo tra pareti a contatto e non.

Le superfici delle discontinuità possono essere lisce, ondulate, seghettate o irregolari. La rugosità rappresenta l'altezza media delle asperità della superficie rispetto all'apertura media. Viene rilevata tramite una dima (shape tracer o Pettine di Barton).



4)  $J_a$  si riferisce all'alterazione e al riempimento dei giunti, distinguendo sempre tra pareti a contatto e non

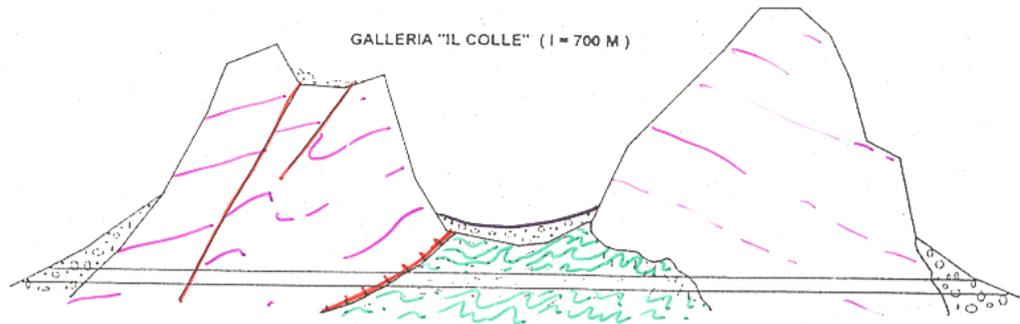
5)  $J_w$  è un fattore di riduzione legato alla presenza di acqua nei giunti

6) SRF è un fattore di riduzione che tiene conto delle sollecitazioni tensionali presenti all'interno dell'ammasso. Ottenuto il valore di "Q" (variabile da 0.001 a 1000), si determina l'appartenenza a una delle classi di roccia distribuite lungo una scala logaritmica e conseguentemente gli interventi di sostegno durante le lavorazioni di scavo. A tale proposito va definita la "**Dimensione Equivalente**", data dal rapporto tra il diametro della cavità e un fattore di sicurezza ESR che dipende dal tipo di galleria. Dal rapporto fra la dimensione equivalente e il valore della qualità della roccia, indicato da Barton con Q (figura) è possibile in base alla classificazione di Barton scegliere con grande cura il tipo e il tempo di rivestimento.

In tal modo è possibile valutare la necessità di applicare interventi di sostegno durante le lavorazioni (bulloni, reti, centine, spritz-beton, tiranti, chiodi, ecc.).

### SEZIONI DI PREVISIONE

Il metodo più semplice per presentare le caratteristiche geologiche attese è rappresentato dalle sezioni di previsione, che mostrano le unità incontrate dalla galleria e, in appositi spazi posti parallelamente all'estensione longitudinale della sezione geologica, danno indicazioni sulle caratteristiche geomeccaniche, idrogeologiche, qualitative della roccia, sulla classe di appartenenza e sui rimedi prevedibili.

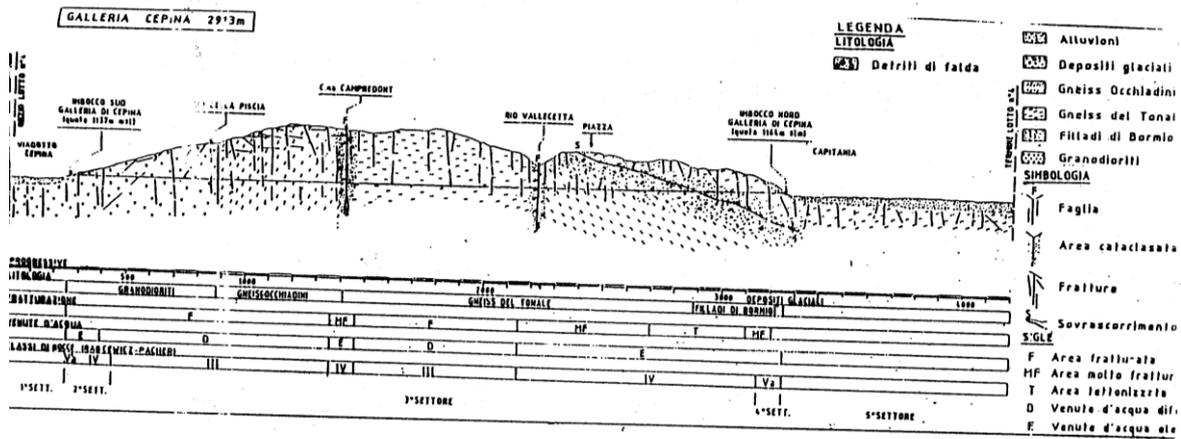


Copertura (m)	10	50	123	104	109	50	22	50	145	50	10
Litologia	Detrito	Dolomia			Micascisti			Granito		Detrito	
Caratteristiche fisico-meccaniche	$\gamma$ (KN/m <sup>3</sup> )	18	26			27			28		18
	C (MPa)	0	0,2			0,1			0,3		0
	$\Phi$ (°)	35	36			26			45		35
	E (GPa)	0,12	7,5			0,75			25		0,12
Venute d'acqua	Stillicidi	*****			*****			*****		*****	
	Diffuse	*****			*****			*****		*****	
	Concent.	***			*****						
Classe geomeccanica	5b	3	4	3	5a	4	3	2	4	5b	

B.C.! ← A COPERTURA  
BASSA COPERTURA =  
INDAGINI DIRETTE  
(RILIEVI e SONDAGGI)

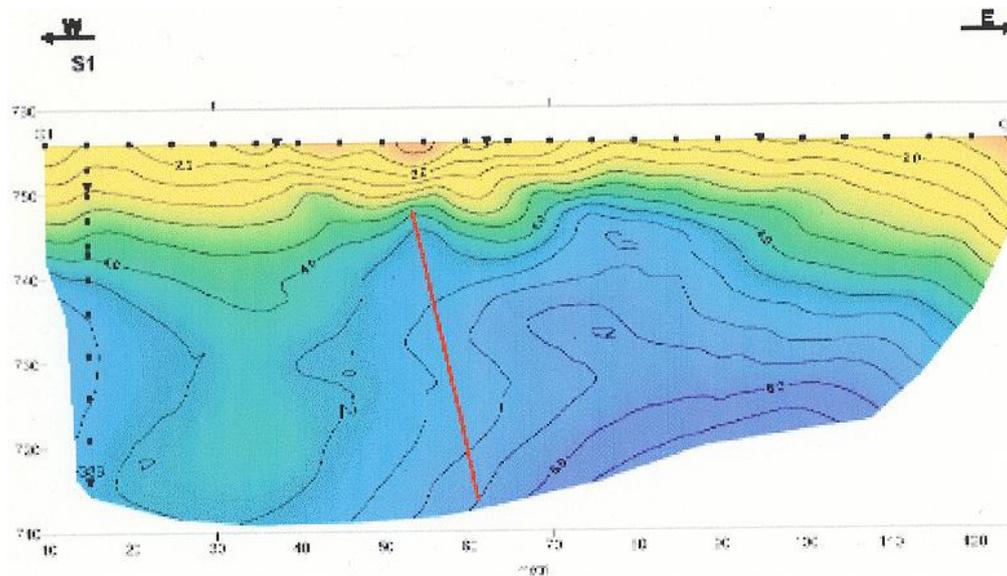
ALTA COPERTURA  
(PREV. GEOL. +  
SONDAGGI

### Tomografia sismica ed elettrica su tutta la sezione



Nelle figure sono indicate queste caratteristiche. L'ultima delle figure ricorda i diversi tipi di indagine richiesti per le diverse condizioni geologiche e di profondità ai fini di una buona raccolta dati. Bisogna ricordare che le prospezioni dall'esterno non possono pervenire ai dettagli richiesti (ad esempio valutare se una frattura o una faglia portano o meno acqua in pressione), ma solo fare le più logiche previsioni. Una volta aperto lo scavo, è necessario produrre ulteriori indagini in avanzamento (sondaggi direzionali ad esempio) per verificare quanto utile alla predisposizione di misure di sicurezza e a progettare il tipo di avanzamento e scavo.

Le indagini geofisiche sono di particolare aiuto nel condurre lo studio di previsione. Nella seguente figura è rappresentata una tomografia sismica ottenuta con il metodo della rifrazione su uno spessore di circa 100 m di roccia. Sono rappresentate con le linee continue i valori della velocità riscontrata dai segnali ricevuti dai geofoni (trattini neri) in superficie e nel pozzo S1. I colori giallo e arancio indicano velocità sismiche basse; il verde velocità sismiche intermedie e il blu le velocità più alte.



Nella parte di sinistra sono indicati i punti in cui sono stati applicati gli impulsi per una prova down-hole. Si nota nella parte centrale una dislocazione, segnata in rosso, e a sinistra si osserva una riduzione (in verde) anche in profondità delle velocità sismiche in corrispondenza di una probabile scaglia tettonica.

#### **4. Soluzioni progettuali**

La stesura della relazione di progetto comporta, quindi, l'approfondimento delle indagini geognostiche, terminato il quale viene redatta la sezione di previsione definitiva. Per la scelta delle soluzioni progettuali occorre:

1. suddividere il tracciato in tratte omogenee da un punto di vista litologico e strutturale
2. relativamente a ciascuna tratta omogenea, conoscere il comportamento dei materiali a seguito dello scavo. Questo può avvenire:
  - utilizzando le classificazioni geomeccaniche tradizionali, che forniscono un indice di qualità a cui si associa il comportamento geomeccanico dell'a.r. all'apertura degli scavi
  - utilizzando metodi che analizzano direttamente il comportamento tenso-deformativo dell'ammasso roccioso all'apertura della cavità

Una volta accertata la validità del profilo di previsione e del progetto preliminare, si deve passare alla redazione del **progetto definitivo**, che comporta un maggior dettaglio nella previsione e la scelta definitiva dei metodi di scavo.

## **5. Definizione del comportamento tenso-deformativo degli ammassi soggetti ad escavazione**

*Nel seguito vengono brevemente trattati alcuni fra i numerosi metodi che permettono la conoscenza diretta del comportamento tenso-deformativo degli ammassi rocciosi sottoposti a scavo.*

### **5.1. METODO A.DE.CO.R.S. (ANALISI DELLE DEFORMAZIONI CONTROLLATE NELLE ROCCE E NEI SUOLI)**

Esso valuta il comportamento tenso-deformativo del materiale in corrispondenza sia del fronte di scavo che dell'intero perimetro della cavità. Essa prevede due differenti momenti: *progettazione* e *costruzione*.

#### **5.1.1. Progettazione**

Suddiviso in tre fasi:

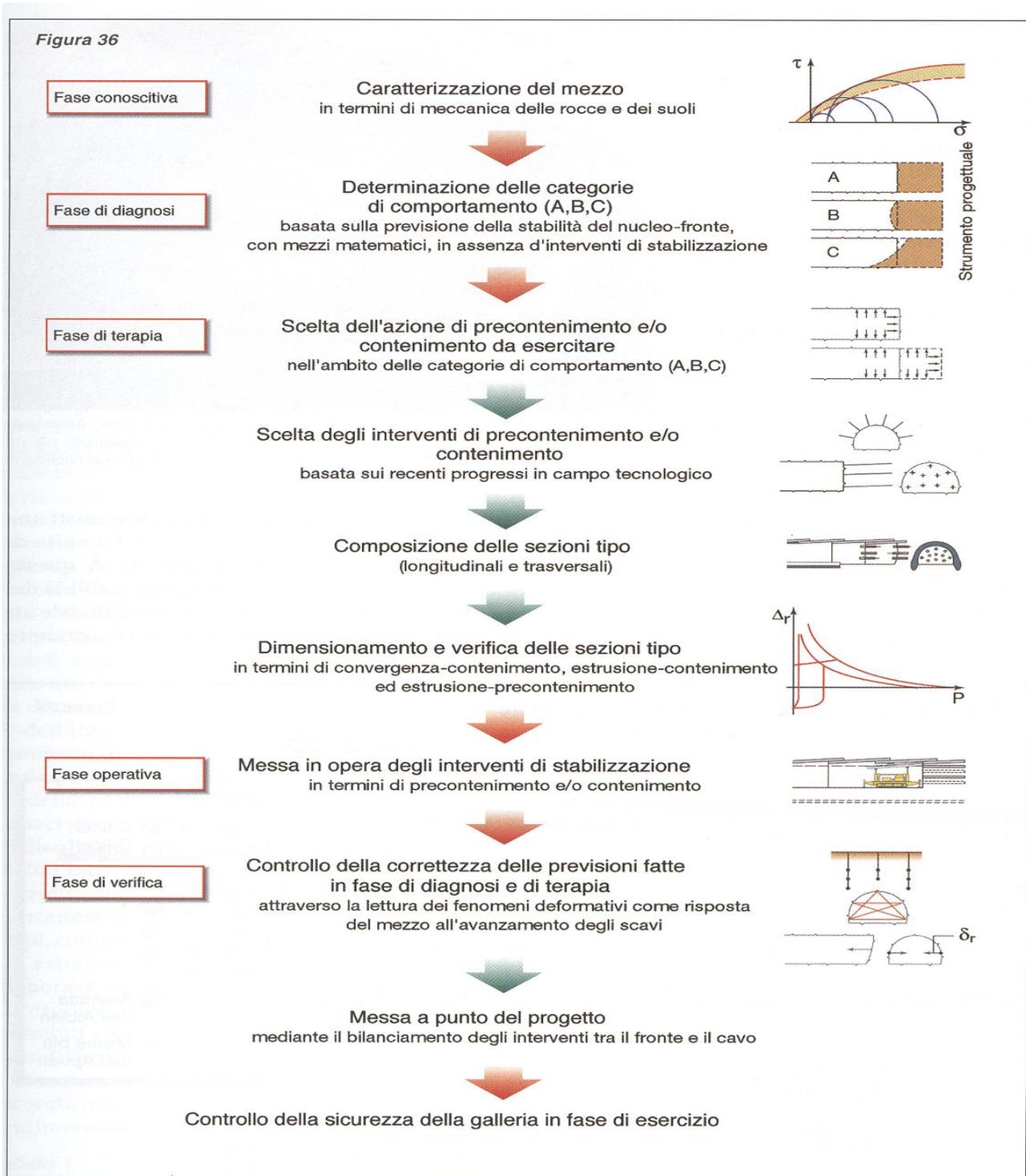
- a) Fase conoscitiva: campagna geognostica mirata alla definizione degli equilibri naturali preesistenti lo scavo.
- b) Fase di diagnosi: previsione dei fenomeni deformativi a seguito dello scavo utilizzando opportune procedure di calcolo (linee caratteristiche, metodo ad elementi finiti, ecc.); a tal proposito vengono considerati i seguenti tre comportamenti:
  1. comportamento di tipo lapideo: fronte stabile;
  2. comportamento di tipo coesivo: fronte stabile a breve termine;
  3. comportamento di tipo sciolto: fronte instabile.
- c) Fase di terapia: vengono scelti i sistemi di stabilizzazione atti a contrastare i fenomeni deformativi individuati nella precedente fase di diagnosi.

#### **5.1.2. Costruzione**

Anche questo momento consta di tre distinte fasi:

- a) Fase operativa: operazioni di scavo della galleria (di norma a sezione piena) e applicazione degli strumenti di stabilizzazione.
- b) Fase di verifica in corso d'opera: controllo dei fenomeni deformativi quale risposta dell'ammasso alle operazioni di scavo (convergenze superficiali e profonde).
- c) Fase di messa a punto del progetto: eventuale taratura del progetto e adeguamento alla situazione reale.

Figura 36



## METODOLOGIE PROGETTUALI:

### 5.2. METODO BASATO SULLA TEORIA DI KASTNER

Tale metodologia, a partire dalla caratterizzazione geomeccanica dei materiali, fornisce una valutazione dello stato tensionale dell'ammasso al contorno della cavità:

1. deformazioni in campo elastico con distacco di blocchi;
2. deformazioni in campo plastico.

Lo scopo è calcolare la pressione di confinamento radiale necessaria per garantire l'equilibrio della cavità.

### 5.3. METODO DELL'AREA INDICE

E' utilizzata in presenza di due gallerie affiancate per calcolare l'incremento dell'entità dei fenomeni di plasticizzazione e di deformazione nel terreno. Tale metodo ipotizza che

1. lo stato tensionale dell'ammasso sia di tipo idrostatico,
2. il terreno abbia un comportamento elasto-plastico,
3. nel setto di separazione tra le due canne lo stato tensionale derivi dalla combinazione dei due stati tensionali elementari competenti a ciascuna cavità.

Lo scopo è quello di determinare il carico gravante sulle strutture di sostegno della galleria.

### 5.4. METODO BASATO SULLA TEORIA DELLE LINEE CARATTERISTICHE

E' un metodo di calcolo che permette di prevedere l'evoluzione delle tensioni e delle deformazioni al contorno di una galleria in fase di avanzamento.

Tale metodo ipotizza scavi a sezione circolare e un regime di pressioni idrostatiche nella roccia indisturbata ed analizza l'interazione fra lo spostamento radiale (convergenza o deformazione  $u$ ) subito dal contorno del cavo e la reazione delle opere di stabilizzazione a questo spostamento (cioè la pressione radiale  $p$  di confinamento). In funzione delle caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso, del raggio di scavo e della copertura, è possibile costruire analiticamente le curve di convergenza della futura galleria (linee caratteristiche) e valutare l'entità dei fenomeni deformativi. Lo scopo è quello di procedere al calcolo degli eventuali interventi di stabilizzazione dell'ammasso al contorno della cavità e/o di sostegno delle pareti di scavo.

### 5.5. METODO DI CALCOLO DEGLI ELEMENTI DISTINTI

Si tratta di un approccio numerico atto a simulare il comportamento di mezzi fratturati discontinui a seguito dello scavo di una galleria, in funzione delle proprietà geomeccaniche di ciascun elemento e delle superfici di discontinuità, delle condizioni al contorno e dei carichi gravanti. Lo scopo è di ricostruire l'evoluzione tenso-deformativa del mezzo durante la realizzazione della galleria.

### 5.6. METODO BASATO SULLA "BLOCK-THEORY"

E' un sistema di calcolo tridimensionale che sfrutta i metodi della geometria analitica per studiare in maniera approfondita e completa, i sistemi di discontinuità di un ammasso roccioso e la loro reciproca interazione e per individuare i "blocchi chiave" (cunei rocciosi il cui movimento crea uno spazio verso il quale altri cunei, precedentemente contenuti, possono muoversi innescando un'incontrollabile serie di crolli progressivi) dalla cui stabilità dipende la stabilità di tutto lo scavo.

## 5.7. METODO DI CALCOLO F.E.M.

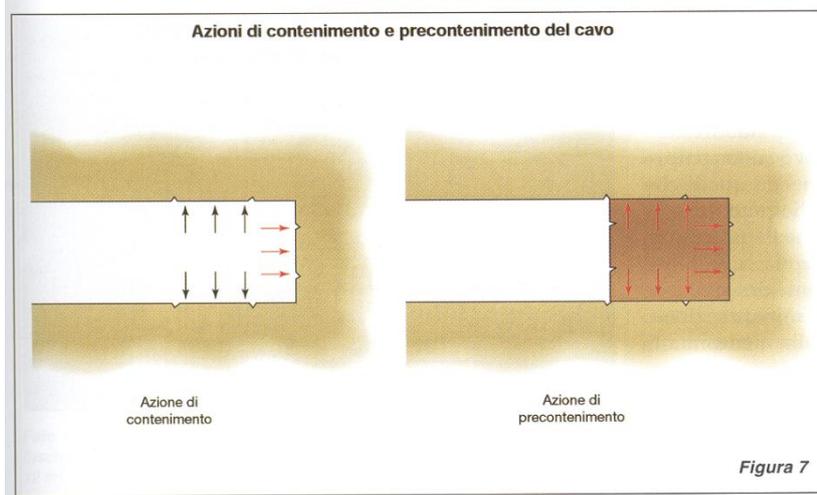
Il Metodo degli Elementi Finiti è finalizzato alla progettazione di opere in sotterraneo entro terreni sciolti e permette di tener conto sia delle anisotropie tensionali e litologiche sia dell'effetto di eventuali opere di precontenimento e/o contenimento della cavità. I principali parametri d'ingresso sono: la maglia di elementi che determina il dominio di applicazione dell'analisi, le proprietà geomeccaniche di ciascun elemento, le condizioni al contorno e i carichi agenti. Analogamente al Metodo agli Elementi Distinti, lo scopo è di seguire l'evoluzione tenso-deformativa del terreno soggetto ad escavazione, imponendo però anche il rispetto della congruenza degli spostamenti dei nodi di elementi contigui.

## 6. Tecniche costruttive

Lo schema delle operazioni per la realizzazione di una galleria contempla l'esecuzione di diverse fasi costruttive, che verranno descritte nel seguito.

### 6.1 Interventi di preconsolidamento

La realizzazione di un consolidamento antecedente alle operazioni di scavo (detto appunto preconsolidamento) è necessario in presenza di materiali poco resistenti. Tali interventi sono finalizzati a migliorare le qualità meccaniche dei materiali da attraversare, consentendo loro di manifestare condizioni di equilibrio all'apertura della cavità.



I preconsolidamenti, 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..

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.



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.

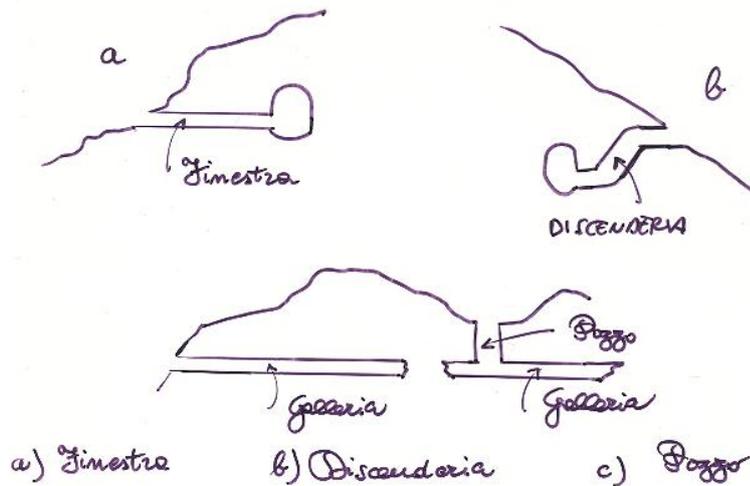


## 6.2 Scavo: metodologie di avanzamento

Lo scavo vero e proprio della galleria prevede la scelta del mezzo di abbattimento del fronte più idoneo, in funzione delle caratteristiche del materiale e del metodo di avanzamento. Una volta demolito il nucleo viene allontanato dal fronte il materiale di risulta ("smarino"), il cui smaltimento costituisce uno dei principali problemi di impatto ambientale di un'opera in sotterraneo.

Negli scavi ha grande importanza poter disporre di soluzioni diverse per l'attacco: non solo dagli imbocchi, che sono molto difficili da realizzare in tempi brevi per le non buone caratteristiche delle rocce, ma anche in finestra, pozzo e discenderia, da punti facili da attraversare. La figura mostra i tipi di attacco e, nella tabella, i metodi tradizionali di scavo.

PRINCIPALI METODI DI ATTACCO E AVANZAMENTO



METODI DI SCAVO TRADIZIONALI

Dimensioni della galleria	Tipo di roccia	Metodo di scavo	Mezzi di scavo
PICCOLE e MEDIE	R. COERENTI	PIENA sez.	ESPLOSIVO
	R. SCOLTE		MACCHINE
GRANDI	R. MASSICCE	a piena sez. 2 fasi	ESPLOSIVI e MACCHINE
	R. SPINGENTI	sez. ai forzioli	MACCHINE

I metodi di scavo tradizionale si dividono in metodi a foro cieco (interamente in sotterraneo) e a scavo aperto (cioè in trincea). Per i primi, distinguiamo alcuni metodi a seconda che sia possibile effettuare il rivestimento in una sola fase, con maggiore rapidità e comodità per gli operatori, tramite il metodo tedesco e austriaco, oppure sia necessario effettuare il rivestimento a settori. In questo caso, le rocce sono di solito poco resistenti e i metodi di scavo adottati partono dal principio che è più opportuno scavare e armare rapidamente il foro per evitare incidenti e crolli (metodi belga e italiano).

**6.2.1. Scavo a foro cieco**

Si realizza quando le rocce e/o i terreni, dotati di notevole resistenza inglobano completamente la sagoma della galleria appena scavata. I metodi che permettono di rivestire contemporaneamente l'intera parete di scavo, con accelerazione nei tempi di permanenza del cantiere, sono:

- a. Metodo Tedesco (per rocce abbastanza resistenti)
  - isolamento di un nucleo centrale di roccia intatto, che viene rimosso per ultimo quando il rivestimento definitivo è già stato completato;

- scavo e armatura dei piedritti a partire da due cunicoli di base laterali;
- scavo della calotta a partire da un cunicolo indipendente posto alla sommità e successivo rivestimento.

b. Metodo Austriaco classico (rocce di buona tenuta che non necessitano di armature provvisorie). Si procede dal basso verso l'alto, partendo da un cunicolo di base centrale, ed una serie di gradini rovesci fino alla zona di calotta.

Le tecniche elencate ora sono particolarmente adatte per terreni resistenti. I metodi che richiedono un rivestimento per settori, idonei per terreni mediocri e spingenti, sono di seguito indicati:

- a. Metodo Italiano (per terreni molto spingenti)
- creazione di un nocciolo centrale con materiale costipato,
  - scavo e armatura dell'arco rovescio e dei piedritti, in modo da rendere stabile la parte inferiore del cavo,
  - completamento dei piedritti,
  - attacco della zona di calotta, che viene successivamente allargata,
  - getto del rivestimento e eliminazione del nucleo centrale.
- b. Metodo Belga "della sottomurazione" (per roccia relativamente buona, ma non completamente autoportante)
- scavo di un cunicolo in platea,
  - con un camino, si sale a raggiungere la calotta dove si procede al getto del rivestimento che viene appoggiato o direttamente sulla roccia o su un cordolo di base armato longitudinalmente,
  - scavo dello strozzo e, quindi, in sottomurazione si passa allo scavo ed al getto dei piedritti e dell'arco rovescio.
- c. Metodo Belga "dello strozzo". E' impostato su un cunicolo di avanzamento in sommità, allargato progressivamente a tutta la zona di calotta e poi a tutta la sezione per gradini diritti. Il rivestimento procede dal basso verso l'alto.

Sono in uso attualmente metodi che controllano in continuo le deformazioni del terreno, ovviamente con particolare riguardo alla fase di scavo, e adattano il rivestimento ai risultati di questo controllo. Tra questi si ricorda il "Nuovo Metodo Austriaco" (NATM), nel quale lo scavo viene eseguito sia a sezione piena che a sezione parzializzata, controllando per ogni settore il comportamento del terreno e calcolando il rivestimento di conseguenza. Dopo aver scavato un certo tratto si procede al consolidamento del cavo e al successivo rivestimento di prima fase, procedendo, allo stesso tempo, a una minuziosa misurazione delle eventuali convergenze. Nel momento in cui non si registrano più deformazioni apprezzabili, ovvero si è raggiunto l'equilibrio, viene messo in opera il rivestimento definitivo costituito da un anello di calcestruzzo eventualmente armato.

- 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.

## **6.2.2. 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).

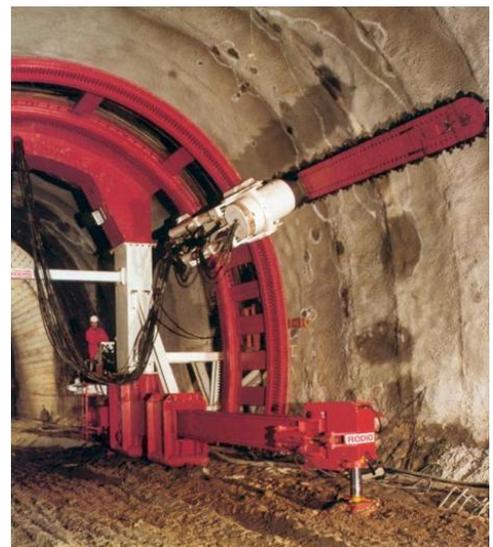
## **6.3. MEZZI DI SCAVO**

### **6.3.1. Pretaglio meccanico**

Utilizzato per opere in sotterraneo, consiste nell'eseguire nel terreno, prima dello scavo, un taglio che interessa tutto il profilo di estradosso dello scavo di spessore predeterminato (14÷22 cm) e profondità di 2.50÷4.50 m.

Il pretaglio permette di separare l'area della volata dal contorno dello scavo, in modo che lo stesso possa conservare meglio le sue caratteristiche di resistenza, e favorisce la creazione di un elemento di discontinuità che permette di assorbire le vibrazioni indotte dagli esplosivi che si propagano verso l'esterno.

Nel caso dei terreni coesivi, esso consente di realizzare una protezione preventiva allo scavo, ovvero un precontenimento che limiti le deformazioni del terreno al contorno dello scavo stesso. Contemporaneamente all'esecuzione del taglio del materiale, la fessurazione che si produce viene immediatamente riempita con betoncino, in modo da creare, già in fase di avanzamento, un pre-rivestimento al contorno del profilo di scavo in grado di contrastare gli eventuali rilasci del materiale. In prossimità di settori di terreno caratterizzati da forti disomogeneità, è necessario però sostituire questa tecnica con altri tipi di consolidamento, quali le iniezioni, il jet-grouting o gli infilaggi.



### 6.3.2. 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.

### 6.3.3. Mezzi meccanici non tradizionali:

- **frese:** per materiale roccioso con caratteristiche meccaniche da medie ad 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 m<sup>2</sup>.
  - b) **frese ad attacco integrale:** poco versatili, sono costituite da una testa rotante, avente diametro pari a quello della galleria. E' 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.



#### 6.3.4. 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.



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.

#### 6.4 **Consolidamenti radiali al contorno della cavità**

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

#### 6.5 **Rivestimento provvisorio o di prima fase**

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



## 6.6 Impermeabilizzazione della galleria

Consiste nell'applicazione sulle pareti di scavo di un manto in P.V.C., al fine di impedire scambi di acqua con la falda.



## 6.7 Rivestimento definitivo o di seconda fase

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



## 6.8 Controllo in corso d'opera

Il controllo in corso d'opera riveste la funzione principale di verificare la rispondenza tra i fenomeni deformativi reali e quelli previsti in fase progettuale. Dovranno essere acquisiti i dati relativi alle convergenze registrate in galleria e alle deformazioni sviluppatesi al contorno della cavità.

Si possono avere tre tipi di stazione di misura:

- stazioni di misura sistematiche, allestite in modo frequente e ricorrente, attrezzate con i soli chiodi di convergenza;
- stazioni di misura principali, allestite in modo ricorrente ma piuttosto distanziate, attrezzate con chiodi di convergenza, celle di pressione e celle di carico;
- stazioni di misura speciali, allestite in pochi punti assai distanziati tra loro e/o in siti di particolare interesse, attrezzate con estensimetri, piezometri e gli stessi strumenti della tipologia precedente.

Qualora la presenza di basse coperture lo consenta, risulta di grandissima utilità l'organizzazione di un controllo effettuato dalla superficie topografica (tramite assestimetri, inclinometri, piezometri), al fine di controllare le deformazioni prima, durante e dopo il passaggio del fronte.

## 7. Le gallerie nel territorio

La realizzazione di un'infrastruttura (ad esempio viaria o ferroviaria) in sotterraneo invece che in superficie presenta sia vantaggi che svantaggi rispetto all'impatto ambientale. I principali vantaggi sono:

- il recupero di spazi in superficie,

- un minore impatto visivo dell'opera,
- effetti trascurabili sugli ecosistemi,
- un minore impatto acustico.

Gli svantaggi, invece, sono:

- maggiori costi di costruzione e di manutenzione,
- un'alterazione di equilibri naturali complessi,
- la produzione di rumore e vibrazioni sia in fase di costruzione che in esercizio.

In generale, si può affermare che le opere in sotterraneo sono generalmente più costose, ma il bilancio costi-benefici cambia a loro favore se si considera anche il valore socio-economico del territorio utilizzato (in particolare per aree urbane o per aree con paesaggi ed ecosistemi incontaminati). E' necessario però osservare anche che *gli effetti negativi dell'opera non vengono annullati, bensì vengono eliminati o ridotti quelli più appariscenti, producendone però altri sucomponenti, soggetti e scale temporali differenti, che meritano pertanto uno studio specifico.*

Tabella 1 - Confronto tra gli effetti ambientali di gallerie stradali e ferroviarie rispetto alle corrispondenti opere in superficie (modificato da AETOS 1994)

		Costruzione	Esercizio	Manutenzione
Fattori fisici	Aria	+	+	
	Geomorfologia	+		
	Acque sotterranee	-		
	Acque superficiali	+		
	Suolo	+		
	Rumore esterno	+	+	+
	Rumore interno	-	-	-
	Vibrazioni	-	-	-
Fattori biologici	Vegetazione	+		+
	Fauna	+	+	+
Fattori sociali	Paesaggio	+	+	+
	Patrimonio superficiale	+		
	Patrimonio sotterraneo	-		
	Utilizzo del suolo	+	+	+
	Infrastrutture	+	+	
	Sicurezza	-	+	
	Efficienza		+	
Fattori economici	Psicologia umana		-	
	Costi	-	-	-

+ Fattori ambientali per cui l'opera in sotterraneo risulta più vantaggiosa della corrispondente opera di superficie  
 - Fattori ambientali per cui l'opera in sotterraneo risulta meno vantaggiosa della corrispondente opera di superficie

Tabella 2 - Confronto tra gli effetti ambientali di gallerie idrauliche rispetto alle corrispondenti opere in superficie (modificato da AETOS 1994)

		Costruzione	Esercizio	Manutenzione
Fattori fisici	Aria	+		
	Geomorfologia	+		
	Acque sotterranee	-		
	Acque superficiali	-	-	
	Suolo	+		
	Rumore esterno	+	+	+
	Rumore interno	-		
	Vibrazioni	-	-	-
Fattori biologici	Vegetazione	+		
	Fauna	+	+	+
Fattori sociali	Paesaggio	+	+	+
	Patrimonio superficiale	+		
	Patrimonio sotterraneo	-		
	Utilizzo del suolo	+	+	+
	Infrastrutture	+	+	
	Sicurezza	-	+	
	Efficienza		+	
Fattori economici	Costi	-	-	-

+ Fattori ambientali per cui l'opera in sottterraneo risulta più vantaggiosa della corrispondente opera di superficie  
- Fattori ambientali per cui l'opera in sottterraneo risulta meno vantaggiosa della corrispondente opera di superficie

In relazione alla sostenibilità ambientale di un'opera in sottterraneo, la normativa di riferimento è la seguente:

- Legge Merloni 109/94: impone la compatibilità ambientale di qualsiasi opera di pertinenza dei Lavori Pubblici.
- DIR 92/57/CEE (recepita D.L. 494/96): impone le attività di previsione (*prefattibilità ambientale*) finalizzata alla protezione dell'ambiente non solo per eventi accidentali, bensì per le emissioni e le contaminazioni prodotte dalle attività previste dal progetto (VIA).
- Legge Obiettivo 443/2001: individuare, in relazione a tipo, entità e categoria dell'opera, le condizioni ottimali per consentire il miglioramento della qualità ambientale e paesaggistica (VAS: Valutazione Ambientale Strategica).

Ul principali indicatori che devono essere presi in considerazioni per valutare l'impatto ambientale di un'opera in sottterraneo sono:

- il grado di naturalità dell'opera,
- la presenza di corridoi ecologici,
- la qualità dell'aria,
- i volumi di biomassa,
- la presenza e la qualità di acque superficiali e sotterranee.

Tali indicatori devono essere messi in relazione di causa-effetto con le sorgenti di inquinamento:

- topografia e qualità naturali,
- impatto visivo,
- interesse storico-culturale dell'area,
- inquinamento aria/acqua/suolo,
- aspetti floro-faunistici,
- subsidenza,
- rumori e odori,
- vibrazioni.

In sintesi, le principali problematiche ambientali connesse alla realizzazione di un'opera in sotterraneo, che verranno trattate nel seguito sono:

1. l'estinzione di sorgenti e l'alterazioni della falda,
2. lo sviluppo di cedimenti di suolo e/o strutture,
3. la produzione di vibrazioni,
4. lo stoccaggio ed il riuso dei materiali,
5. l'emissione di polveri e inquinanti,
6. la produzione di rumore.

## 7.1 Problematiche idrogeologiche

Il rinvenimento di acqua sotterranea durante gli scavi di una galleria è un'evenienza molto frequente. Se la galleria si trova al di sopra della falda, generalmente le conseguenze sono in genere trascurabili, a meno che non si incontrino fratture ben alimentate dalla superficie, o inglobanti una riserva idrica in pressione. In presenza di ammassi rocciosi carsificati si possono avere venute d'acqua di ingente portata anche al di sopra della superficie piezometrica. Si nota infatti che buona parte delle gallerie che hanno le maggiori venute d'acqua si collocano in formazioni calcaree.

### Esempi di venute d'acqua in galleria

Galleria	Tipo	L (km)	Q max (m <sup>3</sup> /s)	Q min (m <sup>3</sup> /s)	Acquifero
Sempione (ITA - CH)	FER	19.8	1.700	0.864	Calcari
Vaglia (BO - FI)*	FER	18.6	0.080	—	Calcari, calcaren., arenarie
Direttissima (BO - FI)	FER	18.5	1.200	0.060	Arenarie
Pavoncelli bis (AV)	IDR	15.5	0.800	0.070	Calcari, argille scagliose
Firenzuola (BO - FI)*	FER	15.1	0.277	0.070	Arenarie e marne fratturate
Santomarco (Paola - CS)	FER	15.3	0.100	0.038	Metamorfiti
Frejus (T4)	AUT	12.9	0.007	0.001	Diversi
M. Bianco (TI)	AUT	11.6	0.800	0.440	Granito fessurato
Raticosa (BO - FI)*	FER	10.4	0.037	—	Arenarie, marne e argille
Gran Sasso (A 24)	AUT	10.2	3.000	0.600	Calcari
S. Lucia (NA - SA)	FER	10.2	1.000	0.250	Calcari
Putifigari (SS)	GRO	9.8	0.070	0.050	Vulcaniti
Zuc del Bor (UD - AUT)	FER	9.3	0.700	0.650	Calcari
S. Stefano (GE - F)	FER	7.9	—	alta	Calcari marnosi, arenarie
M. Olimpino 2 (MI - CO)	FER	7.2	elevata	—	Calcari, conglom., sabbie
Serena (PR - SP)	FER	6.9	media	—	Calcareniti, brecce, flysch
M. La Mula	IDR	6.3	0.200	0.800	Calcari, dolomie
Turchino (GE - AT)	FER	6.4	0.110	0.075	Calcescisti
Satriano (1° salto)	IDR	6.4	elevata	—	Graniti milonizzati
Gran S. Bernardo (T2)	AUT	5.9	scarsa	bassa	Gneiss, scisti
S. Leopoldo (UD - AUT)	FER	5.7	3,600	alta	Calcari
Gravere (TO - FRA)	FER	5.6	elevata	0.013	Calcescisti
Vado Ligure (ITA - FRA)	FER	4.9	0.200	0.050	Dolomie
Colle Croce (ITA - FRA)	STR	4.1	scarsa	bassa	Calcescisti
Col di Tenda (ITA - FRA)	FER	3.2	0.600	0.200	Calcari
Bypass Spriana	IDR	3.2	0.300	0.040	Gneiss, calcari, dolomie
Villeneuve (A 5)	AUT	3.2	0.200	0.001	Calcescisti, carniole
Prè Saint Didier (A5)	AUT	2.8	0.100	0.080	Calcescisti, arenarie
Moro (AN - BA)	FER	1.9	0.080	—	Sabbie, ghiaie
Colle della Scala	FER	1.9	elevata	alta	Calcari
Crocetta (Paola - CS)	STR	1.5	0.022	0.028	Scisti tettonizzati

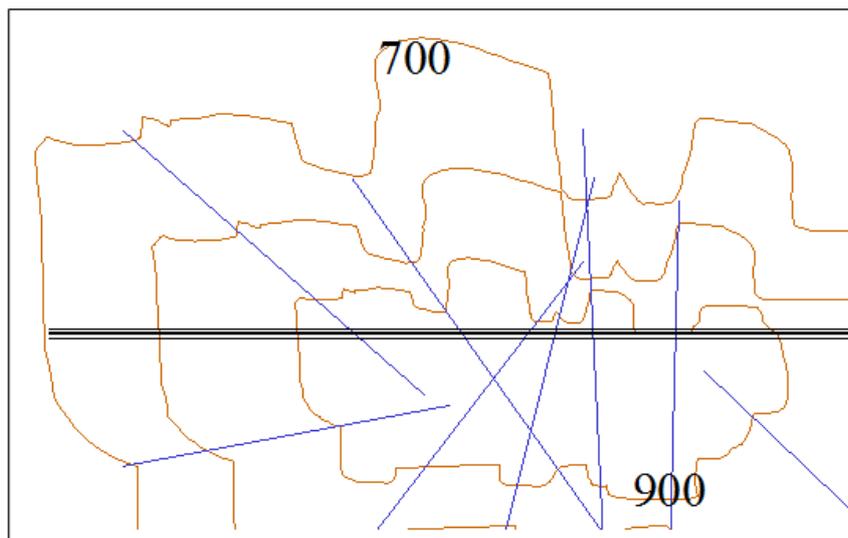
Se invece la galleria si snoda al di sotto della falda gli afflussi idrici possono diventare così rilevanti da rendere difficile l'avanzamento. I grafici riportano i valori di una funzione del dislivello piezometrico per diverse distanze  $x$  e del prodotto fra la permeabilità della roccia  $K$  e il tempo  $t$  dal momento in cui lo scavo incontra il corpo idrico sotterraneo.

E' quindi utile prevedere le venute d'acqua. Questo può essere ottenuto in diversi modi:

- a) dallo studio idrogeologico della struttura dell'ammasso roccioso
- b) da prospezioni appositamente eseguite prima dello scavo
- c) da perforazioni in avanzamento nel corso dello scavo.

### 7.1.1. Studio idrogeologico preliminare

Nelle indagini sulla struttura idrogeologica che vengono compiute in fase di progetto preliminare e di progetto definitivo, devono essere evidenziate le fratture e le faghi di maggiore interesse. Le maggiori fratture corrispondono al reticolato idrografico; generalmente si tratta di avvallamenti non percorsi dall'acqua di superficie se non in occasione delle maggiori precipitazioni. Esse sono tuttavia facilmente rilevabili dalla topografia, come indica la figura.



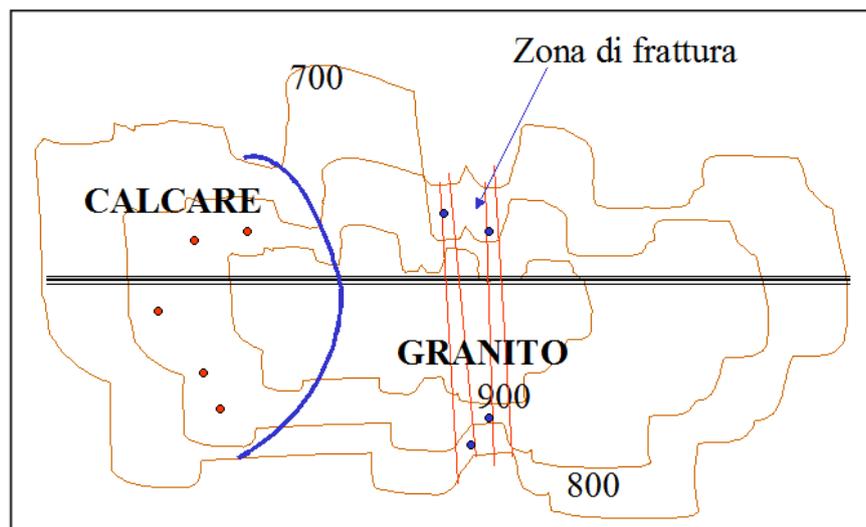
Le discontinuità maggiori sono indicate in blu: è lungo queste fratture che si verifica con maggiore facilità la circolazione idrica profonda, che arriva facilmente alla galleria, che nella figura si trova alla quota 700 m s.l.m.

Come accennato in precedenza, in superficie la roccia si presenta per uno spessore anche ragguardevole ridotta in blocchi, e comunque suddivisa da una fitta rete di fratture aperte che consentono un'ampia circolazione idrica. Nelle rocce calcaree, è su queste discontinuità che si imposta il carsismo, tramite l'ampliamento delle fratture e dei giunti di strato. Lo studio geologico sul terreno può identificare lo spessore di questo livello superficiale, che viene denominato "zona di infiltrazione" e l'andamento del limite con la roccia meno alterata sottostante, che è attraversata solamente dalle discontinuità maggiori ("zona di percolazione"). L'identificazione

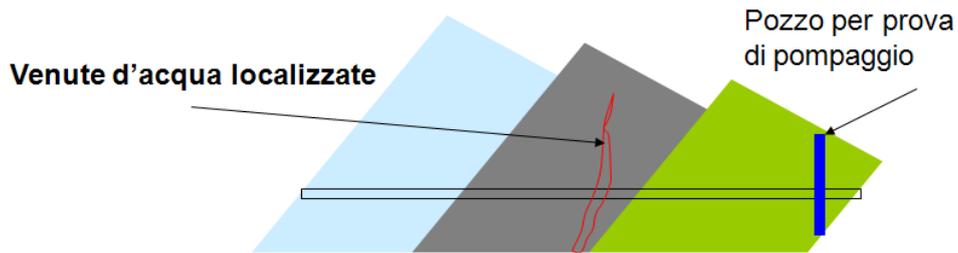
dell'andamento di questo livello superficiale è importante, in quanto in esso avviene la maggior parte della circolazione idrica, e talora la formazione di una vera e propria superficie piezometrica.

E' evidente che, se la galleria incontra questo livello superficiale, è soggetta ai dissesti che l'acqua può produrre: è possibile prevenire tale inconveniente posizionando piezometri che consentano di evidenziare l'andamento della falda; questa operazione è tanto di maggior interesse quanto maggiore è lo spessore dell'acquifero che occupa questa porzione dell'ammasso roccioso. In alcuni casi, le gallerie si sono trovate completamente sommerse dalle acque di falda, il cui drenaggio ha prodotto in superficie notevoli dissesti per l'innescò di fenomeni di abbassamento localizzato del suolo. Al fine di evidenziare l'andamento della superficie piezometrica, i dati ricavati da sondaggi e piezometri possono essere integrati con quelli ricavati da sorgenti.

Nella figura successiva, viene rappresentato il caso in cui l'allineamento delle sorgenti (circoletti rossi) sulla sinistra evidenzia l'affioramento del livello piezometrico alla quota 850 circa (indicando che, almeno per un certo spessore, la roccia a quota inferiore è satura). Nella medesima figura altre sorgenti (circoletti blu) segnati lungo la zona di frattura evidenziano che questa è sede di flusso idrico in quanto zona di maggiore permeabilità all'interno dell'ammasso roccioso.

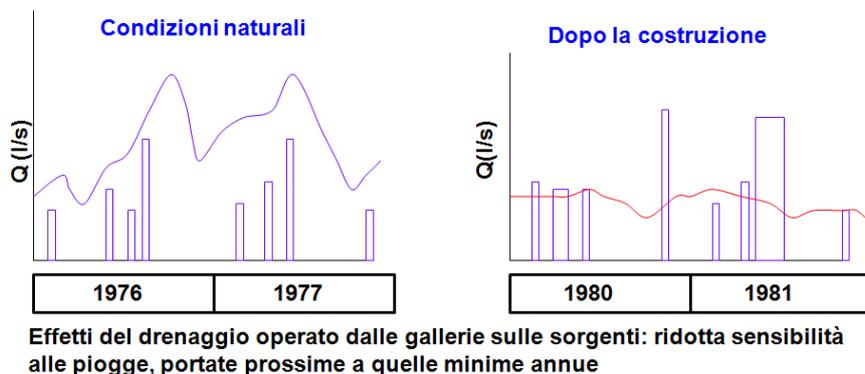


Le definizioni delle modalità della circolazione idrica può essere effettuata, dopo lo studio sul terreno ora descritto, e dopo il posizionamento di piezometri, anche con l'ausilio della geofisica. In particolare le indagini geoelettriche e geosismiche consentono di avere informazioni di buon dettaglio, e di produrre tomografie (cioè rappresentazioni lungo sezioni) dell'andamento dei valori della resistività e delle velocità sismiche. Si rendono necessari anche piezometri profondi, per chiarire l'eventuale presenza di acque sotterranee al disotto della zona di infiltrazione, e per valutare la pressione di queste falde, parametro di rilevante interesse per le gallerie. Campioni delle acque sotterranee possono venire raccolti, per valutare le analogie di composizione con acque di sorgenti o di torrenti, in modo da verificare l'estensione dei corpi idrici sotterranei che alimentano la circolazione profonda. Questi risultati sono facilmente acquisibili e sono spesso molto significativi, considerandola varietà di composizione chimica delle acque.



Le zone interessate da minore resistività e da minore velocità sismica, sono quelle che possono essere costituite da roccia fratturata e aperta, quindi favorevole alla circolazione idrica sotterranea.

Lo studio idrogeologico preliminare, deve accertare la posizione delle sorgenti che possono essere estinte o subire danni dall'escavazione della galleria, e deve compiere una valutazione complessiva della portata delle sorgenti, in modo da stabilire quanto meno il flusso idrico che può arrivare al cavo durante i lavori. E' molto importante prevedere il tratto nel quale si possono avere venute d'acqua, perché in tal modo si può ovviare con un'apposita captazione della risorsa idrica alla eventuale perdita della portata della sorgente. Tale previsione viene effettuata nel corso dello studio idrogeologico preliminare con i dati piezometrici, geofisici e geologici disponibili, e nel corso dello scavo tramite l'utilizzo di pozzi orizzontali, scavati nel fronte di avanzamento, che permettono di conoscere localizzazione, portata, chimismo e pressione delle acque che saranno incontrate dalla galleria.

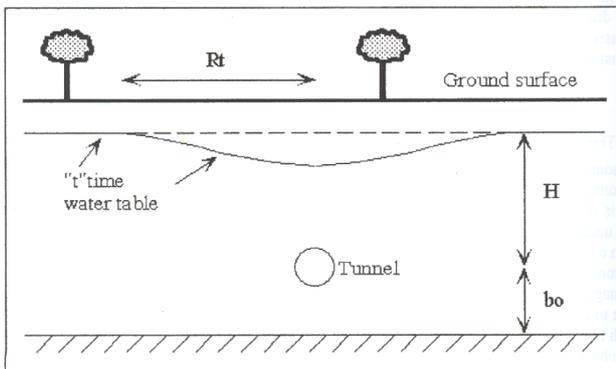


Ai fini predetti è pertanto necessaria una ricostruzione adeguata della struttura idrogeologica locale, al fine di evitare queste conseguenze. Le venute d'acqua devono essere previste, in quanto la mancanza di sistemi di difesa preventivi, al momento dell'incontro con acqua che se in pressione, e dotata di portate considerevoli, produce inconvenienti gravi e non facilmente superabili. Tale previsione deve tenere conto di:

- condizioni statiche durante lo scavo e le operazioni di cantiere ( $\Rightarrow$  l'acqua in galleria rende più oneroso lo scavo e più impegnative le opere di stabilizzazione del cavo),
- condizioni statiche e funzionali durante l'esercizio dell'opera (spinta dell'acqua e/o canalizzazione acque),
- impatto sulle condizioni idrogeologiche dell'ambiente circostante (in particolare sul regime di sorgenti, falde e corpi idrici superficiali),
- fenomeni di subsidenza in seguito a processi di consolidazione.

In generale, l'effetto drenante della galleria sull'assetto idrogeologico dipende da:

- le condizioni di alimentazione dell'acquifero,
  - la permeabilità dell'acquifero,
  - le caratteristiche del sistema di rivestimento della galleria:
- se rivestimento impermeabilizzato  $\Rightarrow$  attenta analisi dell'effetto statico della spinta dell'acqua sul rivestimento
  - se rivestimento drenante  $\Rightarrow$  forti abbassamenti piezometrici (variazioni bilancio idrico e problemi di subsidenza)



Abbassamento piezometrico indotto da una galleria sotto falda.  
( da Lunardi e Focaracci, 2001)

A livello puramente qualitativo, la galleria in fase di costruzione ha un effetto drenante, generando un abbassamento più o meno generalizzato del livello di falda. Se la galleria finita non è ben impermeabilizzata, tale effetto drenante permane nel tempo con effetti non sempre desiderabili, quali:

- l'estinzione di sorgenti e/o pozzi,
- variazioni qualitative della falda,
- modificazioni della vegetazione,
- una variazione nelle condizioni di stabilità dei versanti,
- cambiamenti nel regime e nella qualità delle acque termali,
- variazioni del bilancio idrogeologico a scala di bacino.

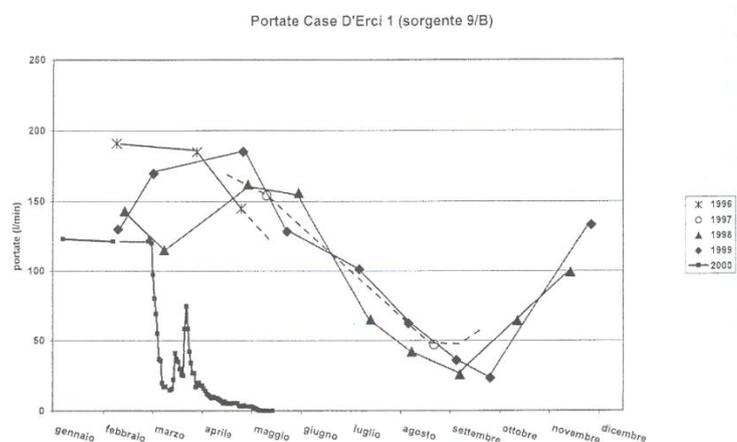
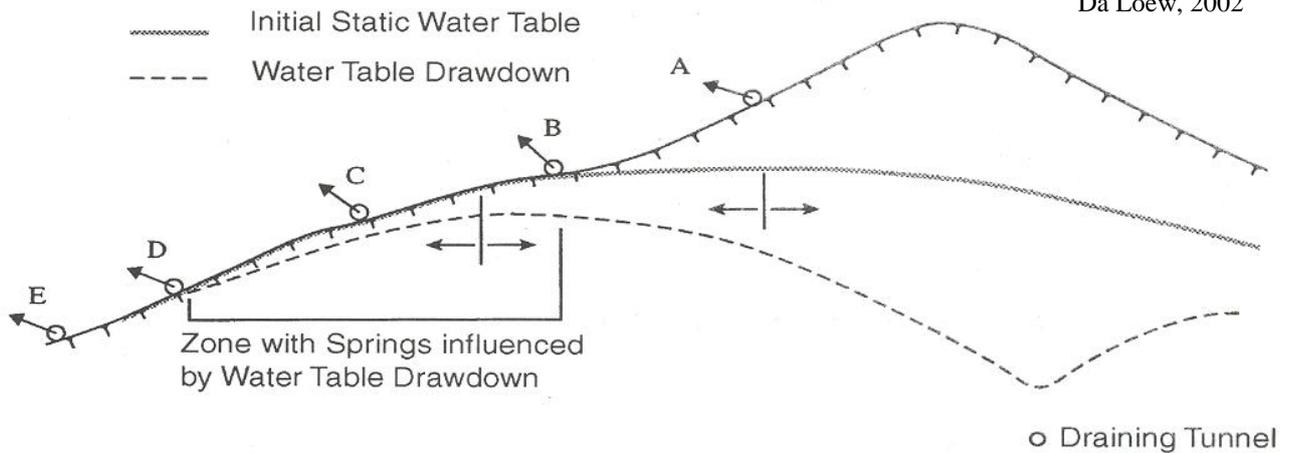
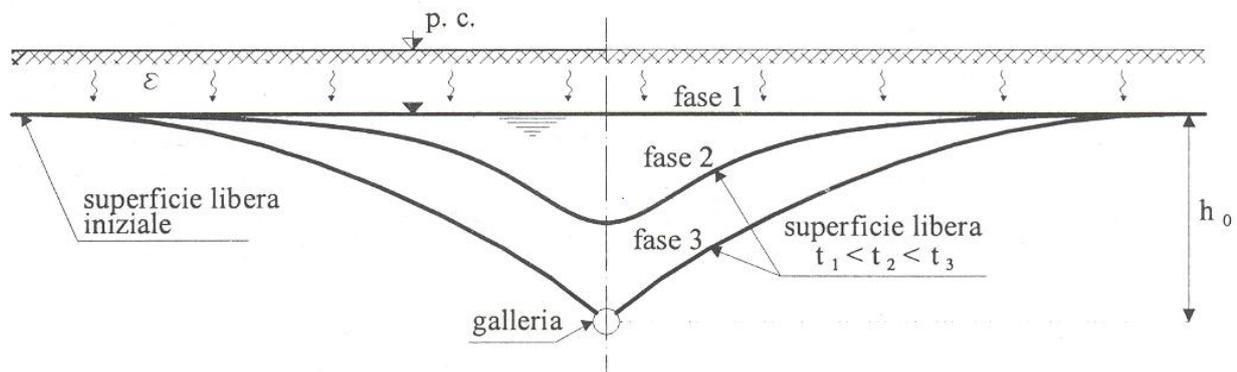


Fig. 3 - Grafico elaborato da CONSIAG riguardante le portate delle sorgenti Case d'Erci 1 (gruppo sorgenti 9/B): viene evidenziato il rapido e marcato declino delle portate delle sorgenti, quelle più direttamente interessate dall'interferenza scavo - acquifero nella galleria di Fiorenzuola, in seguito all'intercettazione della falda contenuta nella formazione marnoso-arenacea a metà marzo 2000.



In dettaglio, i moti di filtrazione che si instaurano nell'intorno della galleria presentano caratteristiche differenti nelle diverse fasi costruttive:

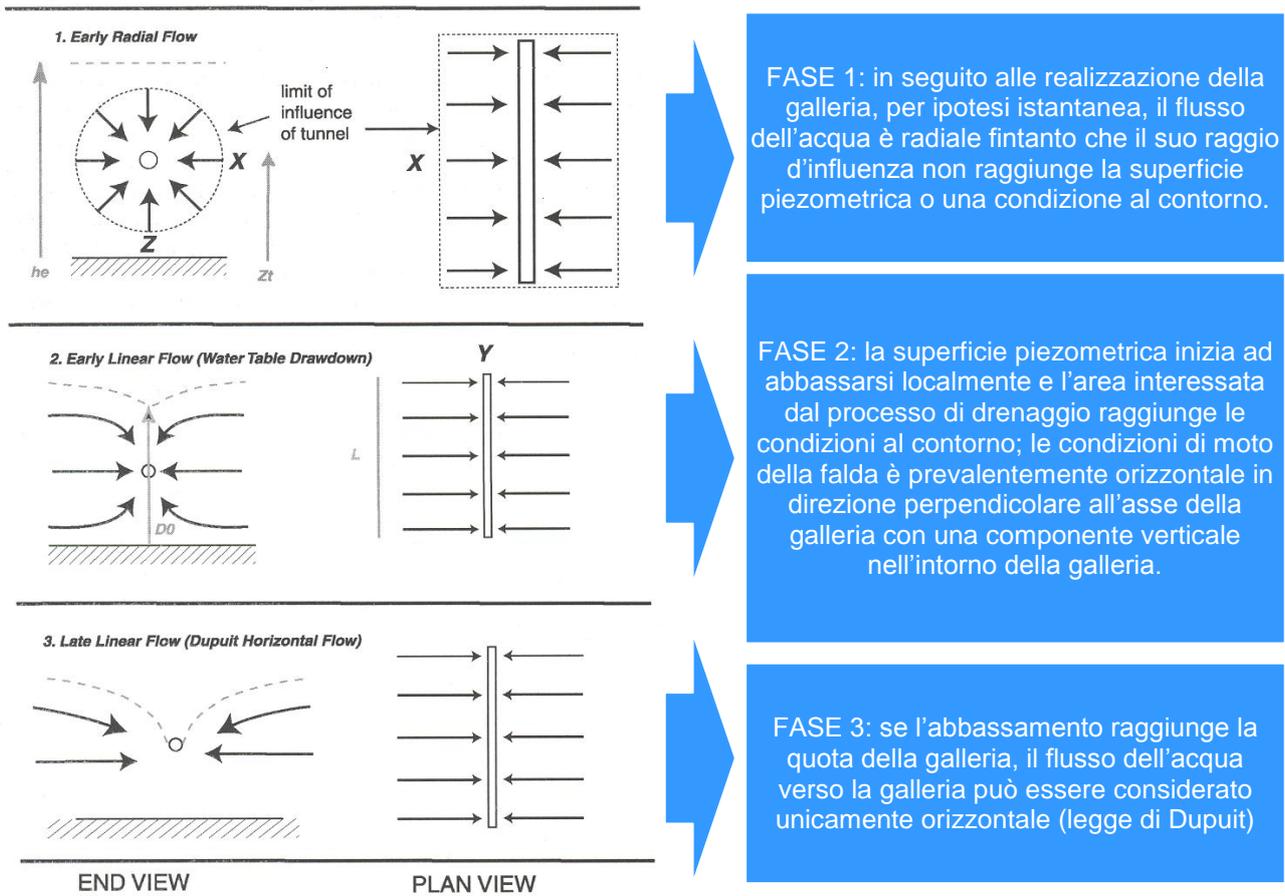


**FASE 1:** ipotizzando che la galleria venga realizzata istantaneamente, inizialmente la superficie libera si mantiene orizzontale.

**FASE 2:** man mano che l'acqua affluisce in galleria, si verifica un avvallamento della superficie piezometrica, di entità progressivamente crescente, con conseguente progressiva riduzione delle portate affluenti in galleria.

**FASE 3:** in assenza di infiltrazioni dal piano campagna, dopo un certo tempo la superficie piezometrica raggiunge la quota della galleria e continua ad abbassarsi interessando lateralmente zone sempre più estese, mentre le portate continuano a diminuire. A un tempo teoricamente infinito l'ammasso roccioso verrebbe completamente drenato fino alla quota della galleria.

L'alimentazione della falda per infiltrazione modifica il decorso temporale del fenomeno e porta ad una situazione di equilibrio corrispondente alla fase 2 o 3 in funzione del parametro  $\varepsilon/k$ .



FASE 1: in seguito alle realizzazioni della galleria, per ipotesi istantanea, il flusso dell'acqua è radiale fintanto che il suo raggio d'influenza non raggiunge la superficie piezometrica o una condizione al contorno.

FASE 2: la superficie piezometrica inizia ad abbassarsi localmente e l'area interessata dal processo di drenaggio raggiunge le condizioni al contorno; le condizioni di moto della falda è prevalentemente orizzontale in direzione perpendicolare all'asse della galleria con una componente verticale nell'intorno della galleria.

FASE 3: se l'abbassamento raggiunge la quota della galleria, il flusso dell'acqua verso la galleria può essere considerato unicamente orizzontale (legge di Dupuit)

FASE 1: flusso radiale

La galleria costituisce una condizione al contorno interna, che può essere generalmente descritta come una condizione a carico costante. In presenza di falda orizzontale e ipotizzando che l'apertura del tunnel sia istantanea, la prima fase (transitoria!) di flusso radiale può essere descritta dalla relazione di Jacob e Lohman (1952):

$$Q(t) = \frac{4\pi kL(h_e - h_t)}{2.3 \log(2.25kLt / Sr^2)}$$

dove  $t$  è il tempo,  $k$  la permeabilità in direzione radiale,  $L$  la lunghezza del tunnel,  $h_e$  il carico piezometrico iniziale,  $h_t$  la quota della galleria,  $S$  il coefficiente di immagazzinamento,  $r$  il raggio della galleria.

Questa equazione è valida fino a che l'effetto drenante della galleria non raggiunge una qualsiasi condizione al contorno.

FASE 2: flusso quasi orizzontale

Quando il processo di drenaggio indotto dalla galleria raggiunge la superficie piezometrica, determinandone un abbassamento il flusso non può più essere considerato radiale. Una stima dell'entità dell'abbassamento e dell'afflusso di acqua in galleria nel transitorio può essere fatta per sovrapposizione di un flusso orizzontale con uno verticale verso il tunnel (Kawecki, 2000):

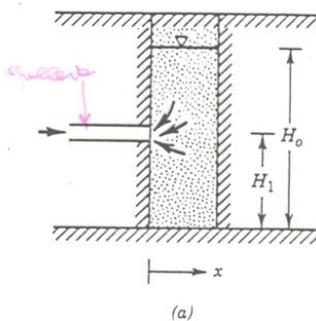
$$h_e - h_t = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \frac{2Q}{Lk_x(D_0 + h_e)} \sqrt{\frac{(D_0 + h_e)k_x t}{2S}} + \frac{Q}{2\pi L \sqrt{k_x k_z}} \sigma_z$$

$$\sigma_z = \ln\left(\frac{D_0}{2\pi r}\right) + 0.25 \ln\left(\frac{k_x}{k_z}\right) - \ln\left(\sin \frac{180^\circ z_t}{D_0}\right)$$

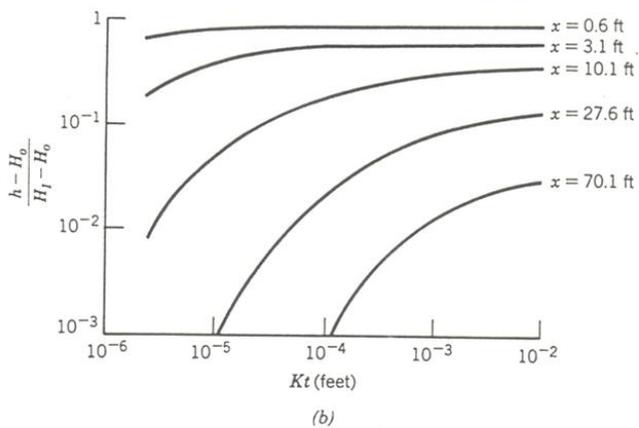
$$D_0 = h_t + \frac{Q}{2\pi L \sqrt{k_x k_z}} \sigma_z$$

dove  $k_x$  e  $k_z$  sono le permeabilità in direzione rispettivamente orizzontale e verticale,  $D_0$  lo spessore locale dell'acquifero,  $z_t$  la quota della galleria rispetto al substrato impermeabile.

### FASE 3: flusso orizzontale (Dupuit)

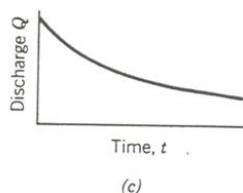


Quando la superficie piezometrica raggiunge la quota della galleria con un andamento circa parabolico e il regime di flusso può essere considerato stazionario, Goodman propone una relazione semplice per collegare la portata affluente alla galleria con l'abbassamento  $D$  del livello piezometrico (inteso come riduzione del livello piezometrico  $H$  rispetto al centro della galleria):



$$Q = \frac{2\pi L(H - D)}{2.3 \log\left(\frac{2H - 2D}{r}\right)}$$

dove  $r$  rappresenta il raggio della galleria,  $L$  la lunghezza del tratto in cui si manifestano le venute d'acqua.

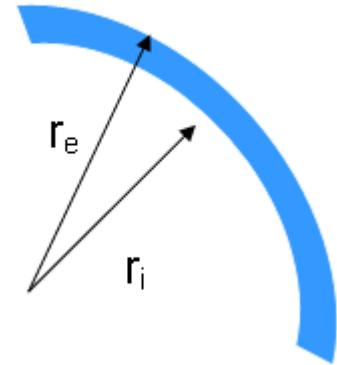


Per valutare l'entità delle venute d'acqua sul fronte di avanzamento, Goodman propone un metodo messo a punto con modelli matematici e semplificato con i grafici di seguito riportati, che permette di calcolare l'andamento delle portate tenuto conto del livello piezometrico iniziale  $H_0$  e dell'altezza del centro della galleria rispetto al substrato indicato dalle sezioni geologiche  $H_1$ , detta  $x$  la distanza dal fronte di scavo dei livelli e  $h$  il livello piezometrico alla distanza  $x$ .

La presenza di un rivestimento all'interno della galleria modifica l'entità della portata affluente:

$$\frac{Q_{riv}}{L} = \frac{2\pi k(H-D)}{\ln(R/r_e)} \left( 1 + \frac{\ln(r_e/r_i) k}{\ln(R/r_e) k_{riv}} \right)^{-1}$$

$$q_{riv} = \alpha_{riv} q \Rightarrow k_{eq} = \alpha_{riv} k$$



Si ricorda la grande importanza dello studio idrogeologico sia per la stabilità del cavo, sia per il mantenimento delle risorse, quando la galleria viene costruita in aree montane dove l'afflusso indesiderato di acque agli scavi può privare molti comuni del sostentamento di acqua potabile danneggiando estesissime aree, come è accaduto nel recente traforo del Gran Sasso.

In questo caso nel nucleo di una sinclinale carbonatica fagliata si è sviluppato un intenso carsismo che ha portato all'accumulo di consistenti risorse idriche, sfruttate dai Comuni della zona: la galleria, intercettando queste risorse, ha privato la regione di oltre 5 m<sup>3</sup>/s, cifra che equivale alla metà dell'intero fabbisogno idrico dell'acquedotto di Milano.

Negli ammassi rocciosi, la circolazione idrica avviene prevalentemente lungo la rete di fratture che intersecano la roccia, le maggiori delle quali sono facilmente rilevabili in quanto corrispondono alla rete idrografica.

## 7.2 Subsidenza

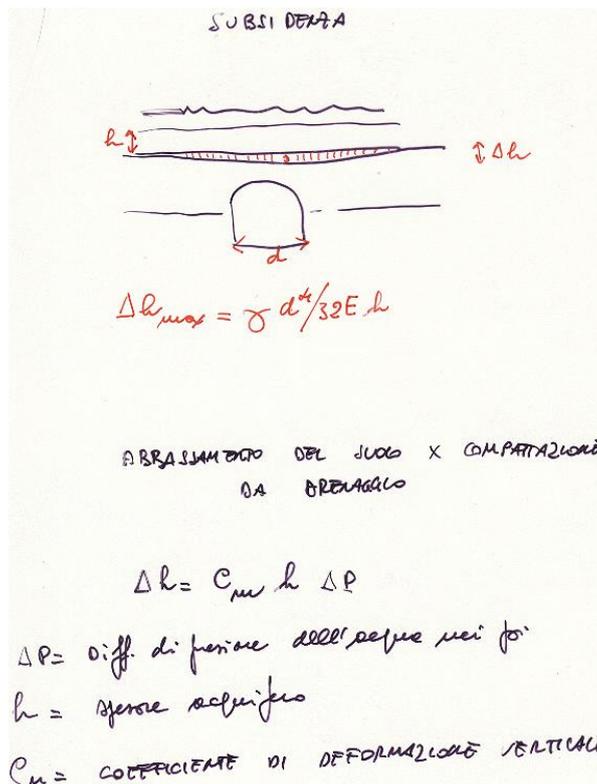
L'apertura di un tunnel determina una deformazione dei terreni e delle rocce tutt'attorno al cavo della galleria stessa. Tali deformazioni possono danneggiare sia la costruzione dell'opera sia eventuali strutture adiacenti (in particolare, durante la realizzazione di gallerie in aree urbane). Le conseguenze ed i danni dipendono dall'intensità del fenomeno, ma anche dalla vulnerabilità degli elementi presenti sulla superficie (edifici, corsi d'acqua, insediamenti industriali, infrastrutture, ecc.). In generale, la risposta del materiale all'apertura della galleria e, di conseguenza, l'entità dei cedimenti, dipende da:

- tecnica di scavo
- dimensioni e geometria dello scavo
- tipologia del materiale

Secondo le teorie esposte, quando avviene lo scavo, e la roccia che sovrasta la cavità è stratificata, se sono presenti strati relativamente fitti, possono avvenire distacchi fra l'uno strato e l'altro, che portano talora a collassi. L'abbassamento massimo di un singolo strato del tetto è uguale a

$$S = \gamma d^4 / 32 E h^2$$

dove d è la larghezza del tetto,  $\gamma$  il peso specifico del terreno, E il modulo di Young, h lo spessore dello strato. L'altezza del terreno coinvolto nel movimento può essere prevista sia con relazioni matematiche, sia con formule empiriche.



### 7.3 Danneggiamento degli edifici e delle gallerie vicine a opera degli esplosivi

Le vibrazioni sono un problema tipico se lo scavo della galleria avviene tramite esplosivo, ma anche in occasione di scavo meccanizzato in roccia si possono sviluppare vibrazioni di una certa entità. La misura in sito delle vibrazioni indotte avviene tramite geofoni, che consentono di valutare le frequenze e le velocità di spostamento. Il terreno, al di fuori del volume frantumato dall'esplosione, si comporta come un mezzo elastico, in cui le onde si propagano come onde sismiche. Il problema principale consiste nella possibilità di sovrapposizione degli effetti di più impulsi successivi

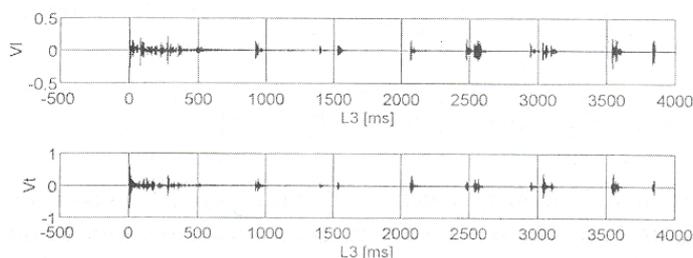


Figura 4 – Esempio di vibrogramma di una volata per lo scavo di una galleria di piccola sezione (in alto componente longitudinale, in basso componente verticale della velocità), registrato a circa 30 m dalla fronte. Si notino i picchi distinti prodotti da ciascuna mina di ogni gruppo, dovuti alla dispersione dei ritardi pirotecnici utilizzati. La durata complessiva è 4 s (Borla, 1996)

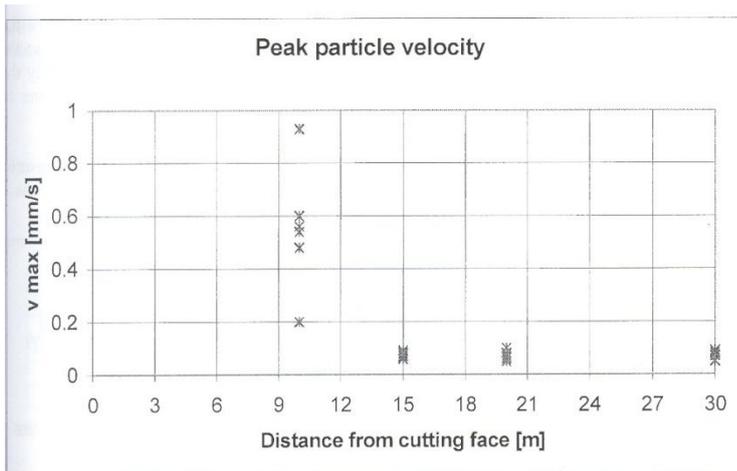


Fig. 3. Peak particle velocity at different distances from cutting face, Porphyroid

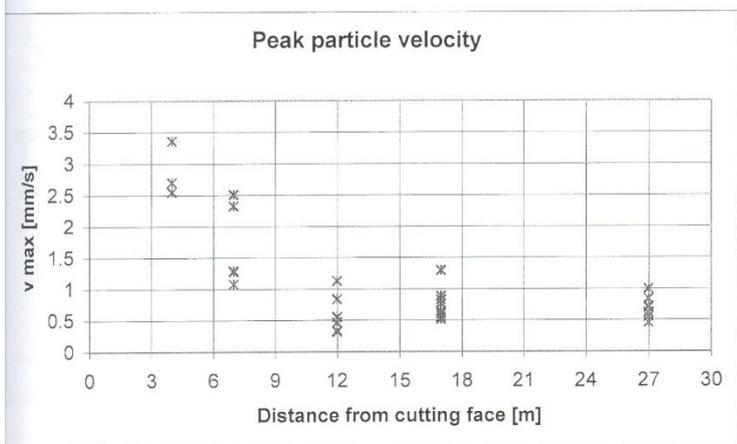


Fig. 4. Peak particle velocity at different distances from cutting face, Dolomite

Nella figura a lato sono illustrate le velocità di spostamento registrate dai geofoni a diverse distanze dal fronte e per diversi materiali durante uno scavo meccanizzato.

### 7.3.1. Correlazioni empiriche per la previsione del fenomeno vibratorio

Esistono correlazioni empiriche tra la distanza del punto di rilevamento dalla sorgente, in funzione dell'intensità del fenomeno (solitamente il valore di picco della velocità particellare) e dell'intensità della sorgente (ad esempio, per vibrazioni indotte dal scavo con esplosivo, l'entità della carica) ⇒ "legge di sito". Nella maggior parte delle correlazioni in uso la sorgente è considerata puntiforme; tale semplificazione non è accettabile su piccole distanze, per le quali è necessario ricorrere a correzioni delle leggi di sito.

A volte può essere opportuno utilizzare correlazioni diverse per le varie direzioni di propagazione. Esistono correlazioni anche tra la distanza e la frequenza prevalente delle vibrazioni nel punto di rilevamento. Potrebbe essere utile utilizzare, inoltre, una correlazione tra la distanza e la durata del fenomeno.

Per valutare l'effetto indotto dagli esplosivi sulle rocce delle aree circostanti, si può considerare che la velocità di picco delle onde principali  $v$  (in mm/s) è proporzionale alla distanza  $R$  (in m) dal punto di scoppio ed alla carica di esplosivo  $Q$  (in kg):

Legge di sito      $\Rightarrow v = k \left( \frac{R}{\sqrt{Q}} \right)^\alpha$

dove  $k$  e  $\alpha$  sono dei coefficienti empirici.

La dipendenza della frequenza  $f$  (in Hz) dalla distanza  $R$  (in m) viene assunta logaritmica decrescente:

$$f = \frac{1}{K_f \log R}$$

dove  $K_f$  è un coefficiente funzione del terreno attraversato dall'onda.

Si osserva che sulla stabilità degli edifici hanno effetto sia la velocità delle vibrazioni  $v$  sia la loro frequenza  $f$ . I valori delle frequenze riscontrabili in pratica variano da 5 a 80 Hz, passando dalle ghiaie sciolte alle rocce compatte.

TIPO DI TERRENO	$K_f$
Sabbie e ghiaie impregnate d'acqua	0.11-0.13
Alluvioni di media compattezza	0.06-0.09
Rocce dure e compatte	0.01-0.03

Le leggi di sito di uso più comune sono le seguenti:

$$USBM (1959): v = K \cdot \left( \frac{R}{\sqrt{Q_{\max}}} \right)^{-B}$$

$$Ambraseys-Hendron (1968): v = K \cdot \left( \frac{R}{Q_{\max}^{1/3}} \right)^{-B}$$

$$Langefors-Kihlström (1958): v = K \cdot \left( \frac{\sqrt{Q_{\max}}}{R^{3/2}} \right)^B$$

$$Indian Standard Institution (1973): v = K \cdot \left( \frac{Q_{\max}}{R^{2/3}} \right)^B$$

$$Davies et al. (1964): v = K \cdot R^{-B} \cdot Q_{\max}^A$$

$$Ghosh-Daemen (1983): v = K \cdot \left( \frac{R}{\sqrt{Q_{\max}}} \right)^{-B} \cdot e^{-\alpha R}$$

$$Ghosh-Daemen (1983): v = K \cdot \left( \frac{R}{Q_{\max}^{1/3}} \right)^{-B} \cdot e^{-\alpha R}$$

$$CMRI (Pal Roy et al., 1993): v = n + K \cdot \left( \frac{R}{\sqrt{Q_{\max}}} \right)^{-1}$$

valida solo nel campo positivo di  $v$ .

Le previsioni fornite dalle leggi di sito sono estremamente incerte per le piccolissime distanze (dell'ordine di 3-4 volte il diametro delle mine). Questa imprecisione può costituire un problema in particolare per le gallerie in aree urbane (cariche di qualche metro di lunghezza a distanza di pochi metri da fondazioni di edifici!).

La correzione prevede di sostituire la carica allungata con una puntiforme, di entità ridotta o aumentata in funzione di un coefficiente  $c$  (generalmente  $> 1$  e  $< 1$  per distanze molto piccole) che dipende dal rapporto tra la distanza del punto raggiunto dal baricentro della carica:

$$v = K \left( \frac{\sqrt{cQ}}{R} \right)^\alpha$$

V è misurata alla distanza R in m dal punto di scoppio della carica di esplosivo di peso W in kg. Gli altri parametri sono coefficienti empirici medi. Ad esempio secondo Holmberg e Persson, la legge di sito corretta assume la seguente forma:

$$v = \frac{200Q^{0.7}}{R^{1.5}}$$

dove V è la velocità (in mm/s) alla distanza R (in m) dal punto di scoppio della carica Q (in kg).

**PER I LIMITI DI ACCETTABILITA' DELLE VIBRAZIONI IN ITALIA NON ESISTONO NORME DI RIFERIMENTO!**

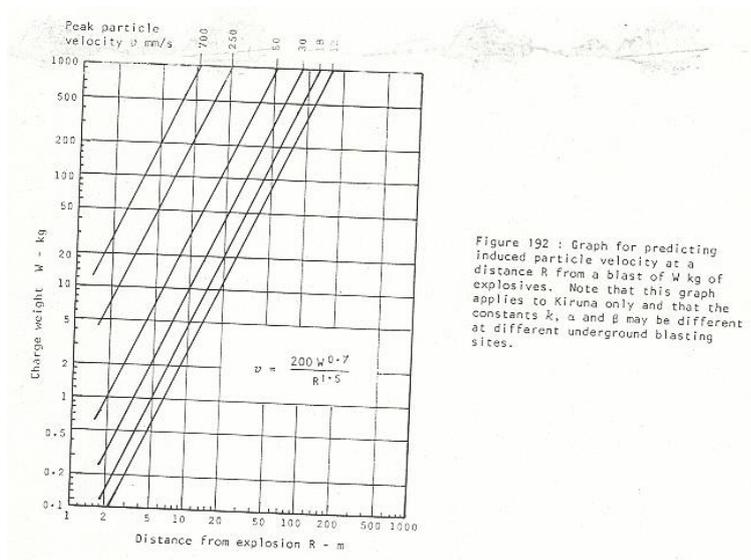
Per le sollecitazioni sulle rocce:

- per  $V > 600$  mm/s  $\Rightarrow$  formazione di nuove fratture in roccia
- per  $300 < V < 600$  mm/s  $\Rightarrow$  propagazione fratture esistenti
- per  $V < 300$  mm/s  $\Rightarrow$  distacchi di scaglie di roccia

Un danno consistente alla roccia si verifica quando:

- $V > 200-600$  mm/s per rocce di qualità scadente
- $V > 600-2000$  mm/s per rocce di buona qualità

LO STUDIO DEVE ESSERE CONDOTTO CASO PER CASO.



Per quanto riguarda gli edifici, vi sono norme internazionali che devono essere prese in considerazione, per le quali si deve tener conto sia del tipo di formazione rocciosa, sia della distanza dall'asse della galleria in cui avvengono le esplosioni, sia della carica di esplosivo.

Secondo la normativa tedesca:  $V < 30-60$  mm/s.

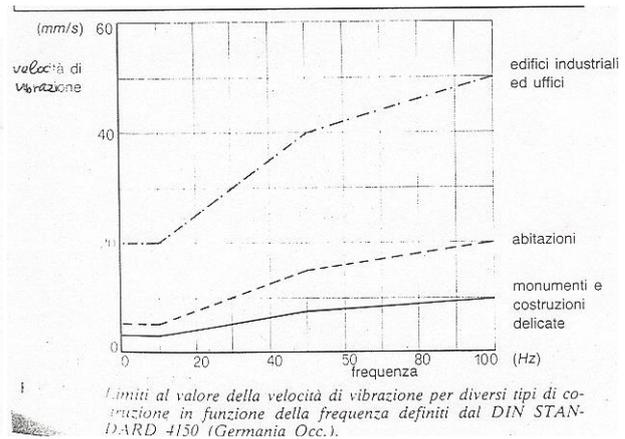
Si osserva che sulla stabilità degli edifici hanno effetto sia la frequenza delle vibrazioni, sia la velocità u con la quale avvengono. In generale, I valori delle frequenze riscontrabili in pratica variano da 5 a 80 Hz, passando dalle ghiaie sciolte alle rocce compatte. Abbiamo quindi valori di f che variano mediamente da valori di 10 Hz per le coperture detritiche, a 80 Hz per roccia compatta.

Le velocità di vibrazione possono essere dedotte graficamente dalle frequenze (tabella riportata) .

Tab. IV.1 - Valori limite della velocità di vibrazione espressi in (mm/s)  
DIN STANDARD 4150 (Germania Occidentale, 1983)

Punti di rilevazione Tipo di struttura	Fondazioni			Pavimento del piano più alto dell'edificio
	< 10 Hz	10 ÷ 50 Hz	50 ÷ 100 Hz	
1) Strutture industriali	20	20 ÷ 40	40 ÷ 50	40
2) Edifici per abitazioni	5	5 ÷ 15	15 ÷ 20	15
3) Edifici di particolare delicatezza	3	3 ÷ 8	8 ÷ 10	8

Con frequenze > 100 Hz possono essere accettati livelli più alti

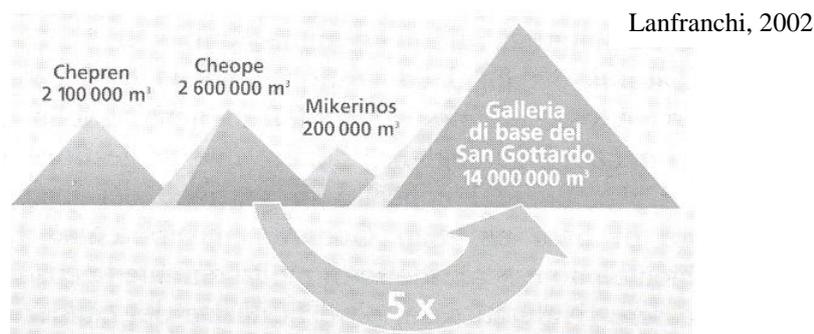


Le vibrazioni che subiscono gli edifici sono di frequenza leggermente minore rispetto a quella delle coperture detritiche. Si ritiene (normativa tedesca DIN standard 4150) che i valori limite delle velocità di vibrazione compatibili e delle frequenze con la sicurezza degli edifici siano esprimibili dalla tabella riportata in figura.

## 7.4 Smarino

Già in fase di progettazione di una galleria è spesso necessario (soprattutto in ambiti territoriali protetti) prevedere e pianificare il riuso del materiale proveniente dalle operazioni di scavo, al fine di minimizzare l'estensione delle aree per lo stoccaggio degli inerti e minimizzare i volumi di materiale da movimentare ( $\Rightarrow$  minore impatto sulla viabilità locale). Infatti, la movimentazione (traffico pesante) di persone e materiali (es. lo smarino) durante la realizzazione di un'opera determina:

- una congestione del traffico, con incremento di incidentalità ed usura delle strade;
- la produzione di rumore;
- la produzione di inquinamento atmosferico;
- la produzione di polveri.



Le soluzioni progettuali in grado di assorbire l'impatto ambientale sono:

- il riuso in loco dei materiali di scavo,
- la rimodellazione ed il riuso di cave abbandonate,
- il potenziamento e la correzione della rete viaria e dei modi di trasporto.

Lanfranchi,  
2002

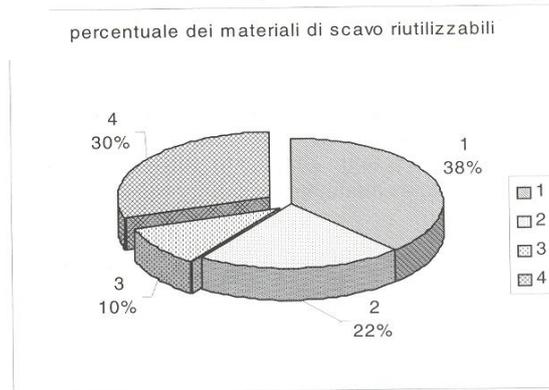


Figura 15 - Stima delle percentuali di materiali di scavo potenzialmente riutilizzabili per inerti. 1=pietre verdi massicce, 2=gneiss, 3=rocce carbonatiche e scistose (scarsamente utilizzabili), 4= serpentiniti e serpentinoscisti (non utilizzabili)

Inoltre, gli inerti ricavati dallo scavo delle gallerie possono essere utilizzati validamente per la costruzione di opere civili, come pietre ornamentali e per l'abbellimento degli edifici. E' invece da evitare l'accumulo dei detriti lungo i versanti e negli alvei, come invece spesso si è verificato.

## 7.5 Inquinamento ambientale (inquinanti aeriformi, polveri, rumori)

In teoria, un tunnel stradale viene costruito per ridurre l'impatto ambientale del traffico (soprattutto in ambiente urbano), in particolare in relazione al rumore ed alle emissioni di inquinanti.

In realtà, nel bilancio costi/benefici si deve tenere conto anche di un incremento locale di tali fattori inquinanti nell'intorno degli imbocchi della galleria, per un raggio di poche centinaia di metri.

La produzione di rumori costituisce uno dei problemi tipici delle gallerie realizzate in aree urbane e può essere risolto tramite l'utilizzo di elementi insonorizzati e materiali fonoassorbenti. Per quanto riguarda, invece, la fase di cantiere è consigliabile l'uso di piattaforme mobili (per evitare ulteriore occupazione di suolo pubblico) con copertura degli impianti (es. degli accessi ai pozzi d'attacco).

Lo studio dell'impatto ambientale di una galleria in termini di emissioni di inquinanti viene generalmente condotta con modelli gaussiani e tridimensionali atti a simulare la dispersione degli inquinanti proveniente, in particolare, dai tunnel stradali. I principali inquinanti da considerare nel progetto di gallerie sono:

- ossidi di azoto (NO e NOx) ⇒ valori medi e concentrazioni di picco,
- solidi sospesi e polveri ⇒ valori medi,
- benzolo ⇒ valori medi.

L'analisi dei livelli di emissione presuppone:

- una modellazione di tutte le possibili fonti inquinanti coinvolte nel progetto col relativo perimetro di emissione, in particolare in relazione ai gas di scarico provenienti dal tunnel  
⇒ stima dei volumi di traffico previsti e della relativa composizione in relazione alle specifiche emissioni (orizzonte di progetto 5-10 anni, tenendo presente un trend crescente per il volume di traffico e decrescente per le emissioni);
- la ricostruzione dei flussi d'aria per tutte le principali condizioni meteorologiche e le direzioni del vento;
- l'analisi della dispersione degli inquinanti;
- lo studio statistico per la determinazione dei picchi e dei valori medi dei livelli di emissione;
- l'analisi dei risultati e la predisposizione degli interventi di mitigazione.

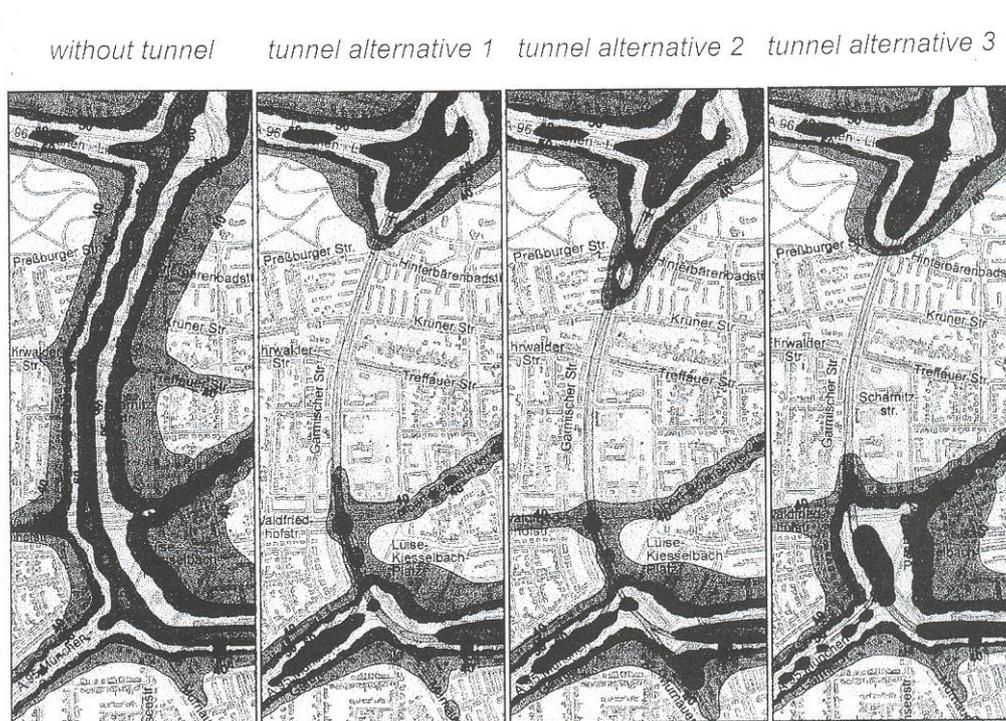


Figure 1: Mittlerer Ring southwest - Annual mean concentration of NO<sub>2</sub>, situation without tunnel and with three different tunnel designs, year 2010.

Nella figura si osserva l'incremento dell'inquinamento atmosferico in corrispondenza di una strada o degli imbocchi di una galleria alternativa, in relazione a diverse soluzioni progettuali (in direzione di direzione, verso e continuità degli impianti di aerazione).

Anche l'uso di esplosivi durante la realizzazione di una galleria può determinare l'emissione di sostanze inquinanti molto simili a quelle già emesse da mezzi diesel e benzina. La differenza tra le due fonti di inquinamento consiste nel andamento delle emissioni nel tempo:

- l'uso di esplosivi determina dei picchi di emissione molto limitati nel tempo;
- i macchinari (benzina e diesel) costituiscono fonti continue nel tempo, anche se con livelli di emissione inferiori.