

Le Gallerie Cenni

Tipologie

Caratteristiche tecniche e potenziali criticità

Specificità del lavoro in sotterraneo

Tecniche costruttive



**Politecnico
di Torino**

Prof. D. Peila

Peculiarità di uno scavo in sotterraneo

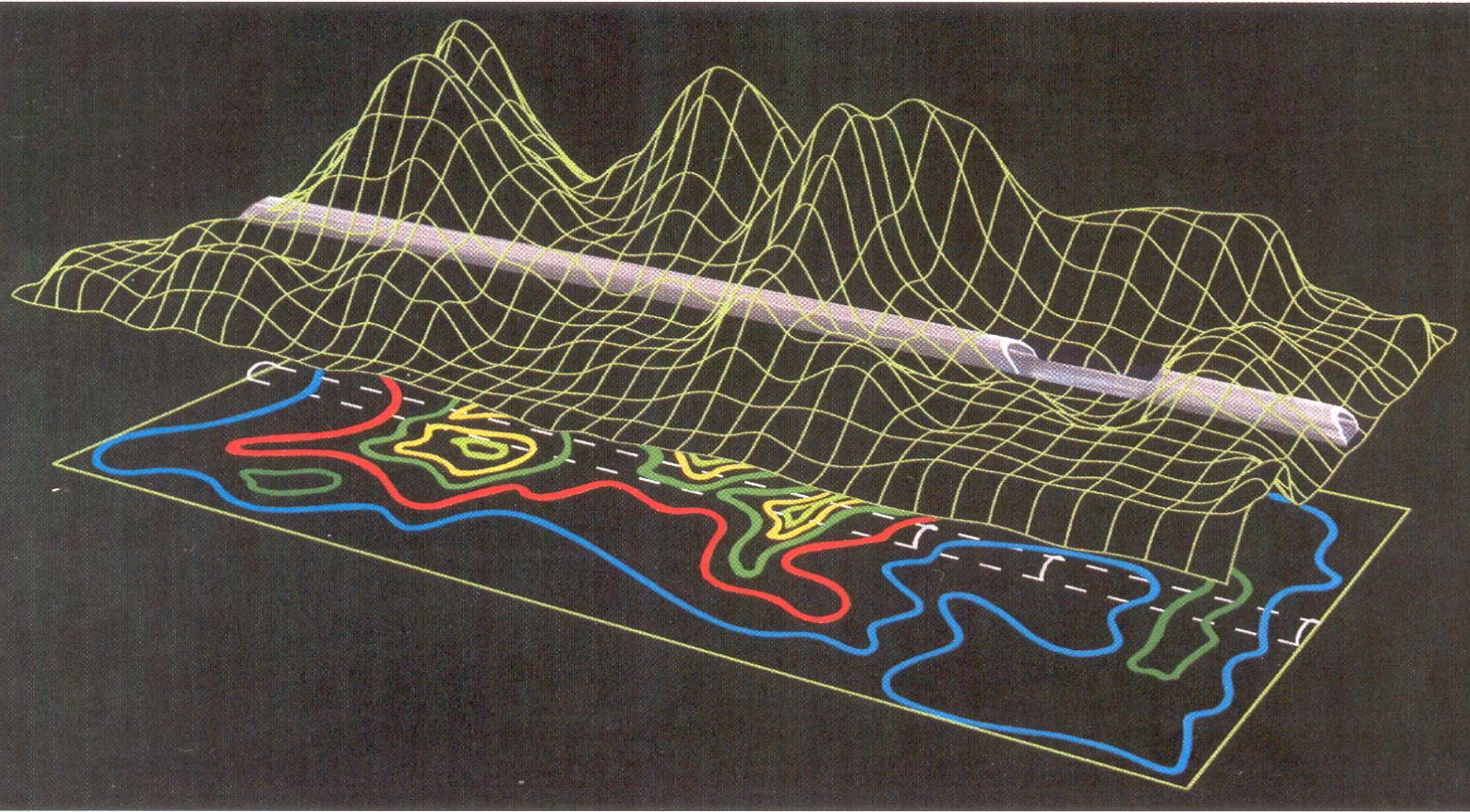


Cortesia P. Lunardi

Peculiarità di uno scavo in sotterraneo

	Costruzioni in superficie	Costruzioni sotterranee
Materiali da costruzione	Le proprietà dei materiali da costruzione sono definite e sono garantite durante il processo di costruzione	Il terreno con le sue incertezze è il vero materiale in cui avviene la costruzione. E' difficile cambiare le proprietà dei terreni (anche se non impossibile) Le strutture di sostegno interagiscono con gli ammassi naturali.
Carichi agenti	I carichi agenti sono chiaramente definiti	I carichi sono definiti mediante assunzioni e stime. Il processo costruttivo influenza i carichi agenti sia in modulo che in direzione

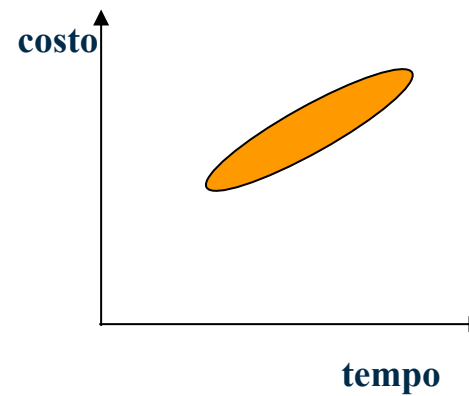
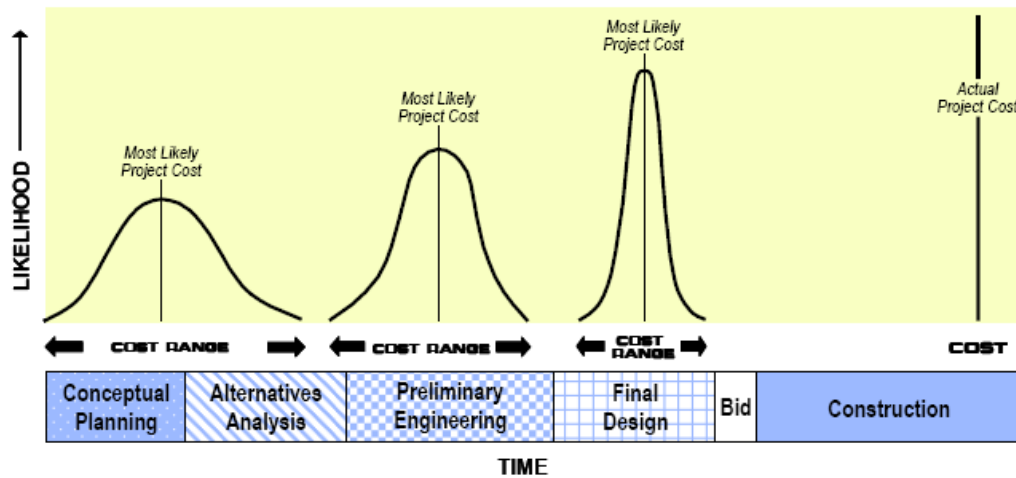
Importanza della conoscenza della geologia



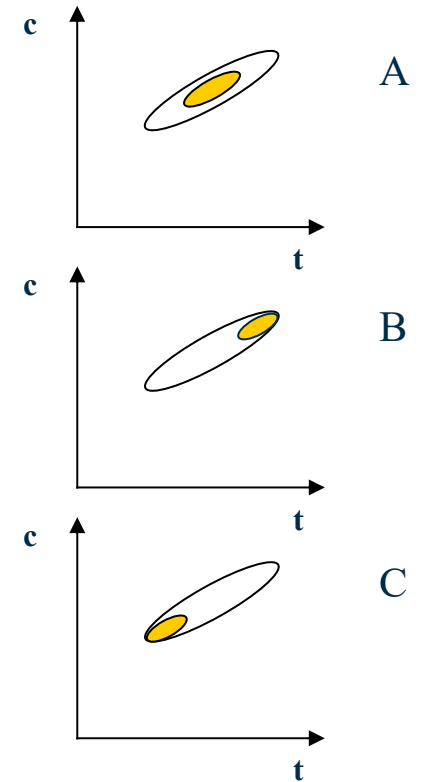
Criticità
specifiche del
sottterraneo

Importanza della conoscenza della geologia

- Per un corretto progetto è fondamentale
- un corretto sviluppo delle indagini
 - la risk analysis



**Miglioramento
della conoscenza
con le indagini**



Vari tipi di instabilità (hazards)

IMPATTO SULLA
SICUREZZA



ROCK FALL



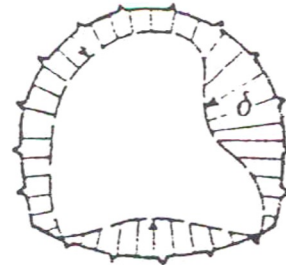
BREAK DOWN



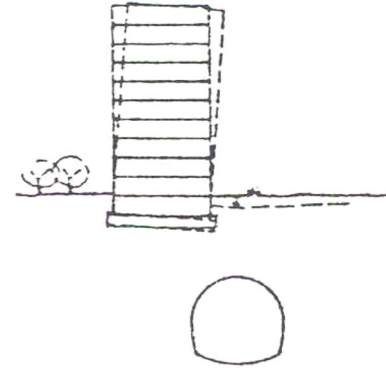
COLLAPS

STABILITA'
LOCALE

IMPATTO SUGLI
SPOSTAMENTI



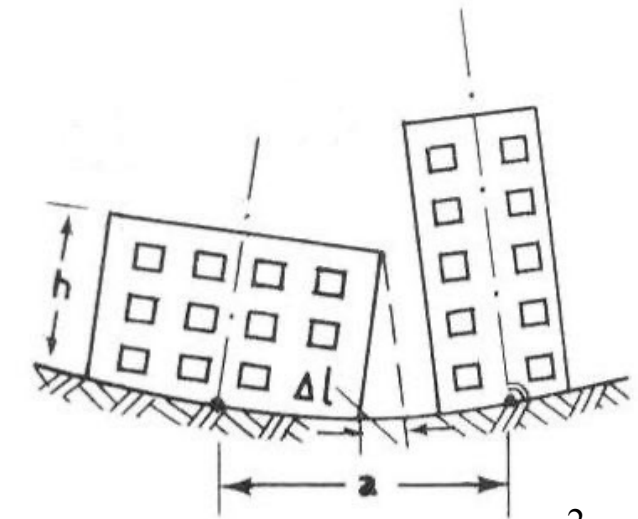
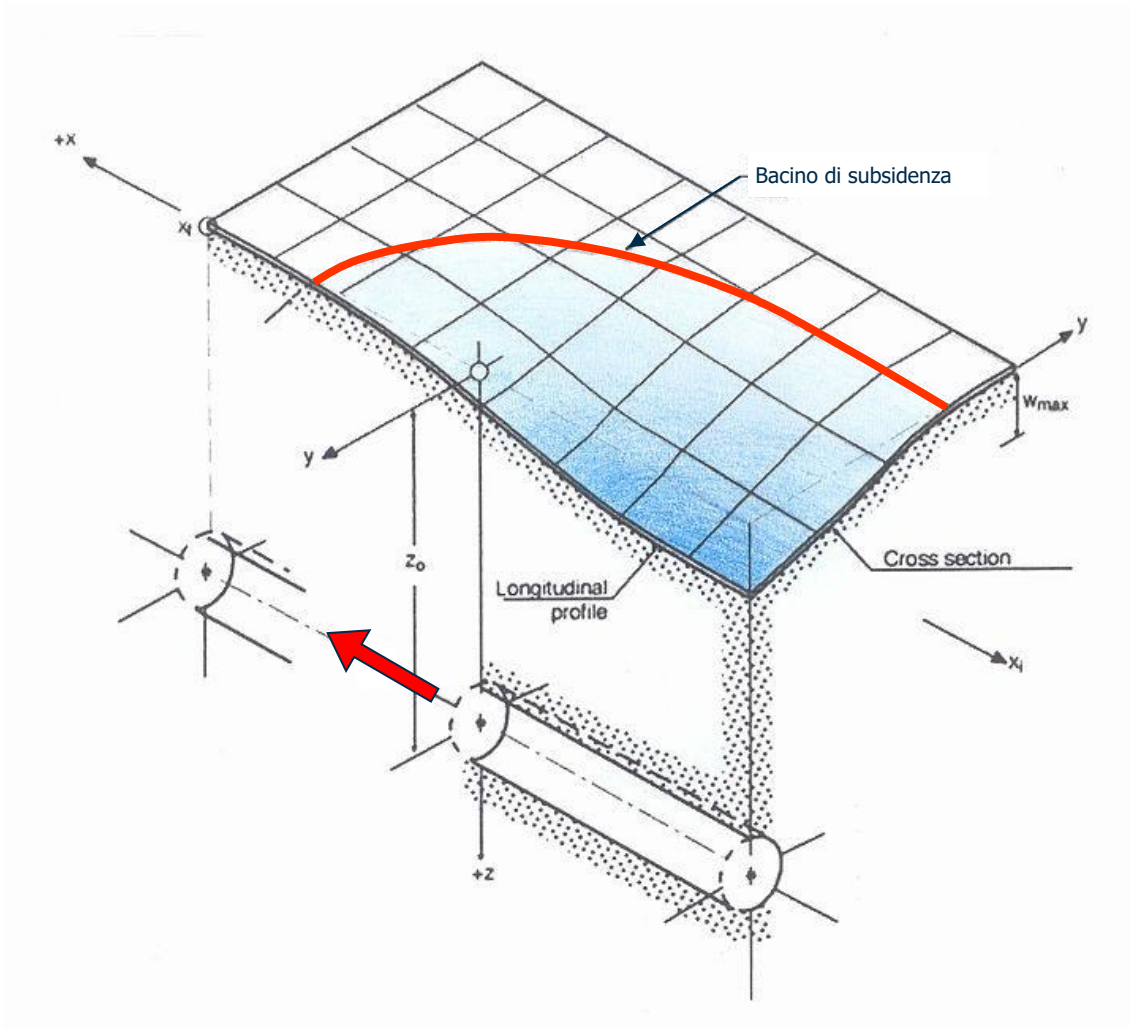
CLOSURE



SETTLEMENTS

STABILITA'
GLOBALE



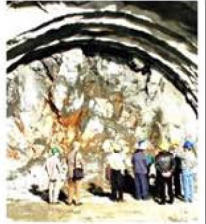

















Esempio dell'influenza di una galleria sulla superficie concetto di subsidenza



$$S(x) = w_{\max} \cdot e^{-\frac{x^2}{2i^2}}$$

cedimenti del soprassuolo
durante lo scavo di una
galleria superficiale

Hazards per gallerie lunghe e profonde

		ROCK MASS QUALITY				
		MASSIVE	BLOCKY	HEAVILY JOINTED	CRUSHED	SHEARED
RATIO OF ROCK MASS STRENGTH / IN SITU STRESS <i>Low stress</i>	STABLE		STRUCTURAL FAILURE 	UNSTABLE FACE 	MARGINAL STABILITY 	UNSTABLE FACE 
	SPALLING		BLOCK FAILURE 	MARGINAL STABILITY 	IMPROVED STABILITY 	MILD SQUEEZING 
	SEVERE SPALLING		STABLE 	IMPROVED STABILITY 	MILD SQUEEZING 	SQUEEZING 
	ROCKBURST		STRESS FAILURE 	FACE COLLAPSE 	SQUEEZING 	SEVERE SQUEEZING 
<i>High stress</i>						

(Hoek, 2010)

Le condizioni di stabilità di una galleria sono controllate da

Proprietà geomeccaniche degli ammassi rocciosi

La condizioni di stabilità sono controllate dalla resistenza dell'ammasso se confrontata con lo stato tensionale naturale ed indotto e dal comportamento del materiale.

Stato tensionale

Forma della galleria

La forma della galleria influenza punti e l'entità delle tensioni nell'intorno del vuoto. La geometria può essere rettangolare (ottimizzazione dell'uso ma con problem di concentrazioni di sforzo) a circolare che ha la migliore risposta a condizioni di carico idrostatico a policentrica che è una via di mezzo tra le due

Dimensioni della galleria

Influenza l'entità delle tensioni al contorno e delle tipologie e tecnologie dei sostegni che sono più complesse e difficili da installare

Metodo costruttivo

Influenza la sequenza di messa in opera dei sostegni, e dei rinforzi e quindi la gestione degli spostamenti

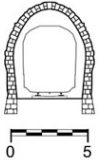
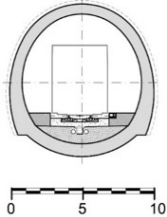
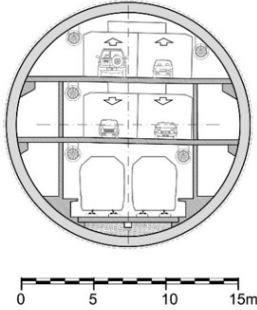
Presenza di acque sotterranee

L'interferenza dello scavo con le falde sotterranee influenza i cariche agenti sui sostegni a lungo termine, induce moti di filtrazione durante lo scavo, può indurre trasporti di materiale nello scavo, interferisce con le operazioni di scavo e con gli aspetti ambientali e con le problematiche di sicurezza del cantiere

Geometria delle gallerie

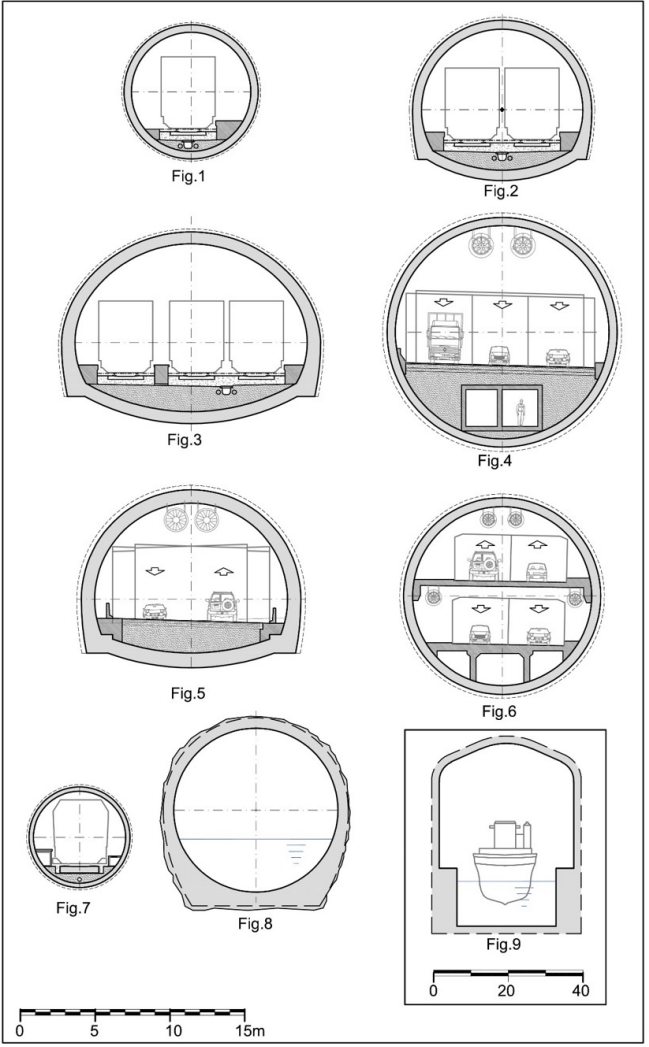


Sezioni tipiche

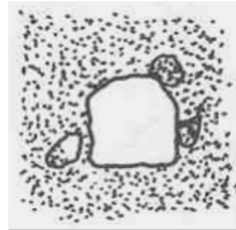
Project name	Tunnel function	Section peculiarity	Section sketch
Porrettana Railway line (1864) Bologna–Florence Italy	Railway tunnel	Horseshoe shape tunnel without invert	
High-Speed Railway Tunnel Milan–Genoa Italy	Railway tunnel	Polycentric shape tunnel with invert	
3 Kat Tunnel Istanbul Turkey	Mixed traffic metro & road tunnel	Circular shape tunnel	

Geometria delle gallerie - esempi

#	Project name	Tunnel function	Tunnel excavation methodology	Inner section data	Structural section data
1	Italian State Railway Standard Codes	Railway tunnel Single track V ≤ 200km/h	TBM	Radius 4.0m	Excavation area 65m ² Excavation radius 4.55m Segment thickness 40cm
2	Italian State Railway Standard Codes	Railway tunnel Double tracks V ≤ 200km/h	Conventional	Radius (crown and sidewalls) 5.4m	Excavation area 112m ² Preliminary support 20cm Final lining (crown and sidewalls) 60cm Final lining (invert) 70cm
3	Virgolo Tunnel Bolzano - Italy	Railway tunnel Three tracks	Conventional	Radius 8.3m (crown), 5.4m (sidewalls)	Excavation area 185m ² Preliminary support 20cm Final lining (crown and sidewalls) 80cm Final lining (invert) 80cm
4	S. Lucia Tunnel Florence - Italy	Highway tunnel	TBM	Radius 7.15m	Excavation area 201m ² Excavation radius 8.0m Segment thickness 55cm
5	Santa Caterina Tunnel Sicily - Italy	Road tunnel	Conventional	Radius 6.45m (crown and sidewall)	Excavation area 154.0 m ² Preliminary support 30cm Final lining (crown and sidewalls) 90cm final lining (invert) 100 cm
6	Eurasia Tunnel Istanbul -Turkey	Double deck road tunnel	TBM	Radius 6.0m	Excavation area 147m ² Excavation radius 6.85m Segment thickness 60cm
7	Green Line Doha - Qatar	Metro tunnel	TBM	Radius 3.1m	Excavation area 39m ² Excavation radius 3.5m Segment thickness 30cm
8	Gibe III Hydro-electric Project Ethiopia	Hydraulic power tunnel	Conventional	Radius 5.5m	Excavation area 140m ² Preliminary support 10cm Final lining (crown and sidewalls) 70cm Final lining (invert) 80cm
9	Stad Ship Tunnel Norway	Boat tunnel	Conventional	Height 49m Width 36m	Not available

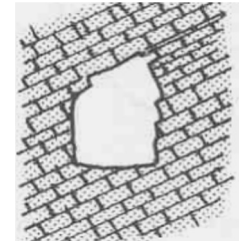


Comportamento degli ammassi geologici e l'impatto sugli scavi sotterranei



Overburden soil or heavily weathered rock

squeezing and flowing ground, short stand-up time.



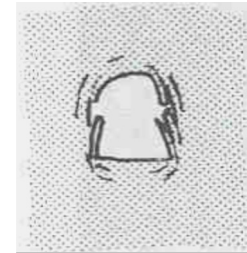
Blocky jointed rock partially weathered

gravity falls of blocks from roof and sidewalls.



Massive rock with few unweathered joints

no serious stability problems.

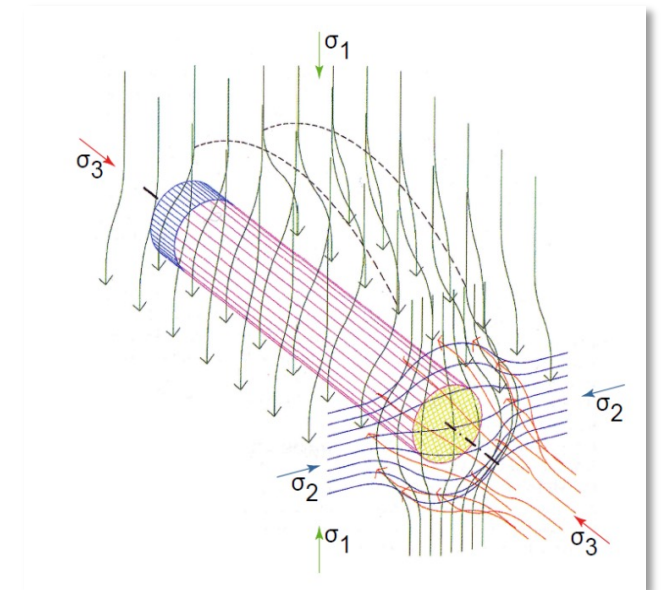
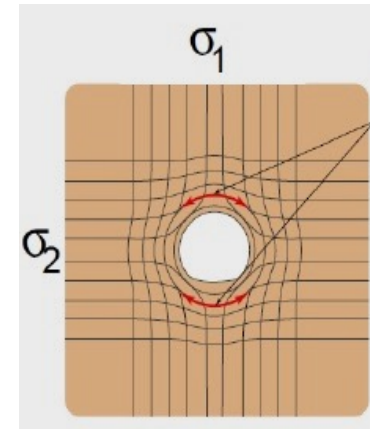
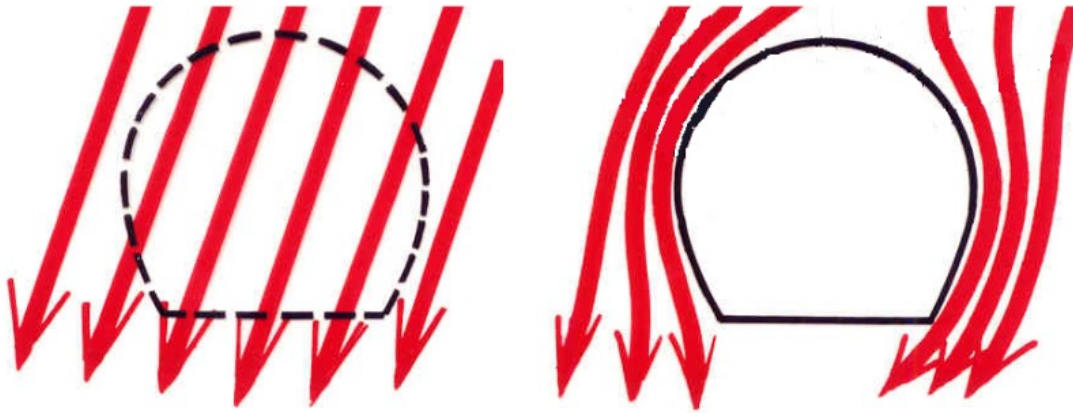


Massive rock at great depth
stress induced failures, spalling and popping with possible rockbursts.

Ground geotechnical quality

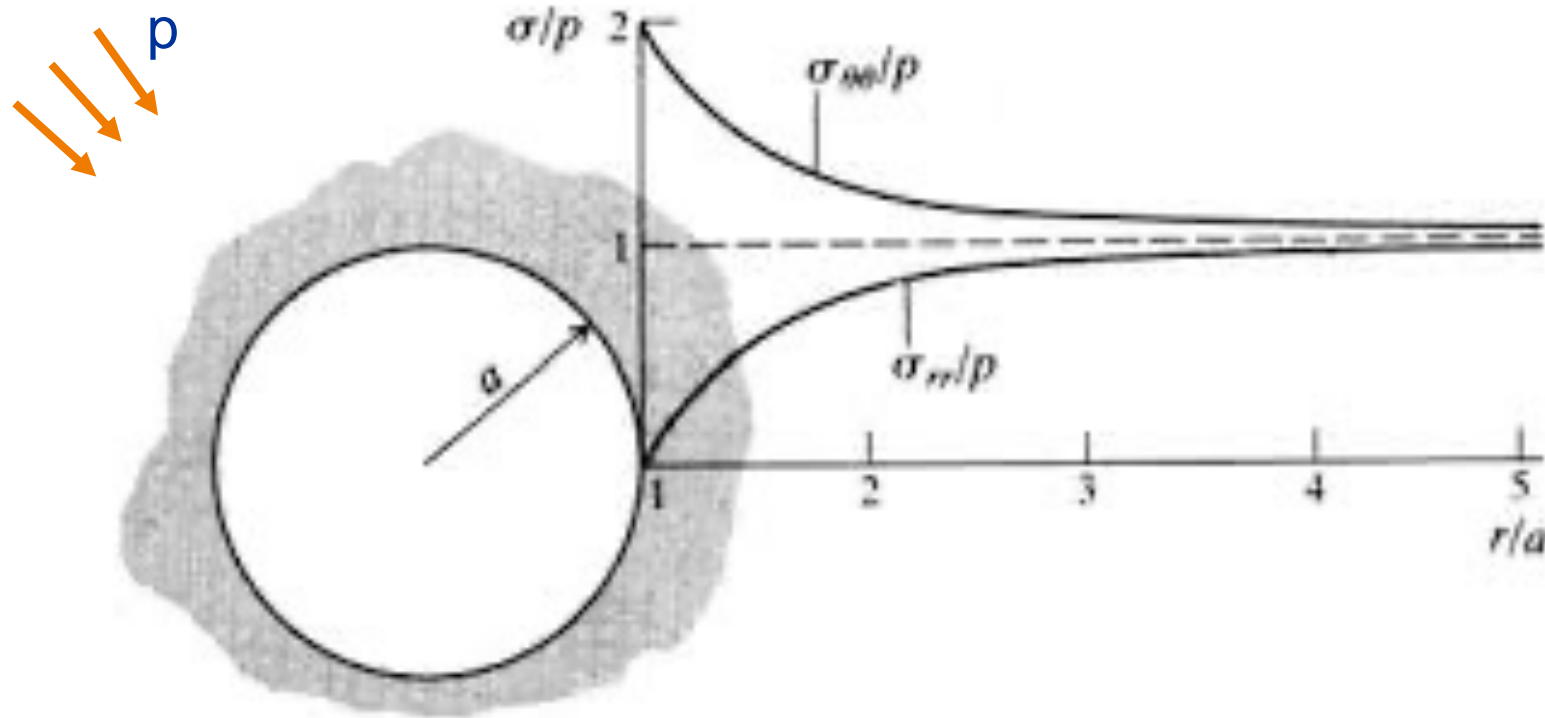
(Hoek and Brown, 1980)

Lo scavo di una galleria induce una perturbazione dello stato tensionale nell'ammasso

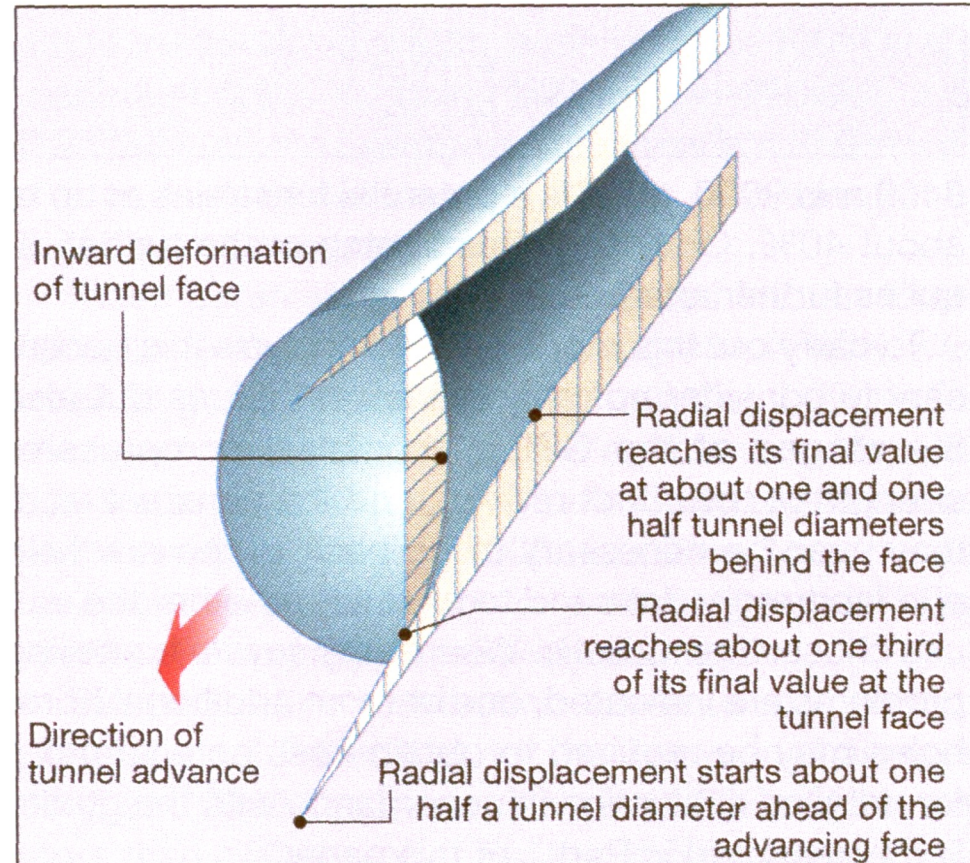
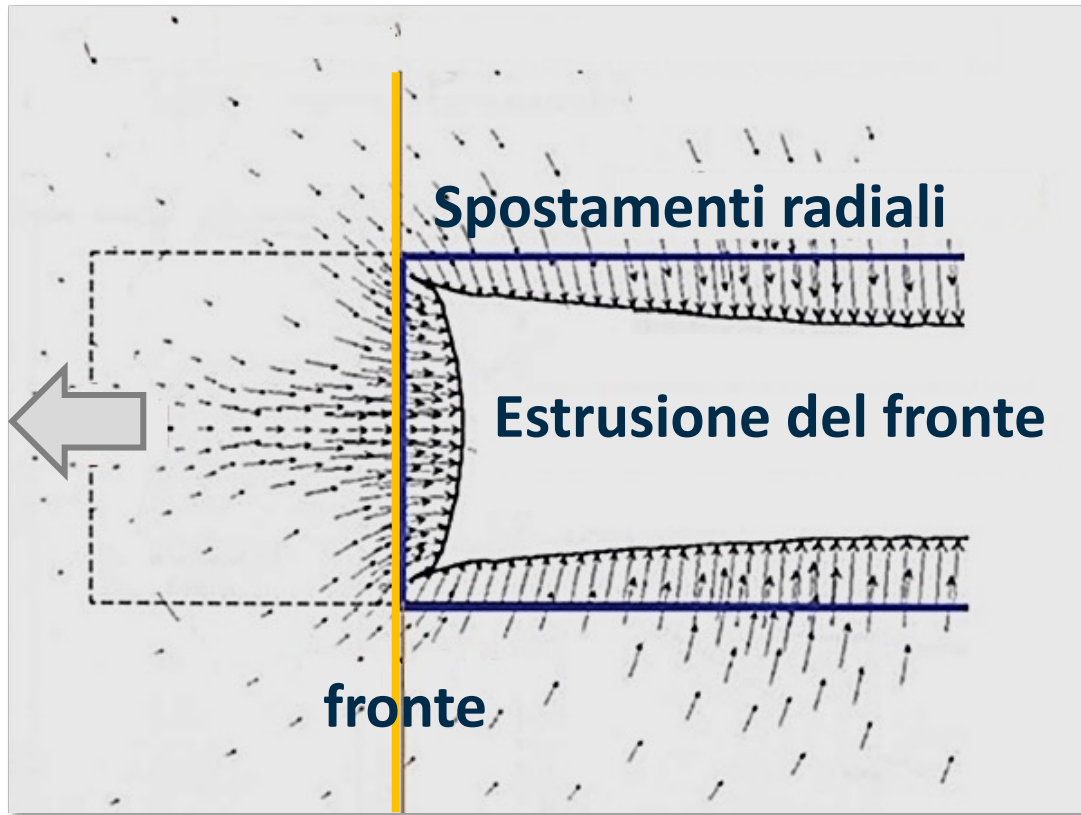


Cortesia Lunardi

Lo scavo di una galleria induce una perturbazione dello stato tensionale nell'ammasso

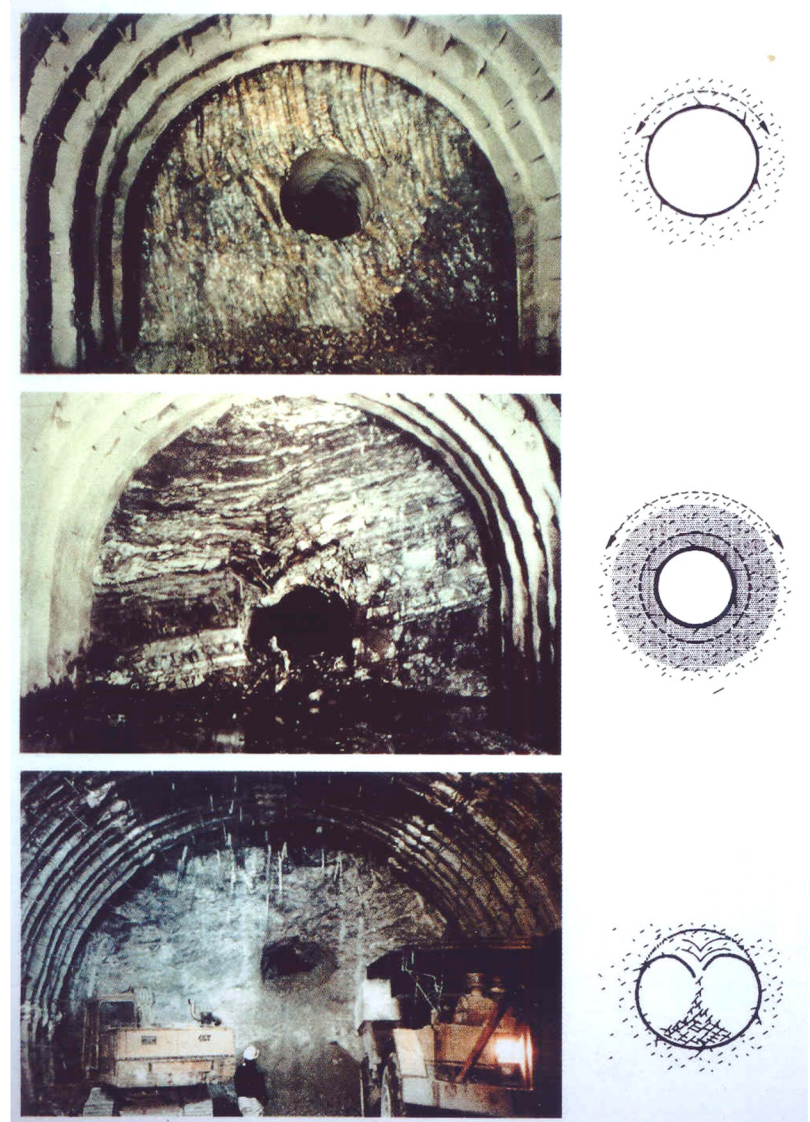


La geometria di una galleria durante lo scavo è tridimensionale e come tale deve essere studiata



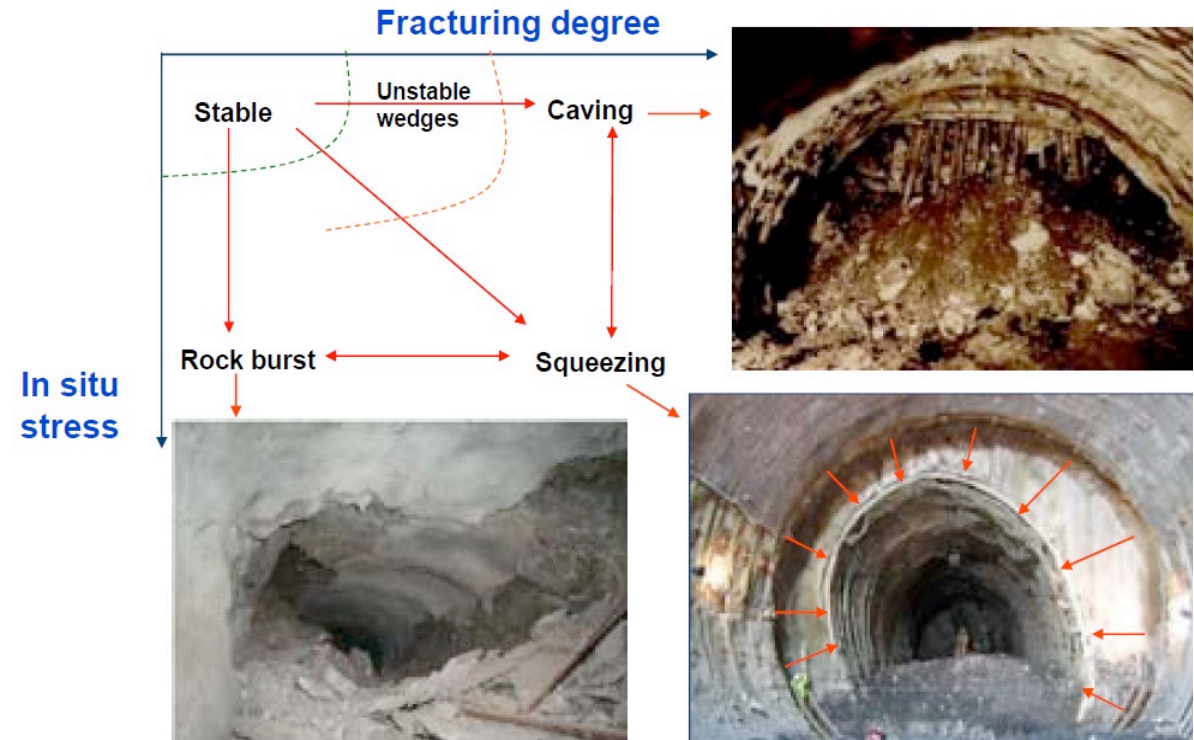
Hoek, 2002

Lo scavo di una galleria induce una perturbazione dello stato tensionale nell'ammasso che interagisce con l'ammasso il quale reagisce in relazione alle proprie caratteristiche di comportamento meccanico

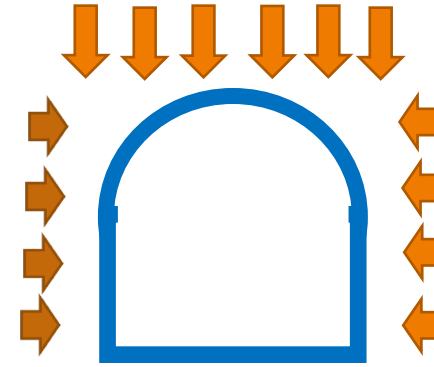
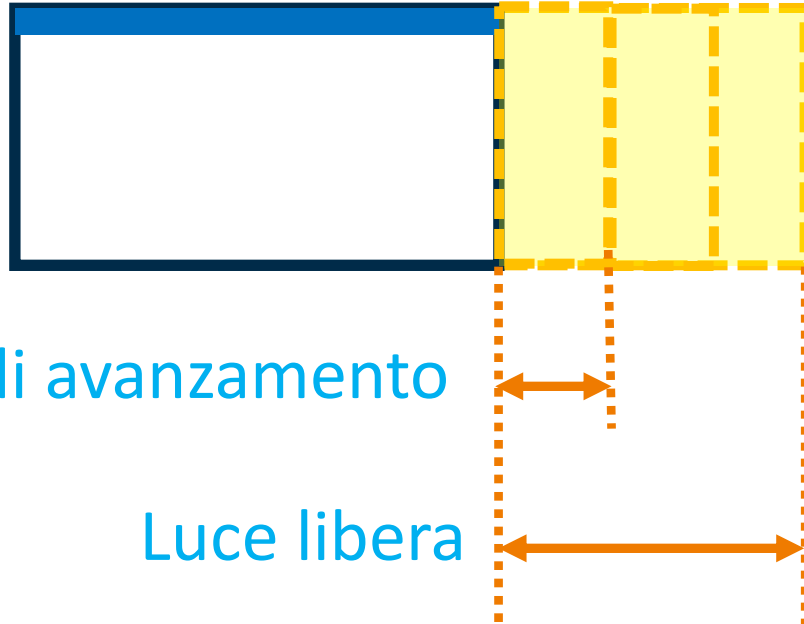


Lunardi, 2000

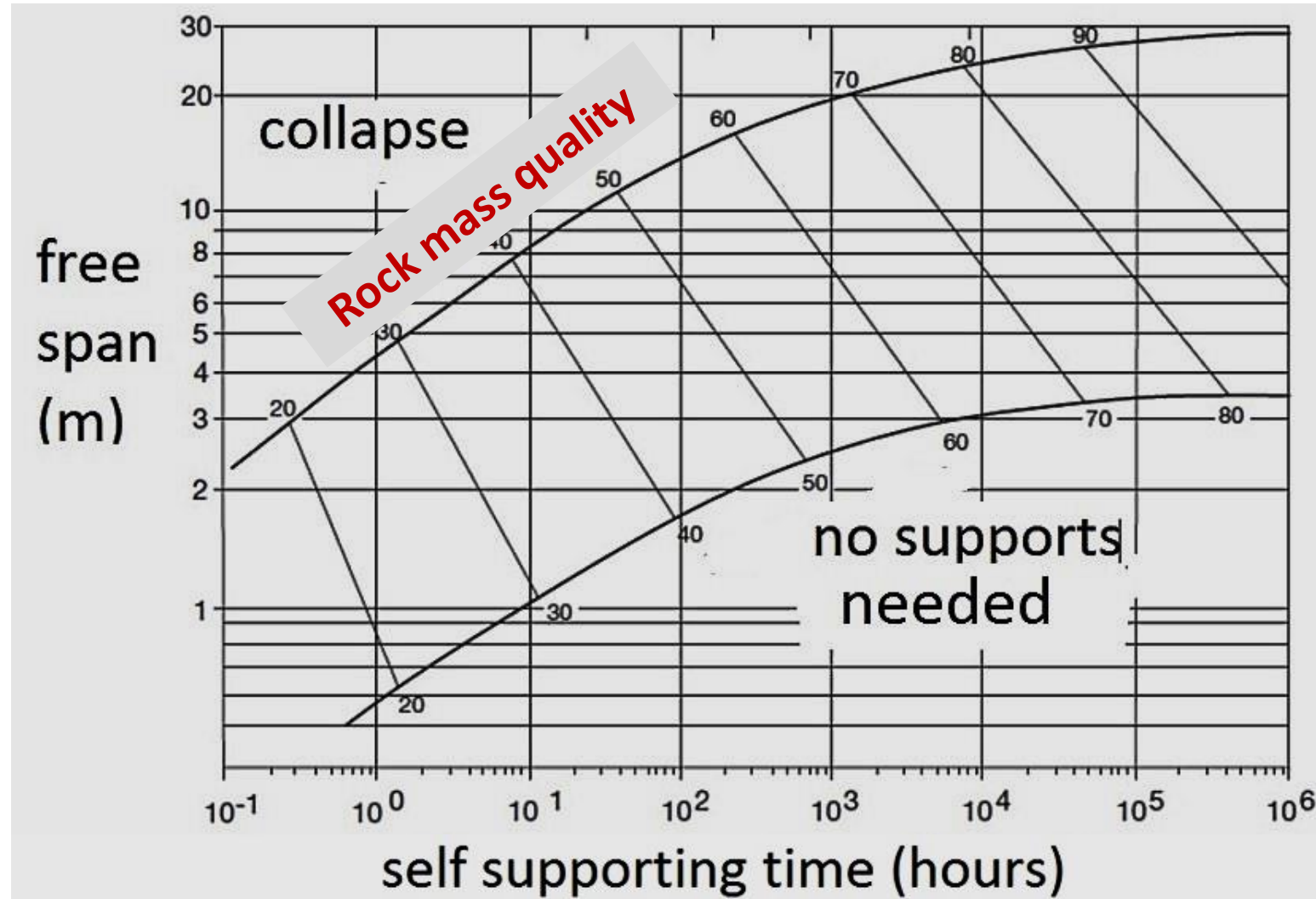
Le condizioni di instabilità che possono influenzare lo scavo di una galleria dipendono dal tipo di terreno e dello stato tensionale naturale pre-esistente



Concetti di luce libera e tempo di autoportanza

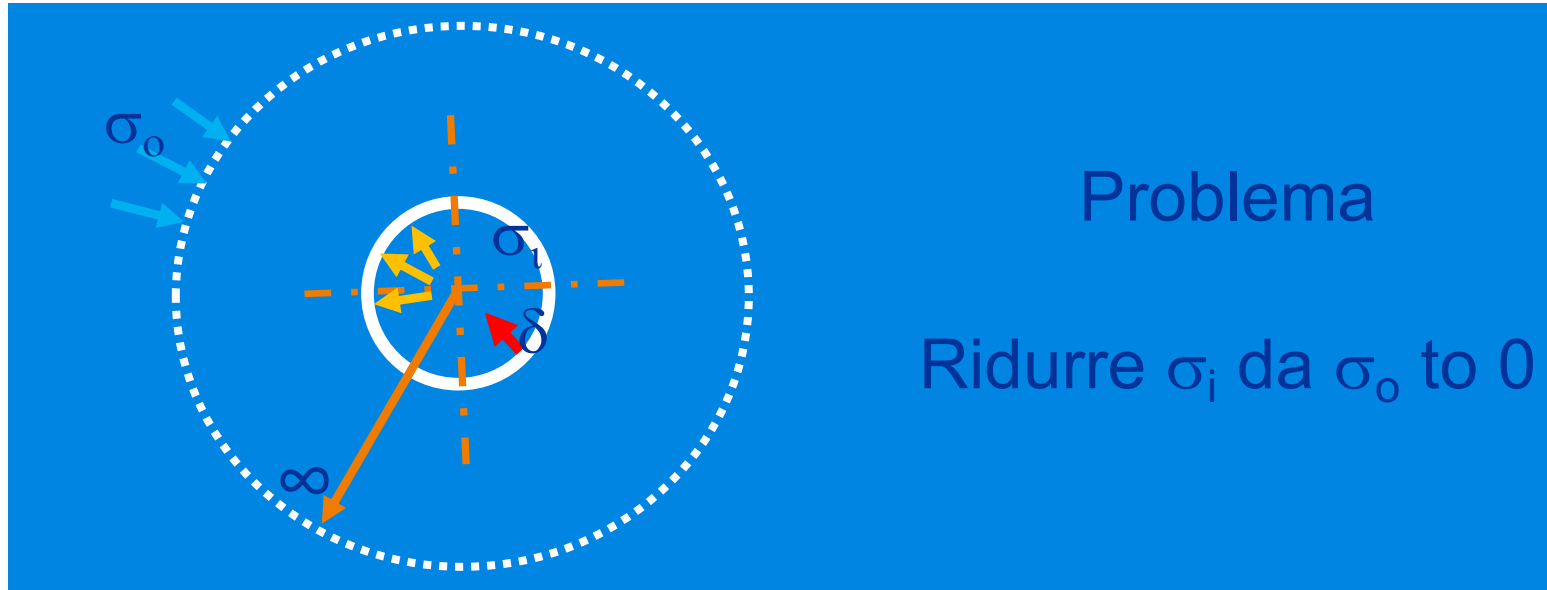


Concetti di luce libera e tempo di autoportanza



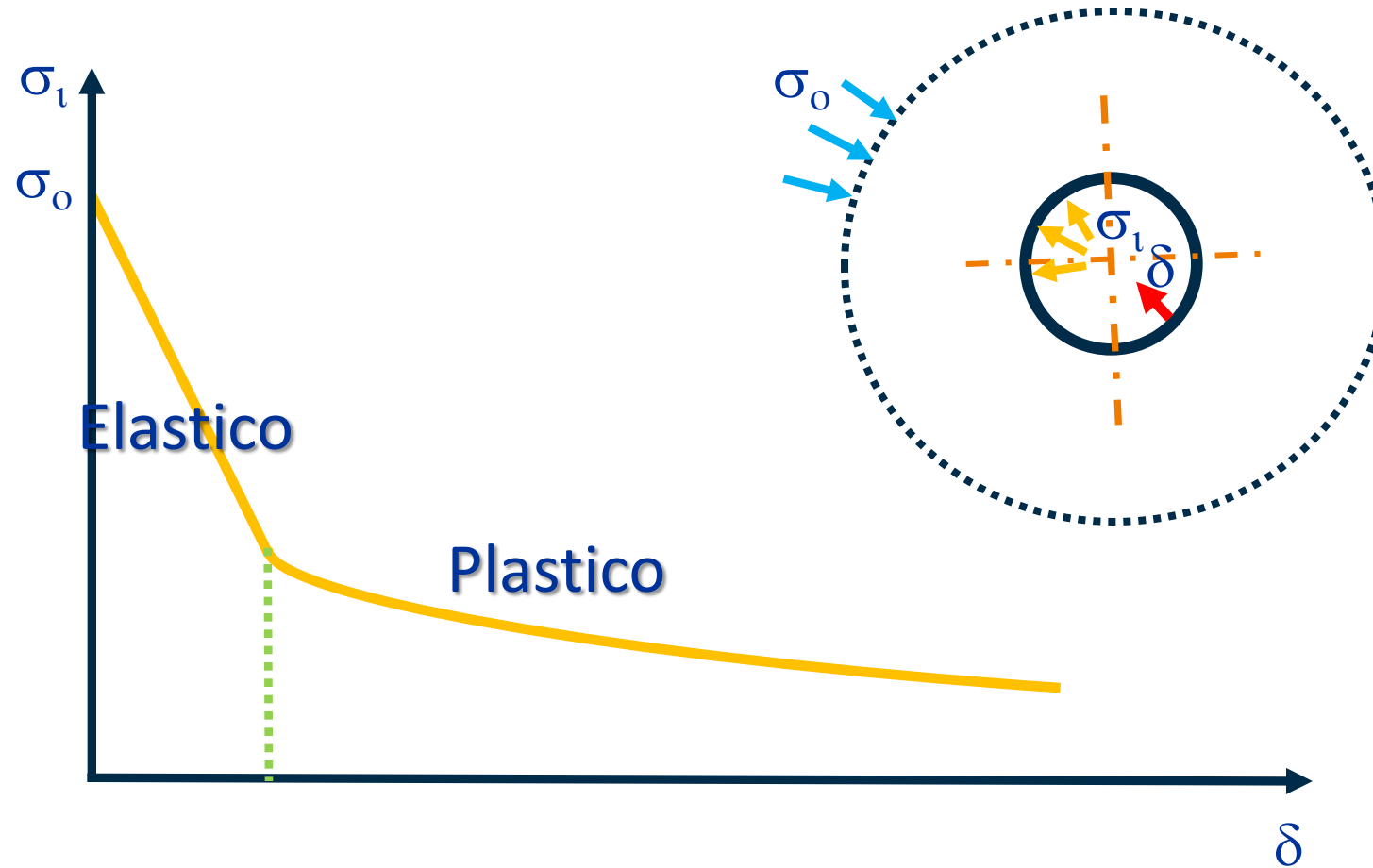
modified from Bieniawski, 1987

Concetto di curva caratteristica

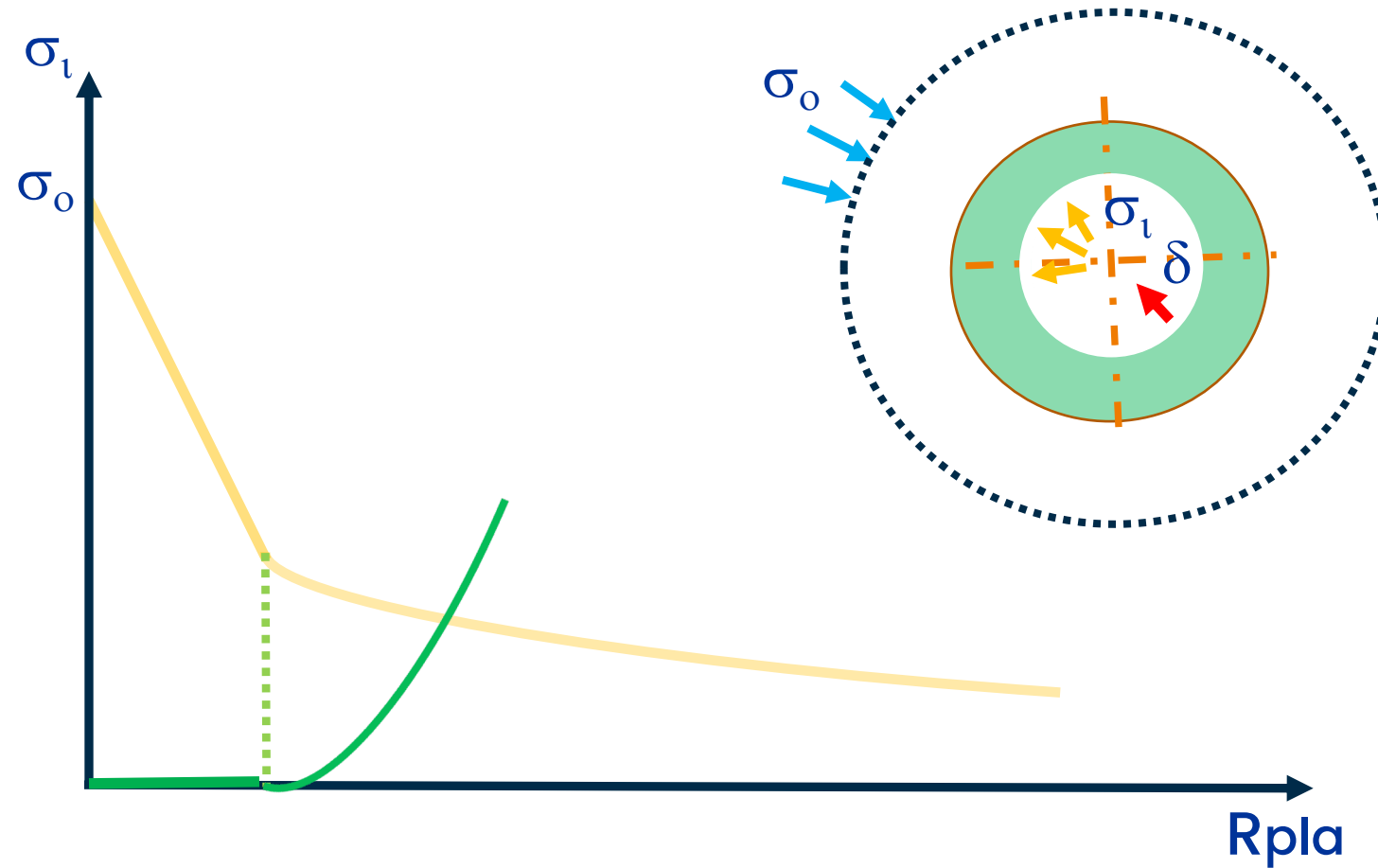


Ipotesi di base : 1) materiale omogeneo e isotropo;
2) stato di sforzo idrostatico, 3) geometria assialsimmetrica
La soluzione analitica si può trovare in Hoek and Brown (1980)

Concetto di curva caratteristica

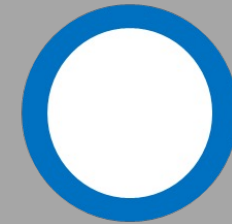
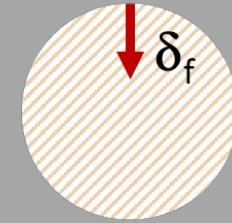
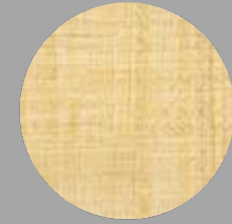
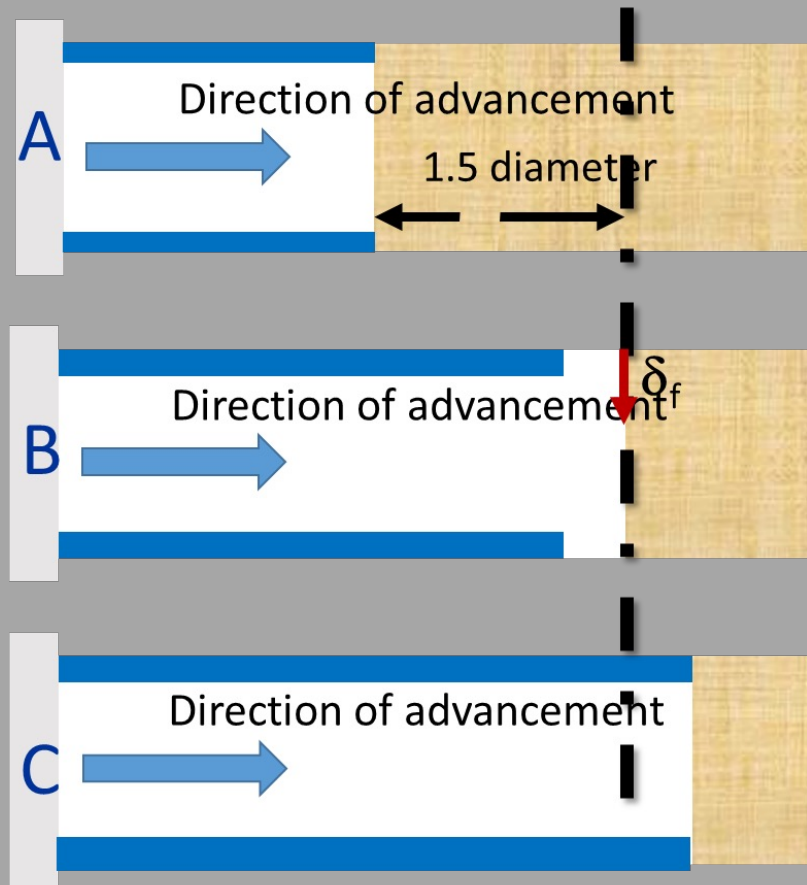
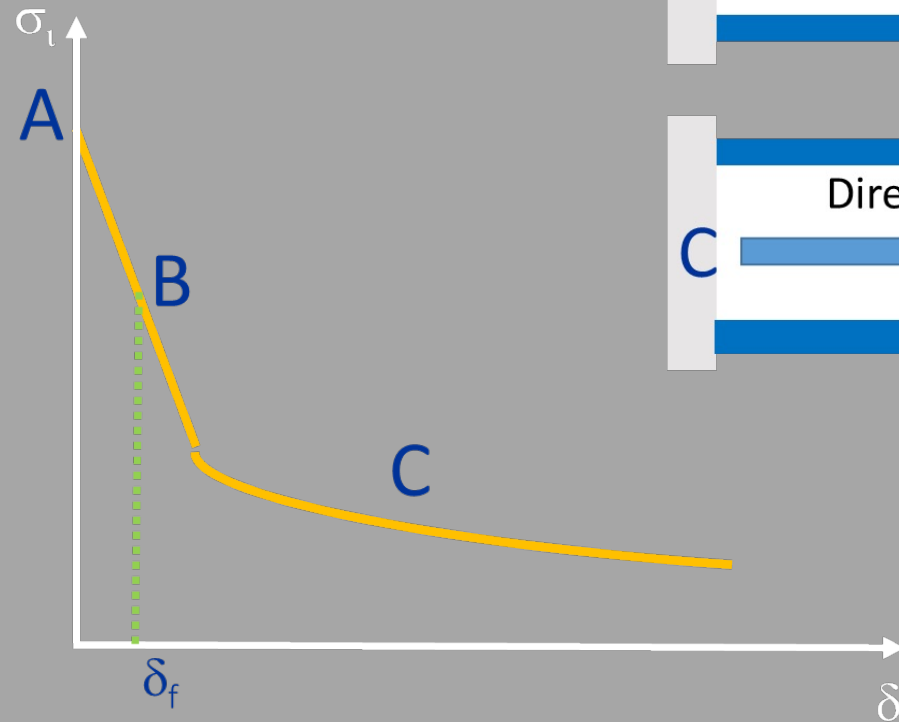


Concetto di curva caratteristica



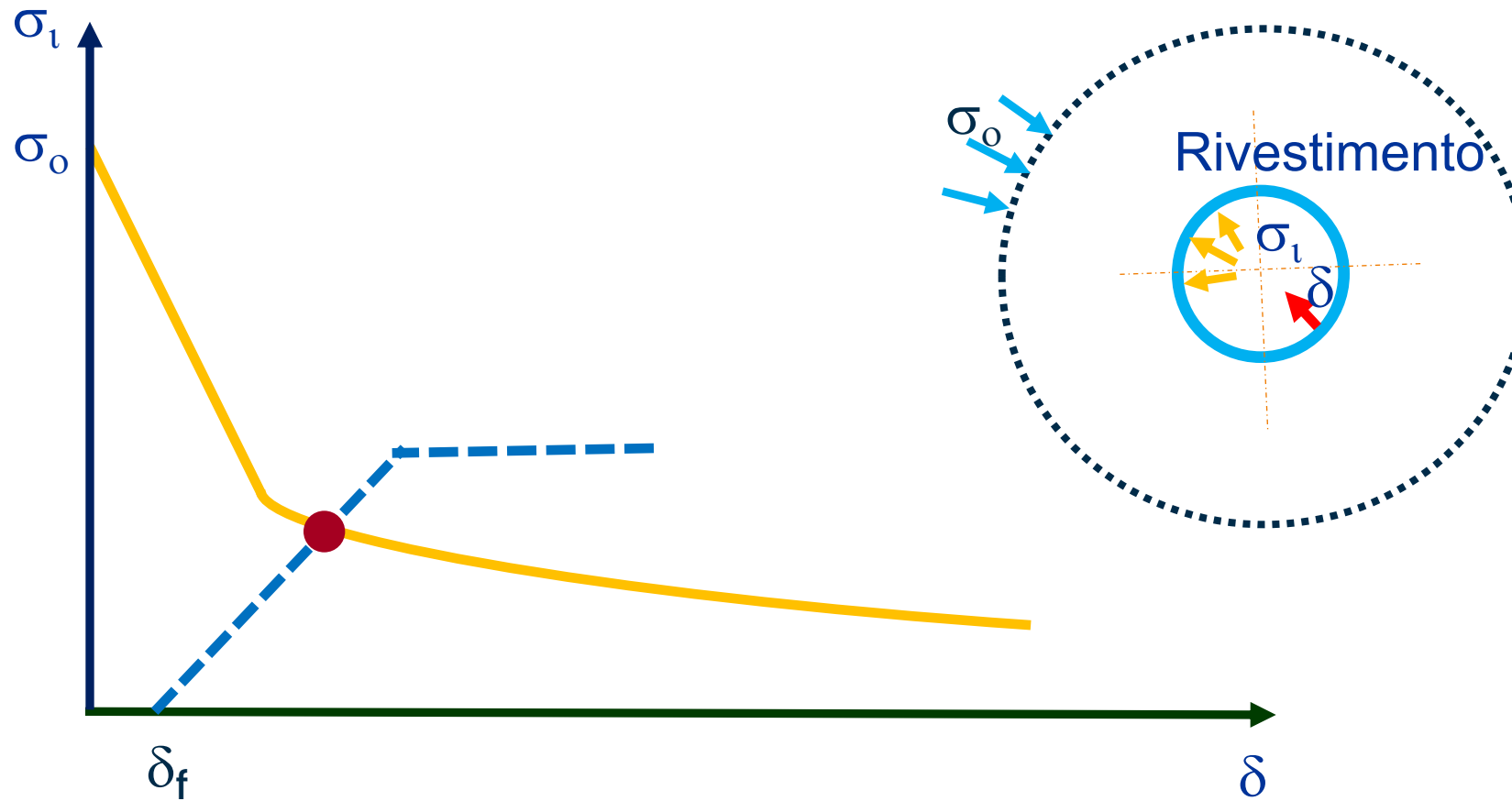
Sviluppo della zona plastica





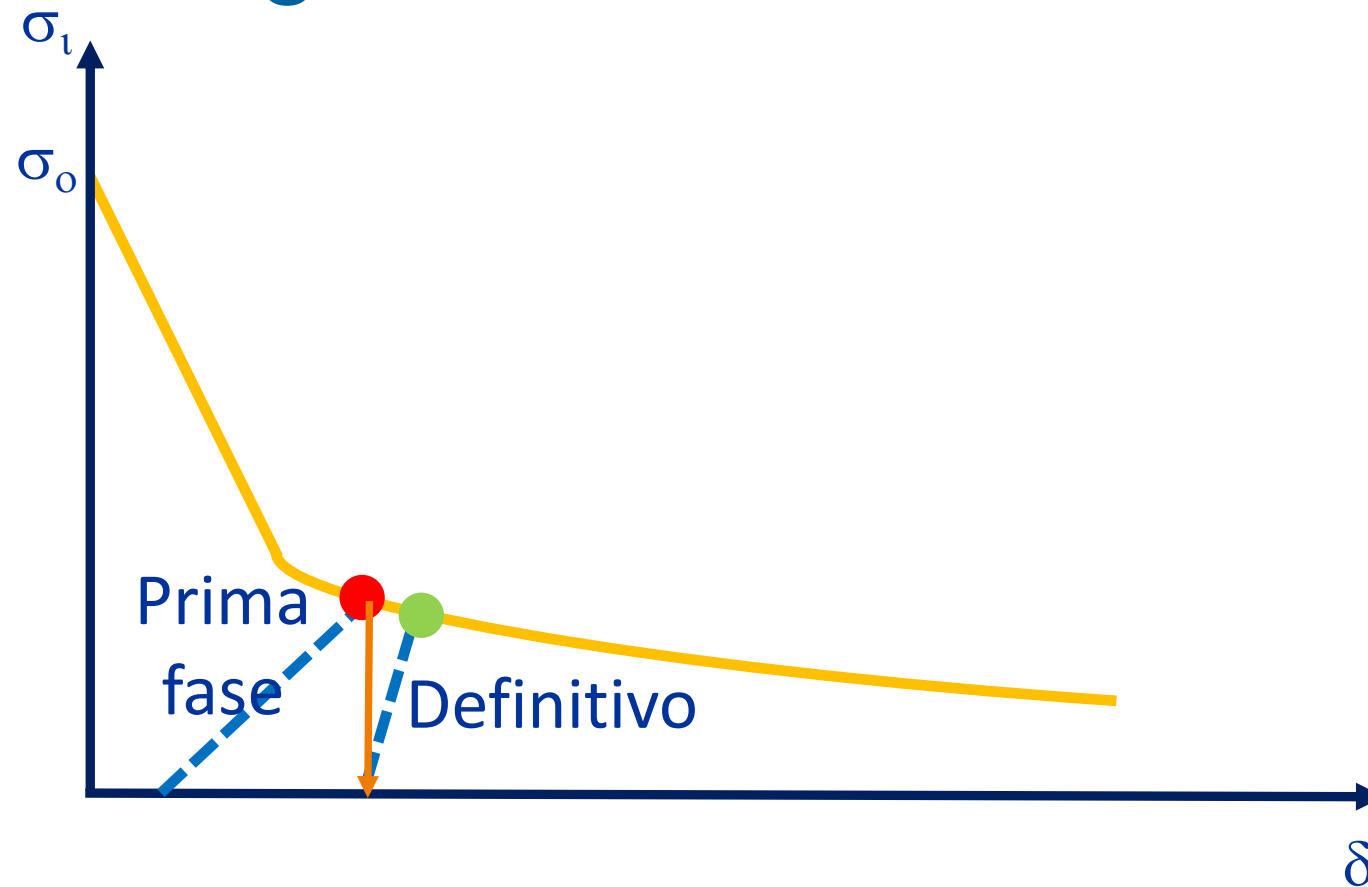
Concetto di curva caratteristica

Azione dei sostegni



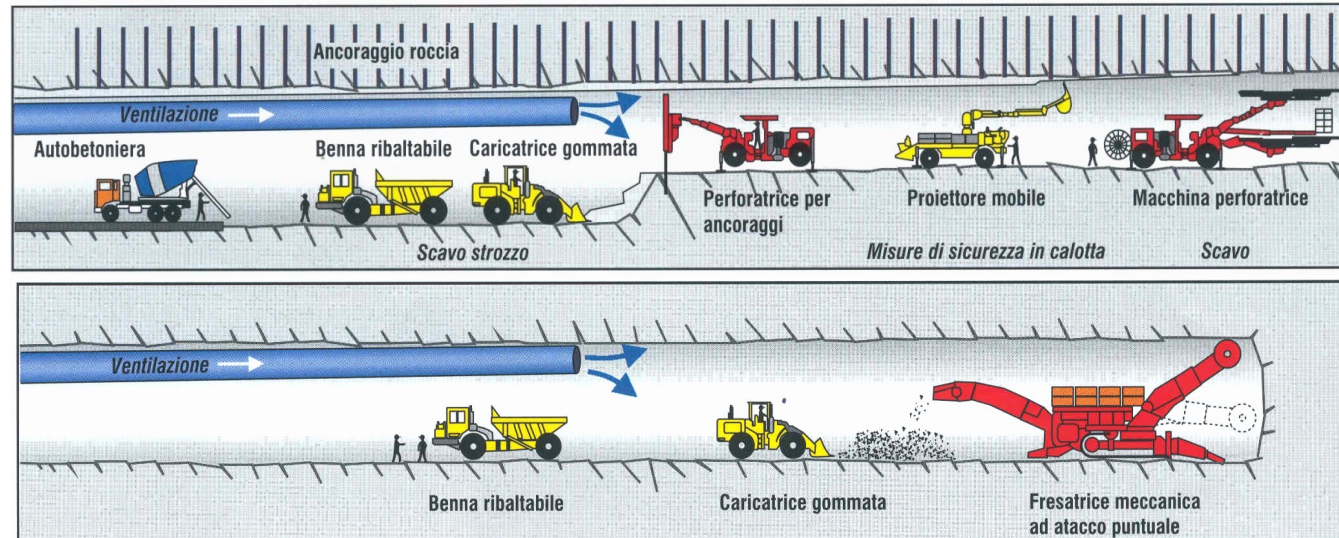
Concetto di curva caratteristica

Azione dei sostegni

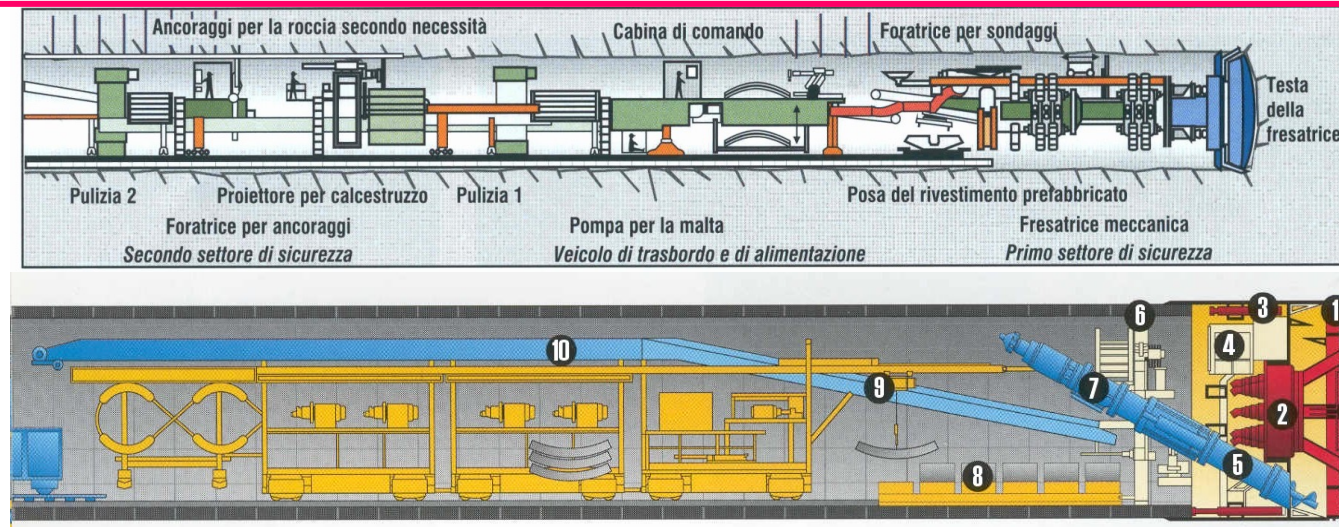


Sintesi dei metodi di scavo

CONVENZIONALE

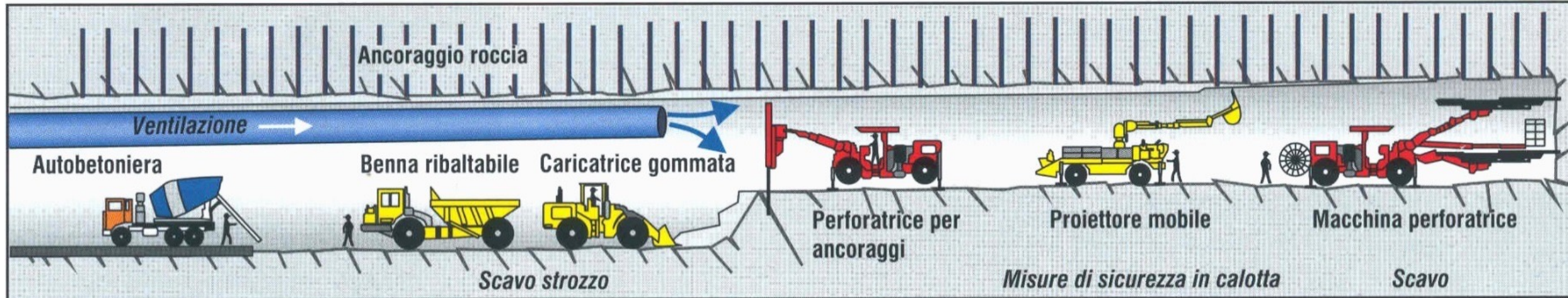


MECCANIZZATO INTEGRALE



Sintesi dei metodi di scavo

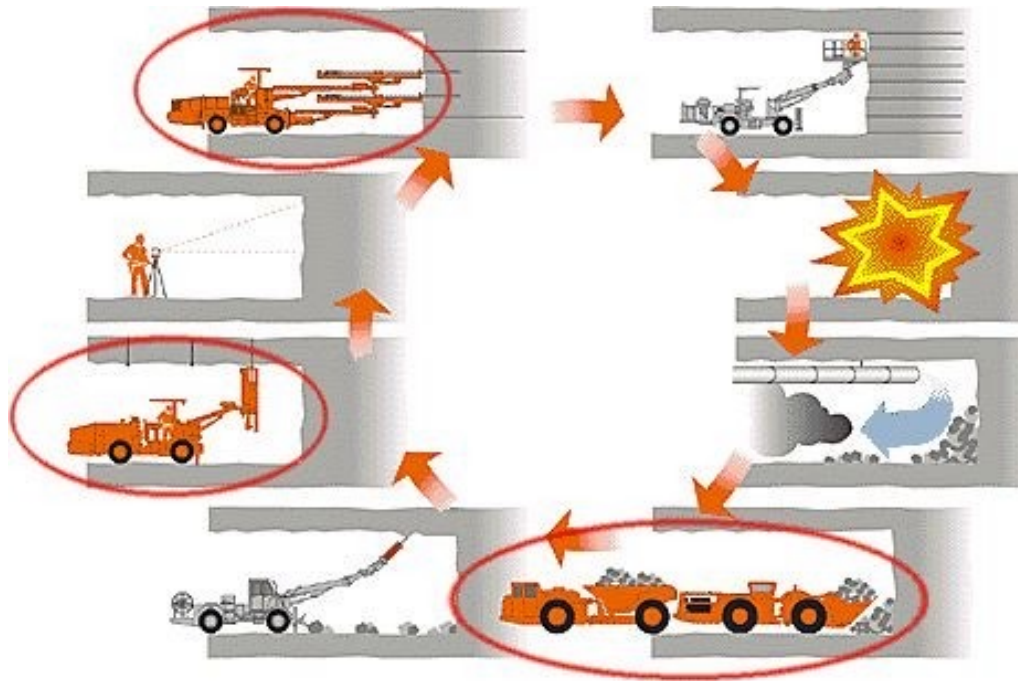
Scavo convenzionale con esplosivo (Drill & Blast)



Sintesi dei metodi di scavo

Scavo convenzionale con esplosivo (Drill & Blast)

Lo scavo può essere realizzato a piena sezione o a sezione parzializzata; con o senza consolidamenti o presostegni dell'ammasso roccioso. Lo scavo segue tipicamente un processo ciclico dove si alternano le fasi di abbattimento, di asportazione del materiale abbattuto (smarino) e di installazione di sostegni.



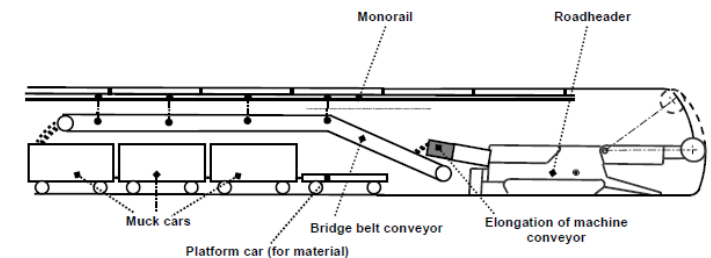
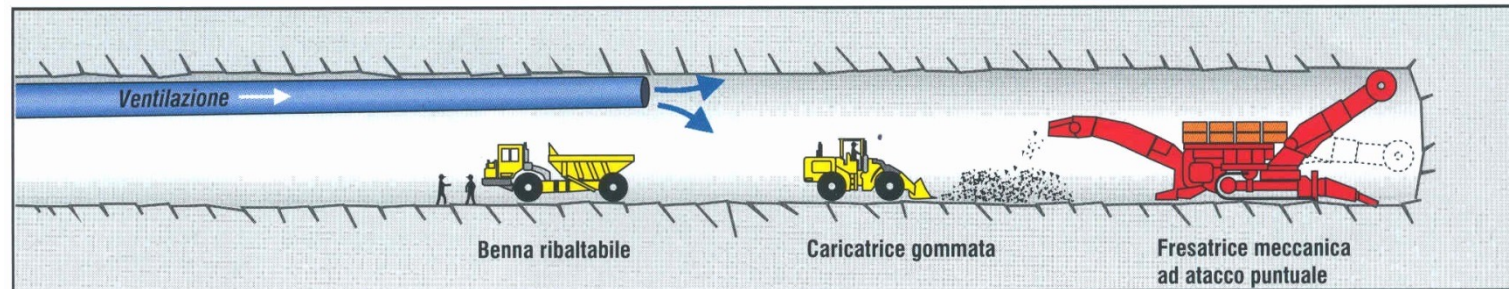
Sintesi dei metodi di scavo

Scavo convenzionale con metodi di scavo puntuali

Lo scavo può essere realizzato a piena sezione o a sezione parzializzata con o senza consolidamenti o presostegni dell'ammasso roccioso. . Lo scavo segue tipicamente un processo ciclico dove si alternano le fasi di abbattimento, di asportazione del materiale abbattuto (smarino) e di installazione di sostegni.

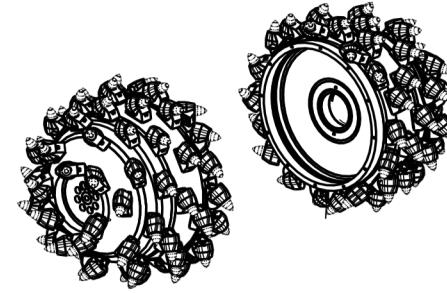
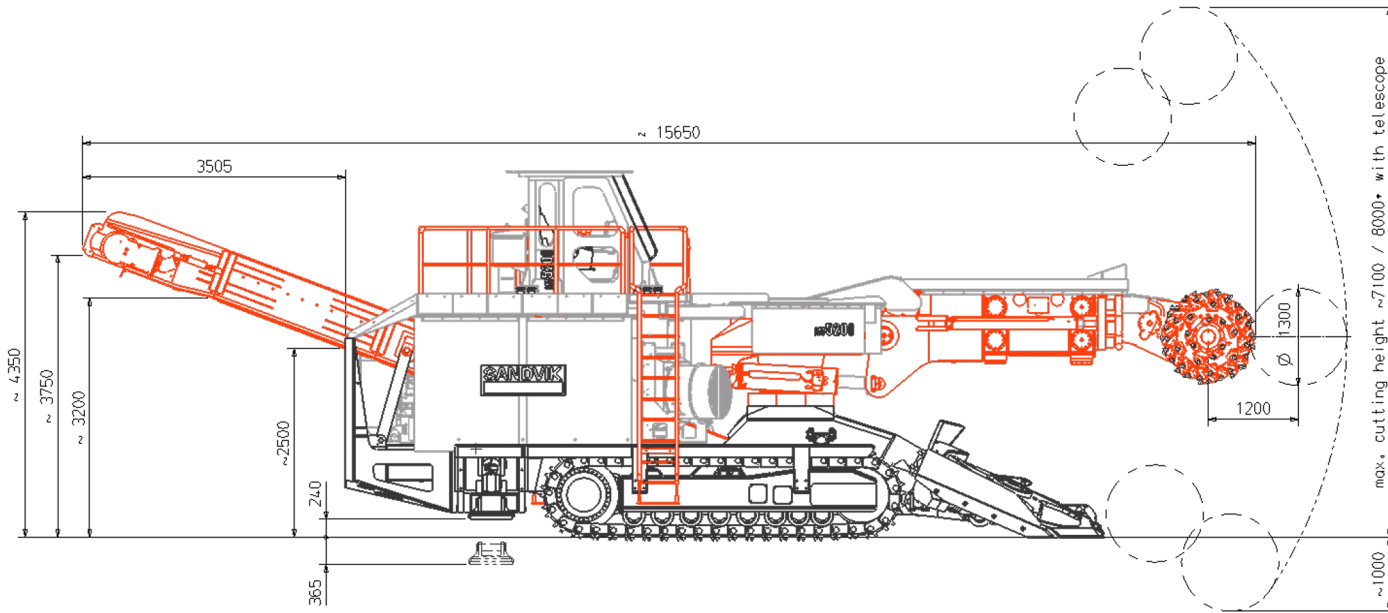
Lo scavo può essere eseguito con frese puntuali (roadheader), martelli ad alta energia d'urto (HEIH), escavatori con benna rovescia, tecnologie speciali (superwedge, ecc.).

Nel caso di scavo con frese puntuali l'asportazione dell'abbattuto sono usualmente contestuali.



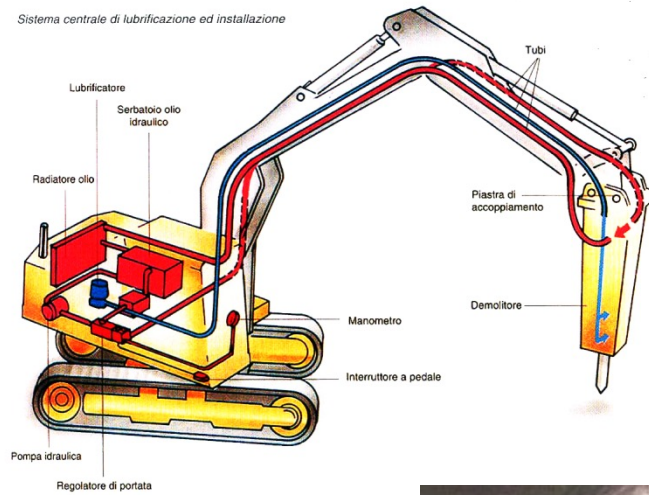
Sintesi dei metodi di scavo

Scavo convenzionale con metodi di scavo puntuali: roadheader



Sintesi dei metodi di scavo

Scavo convenzionale con metodi di scavo puntuali: martello ad alta energia d'urto



Sintesi dei metodi di scavo

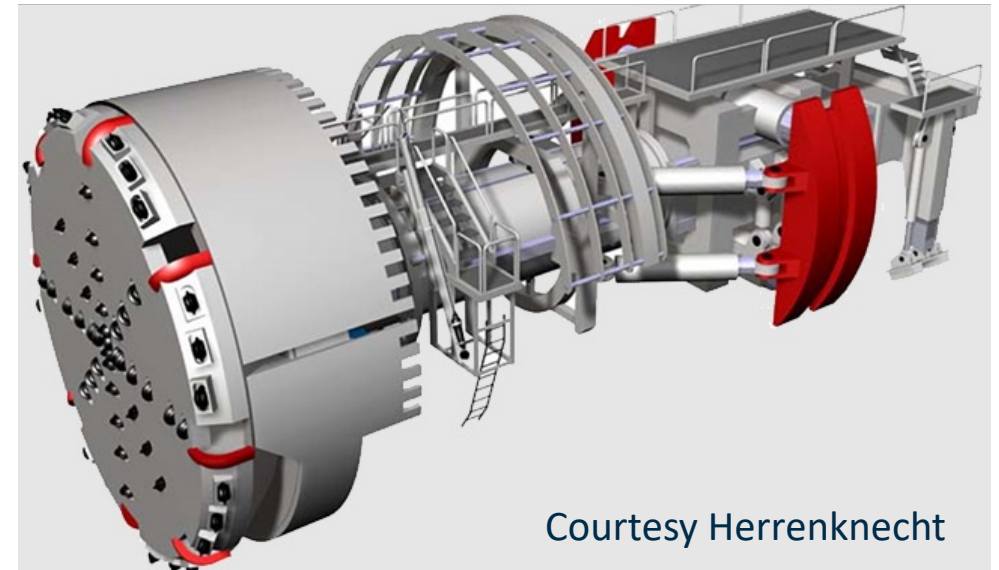
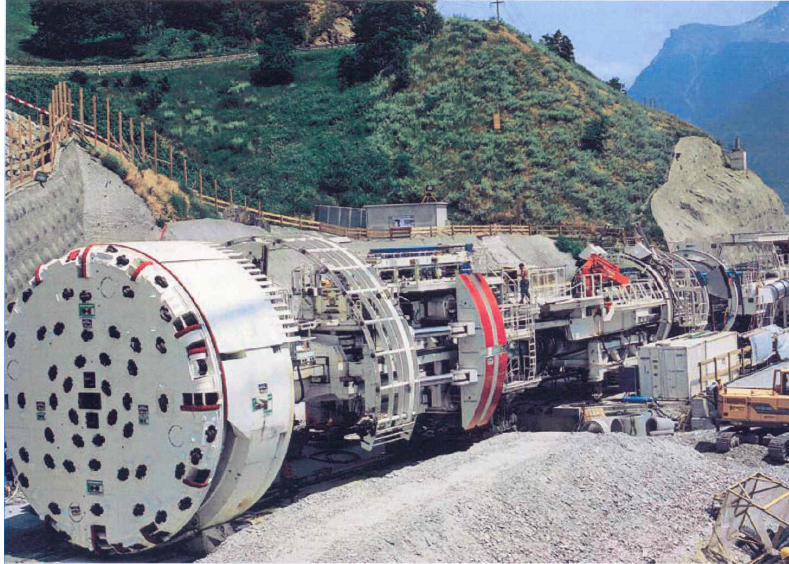
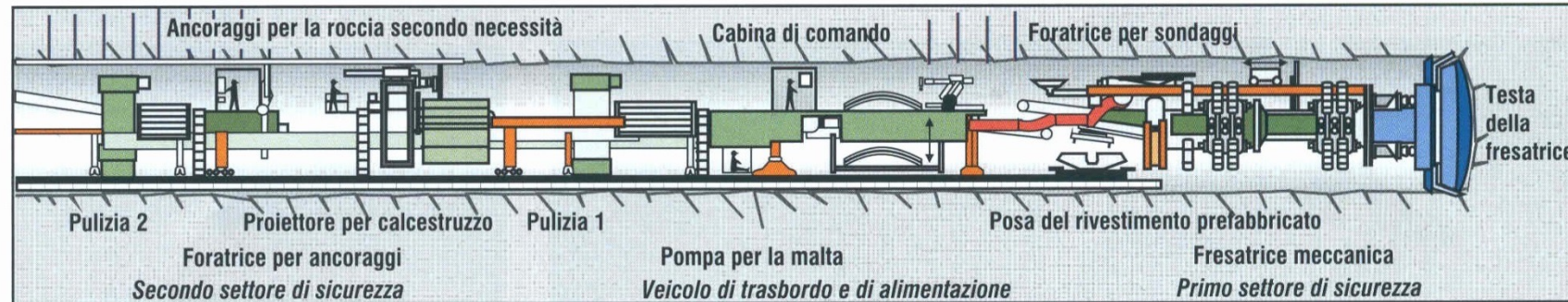
Scavo convenzionale con metodi di scavo puntuali: escavatore



Sintesi dei metodi di scavo

Scavo meccanizzato a piena sezione in roccia

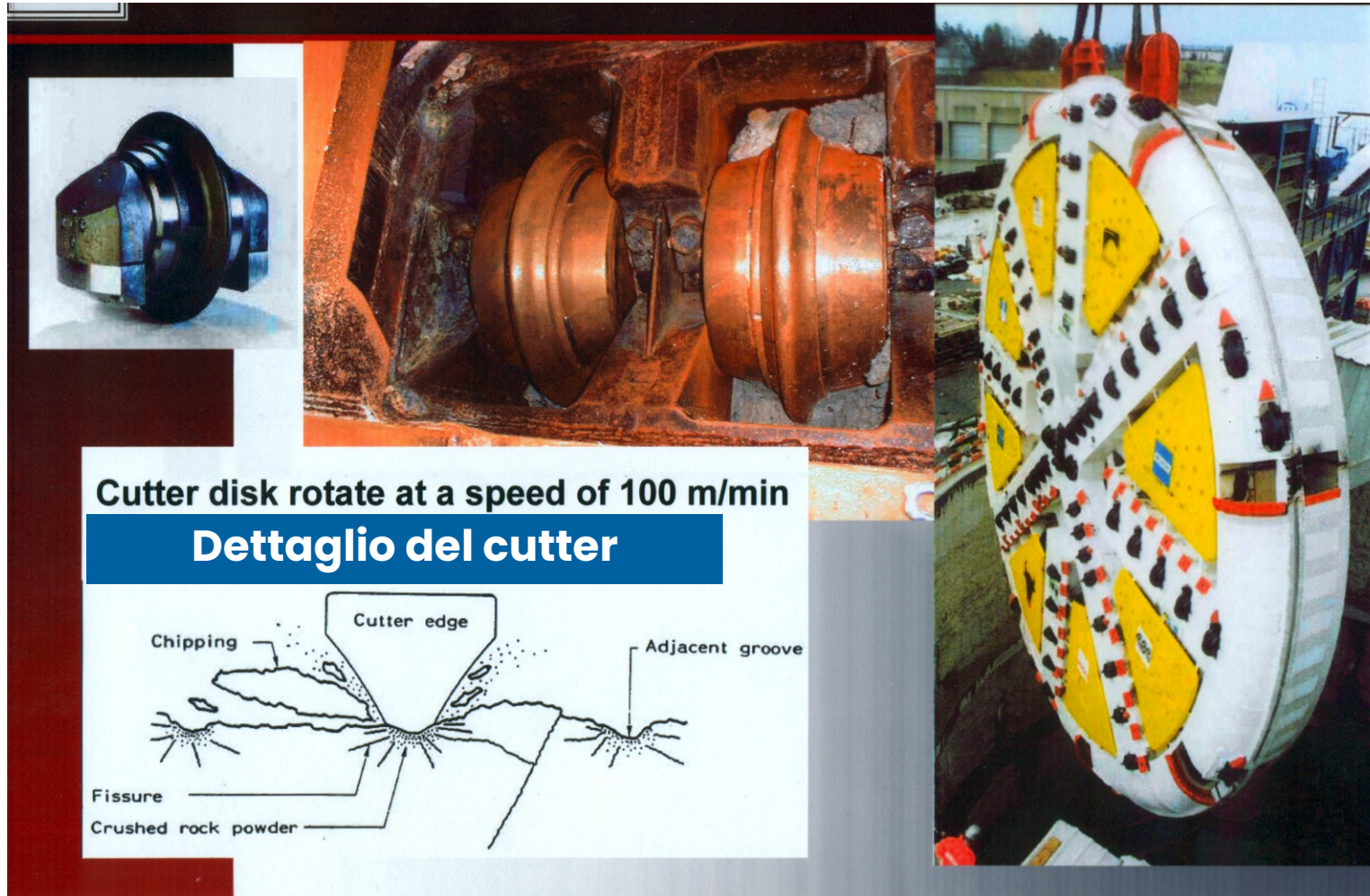
Le macchine devono essere in grado di demolire la roccia grazie all'azione di utensili (cutter)



Courtesy Herrenknecht

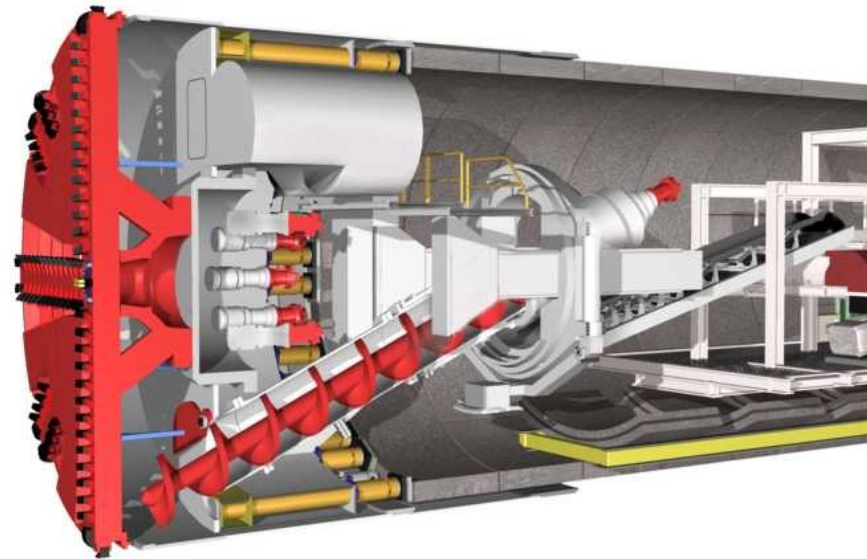
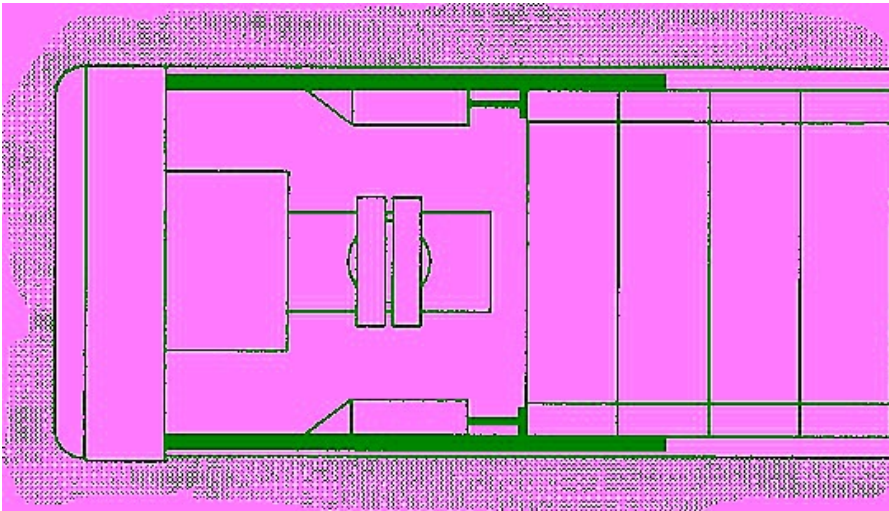
Sintesi dei metodi di scavo

Scavo meccanizzato a piena sezione in roccia

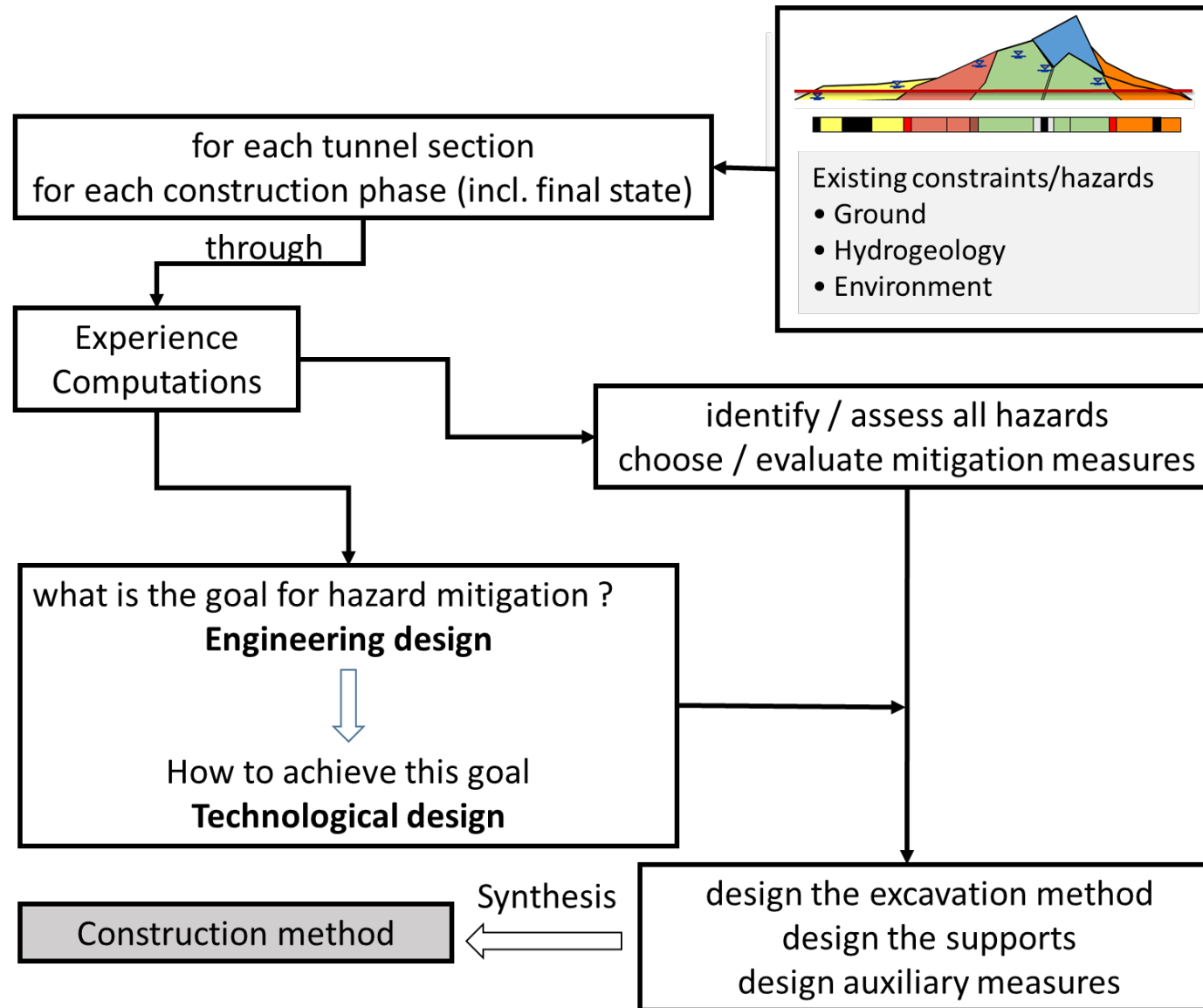


Sintesi dei metodi di scavo

Scavo meccanico a piena sezione in terreno: scudi



Base concettuale per la progettazione

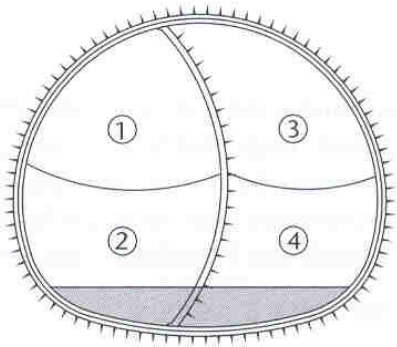
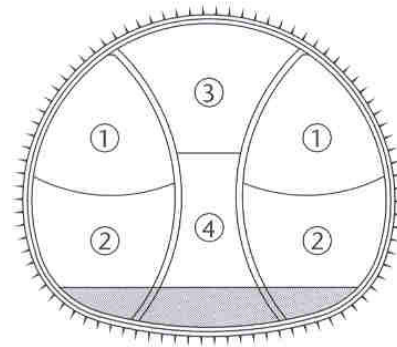
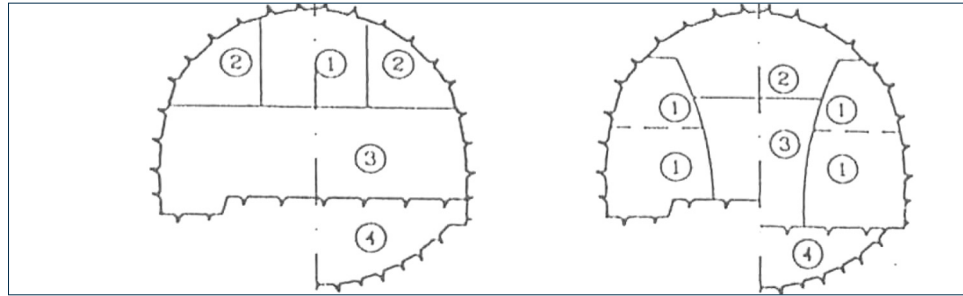
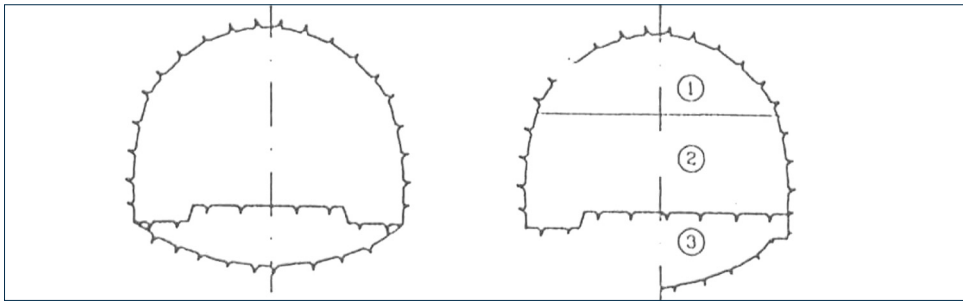


Base concettuale per la progettazione

Quando la luce libera è troppo corta ed il tempo di autoportanza è eccessivamente breve per garantire un'installazione sicura dei sostegni

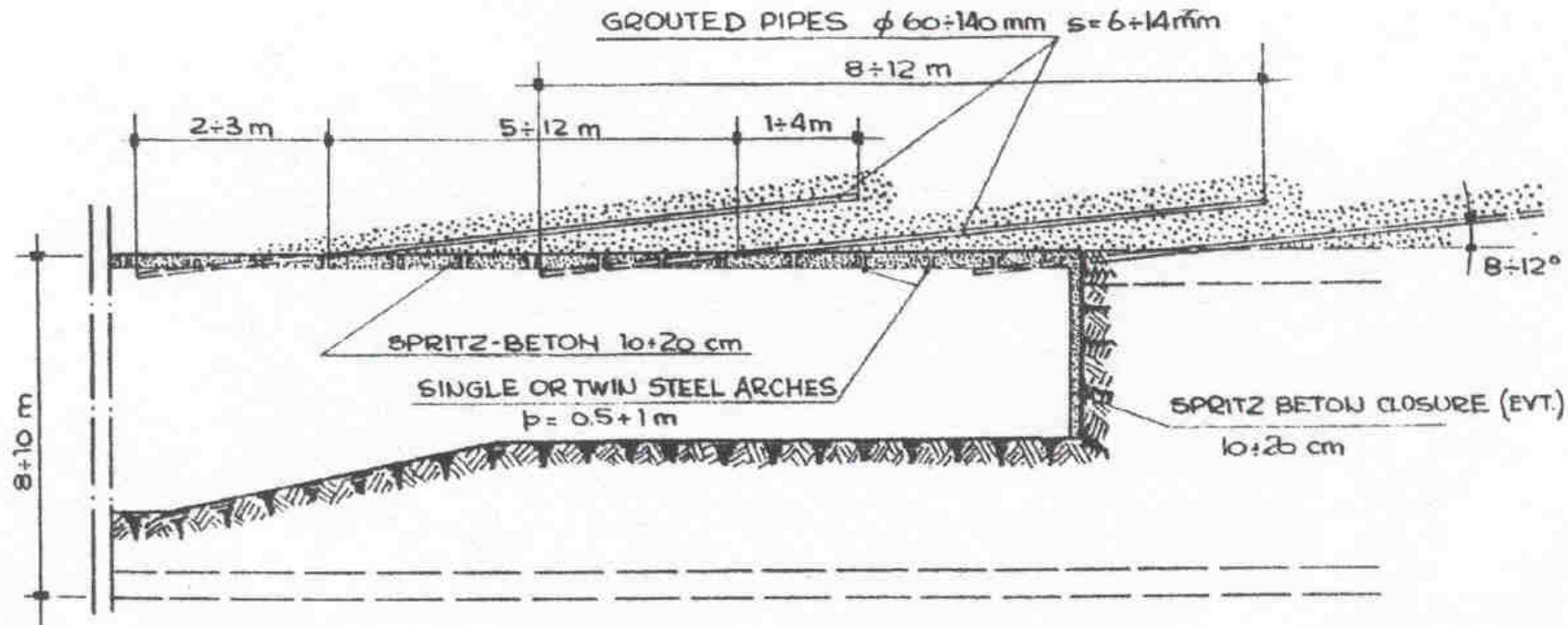
Il progettista ha quattro opzioni fondamentali

- 1) Ridurre la sezione di scavo a valori più piccoli (sezione parzializzata);**
- 2) Usare presostegni o miglioramenti della massa rocciosa davanti al fronte**
- 3) Migliorare la proprietà meccaniche dei terreni**
- 4) Applicare una contropressione al fronte**



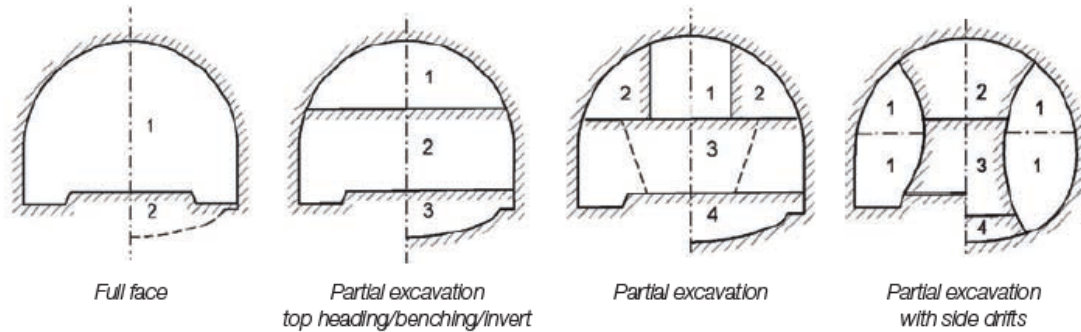
LONGITUDINAL SECTION (MEDIUM WEIGHT SUPPORT TYPE)

HALF SECTION OR FULL SECTION DRIVAGE

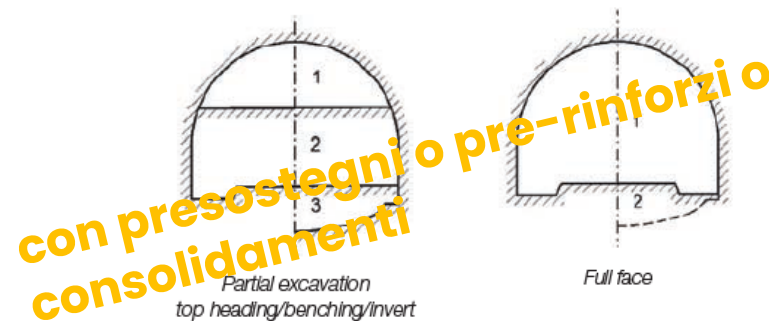


Scavo a sezione parzializzata calotta e ribasso + ombrello di tubi

Scavo in convenzionale a sezione piena o a sezione parzializzata ?



Riduzione delle proprietà meccaniche dei terreni e quindi tempi di autoportanza brevi e luci libere corte



Partial excavation



Top heading



BO-FI High speed railway line (Italy) - CAVET
Brossure

	PROFILO LONGITUDINALE	IN FASE D'AVANZAMENTO	CON RIVESTIMENTO DEFINITIVO
TIPO C1			
TIPO C2			
TIPO C3			

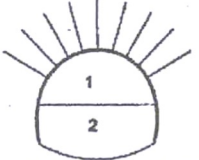
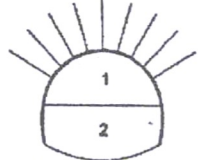
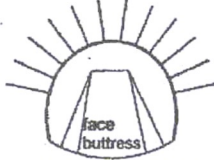
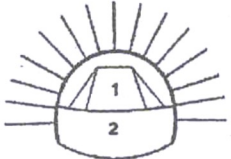
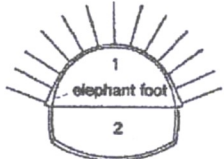
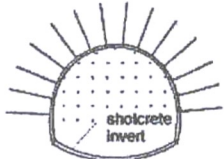
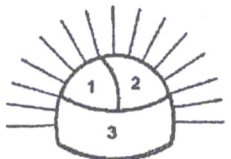
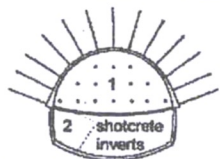
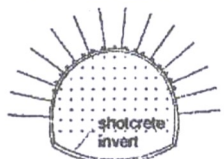

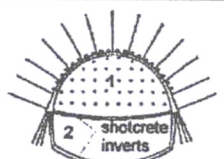

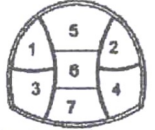
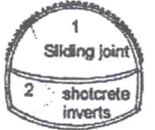
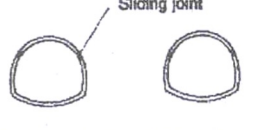
Esempio di sezioni parzializzate in grandi sezioni di scavo



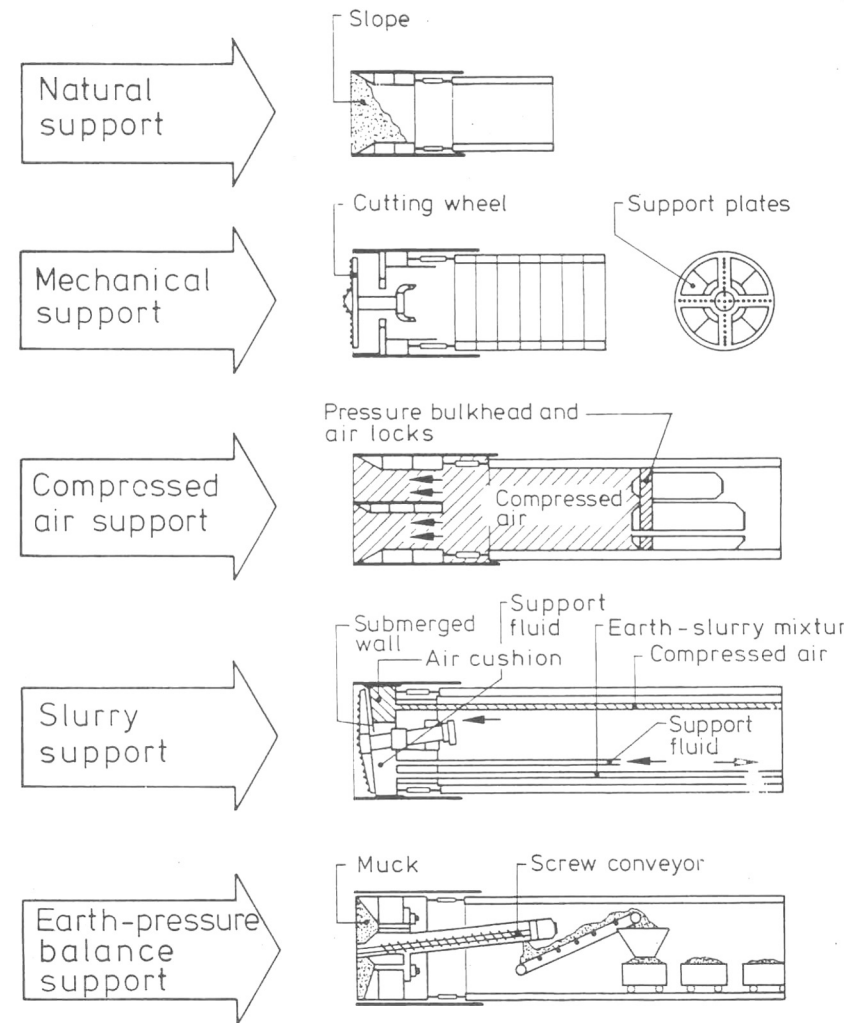
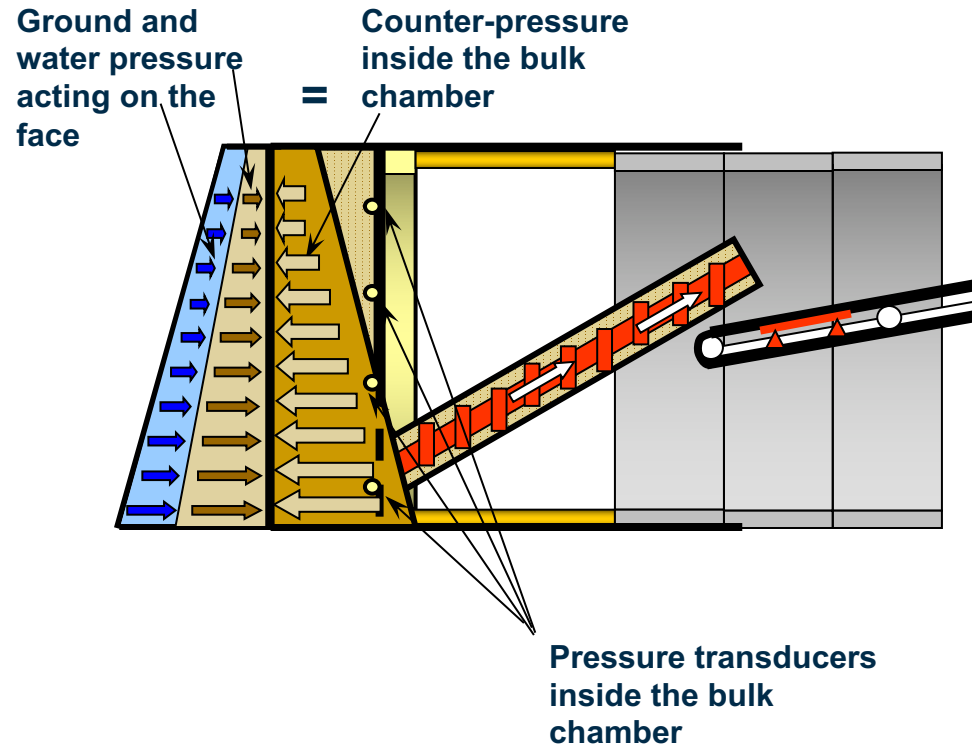
Caverna Borzoli –cortesia Geodata SpA



Esempio dello scavo del “Camerone C GN13” linea Av tra Genova e Milano (cortesia Italferr SpA).

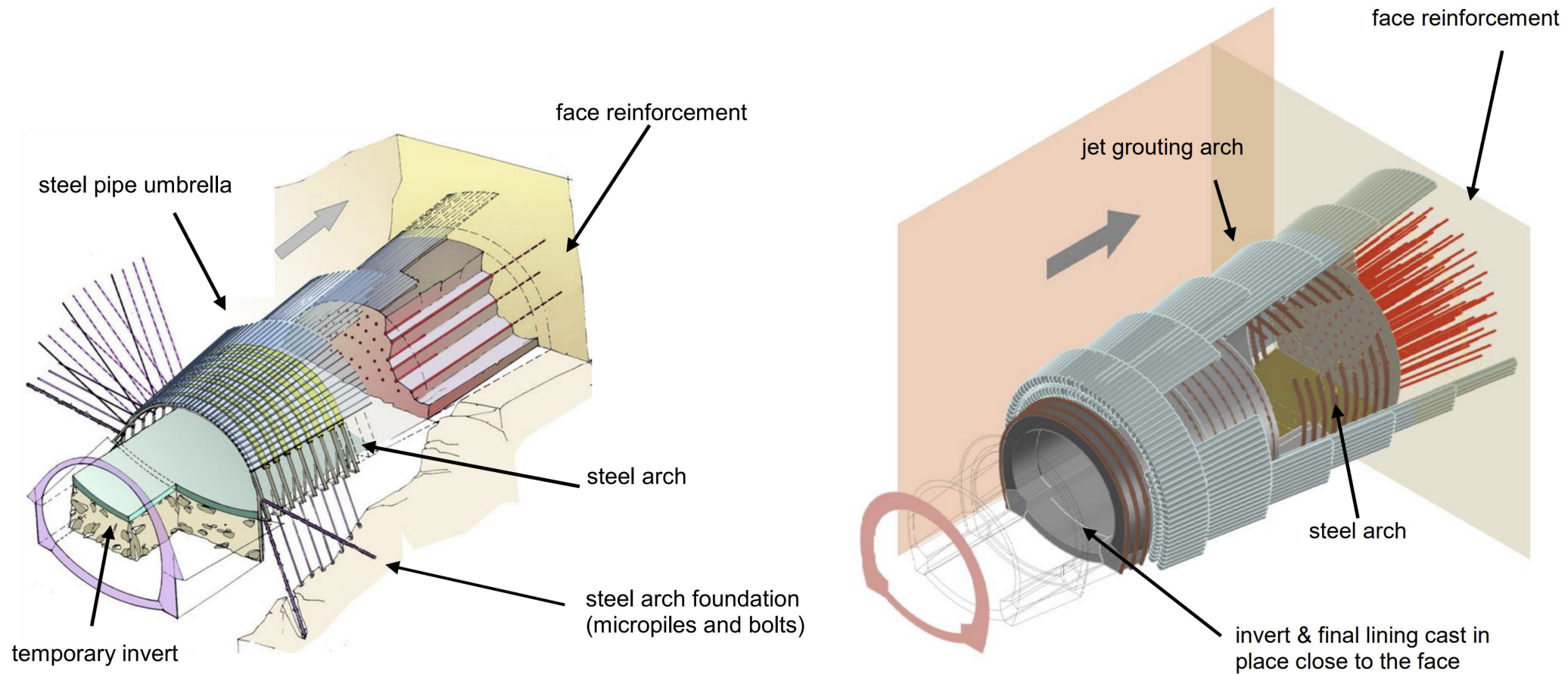
	MULTIPLE HEADINGS	TOP HEADING AND BENCH	FULL FACE EXCAVATION
NO SQUEEZING	 <p>Safety rockbolts in crown with 50 mm thick shotcrete</p>	 <p>Safety rockbolts in crown with 50 mm thick shotcrete</p>	 <p>Safety rockbolts, 50 mm thick shotcrete and face buttress</p>
MINOR SQUEEZING	 <p>Rockbolts, 100 mm thick shotcrete and face buttress</p>	 <p>Steel sets in shotcrete with elephant foot and invert lining</p>	 <p>Lattice girders, shotcrete, fiber-glass dowels grouted in face</p>
SEVERE SQUEEZING	 <p>Partial face excavation, 150 mm thick shotcrete lining and invert</p>	 <p>Steel sets in shotcrete, grouted fiberglass dowels in face</p>	 <p>Forepoles, steel sets, grouted fiberglass dowels in face</p>
V. SEVERE SQUEEZING	 <p>200 mm thick shotcrete linings, self-drilling rockbolts</p>	 <p>Forepoles, fiberglass dowels, micropile foundations for sets</p>	 <p>Dense forepole or jet grout umbrella and face support</p>
EXTREME SQUEEZING	 <p>Central pillar, lattice girders embedded in 250 mm thick shotcrete lining, no rockbolts</p>	 <p>Forepole umbrella, steel sets with sliding joints, close temporary and final inverts</p>	 <p>Split into two smaller tunnels and use steel sets with sliding joints in 250 mm shotcrete</p>

Hoek, 2000



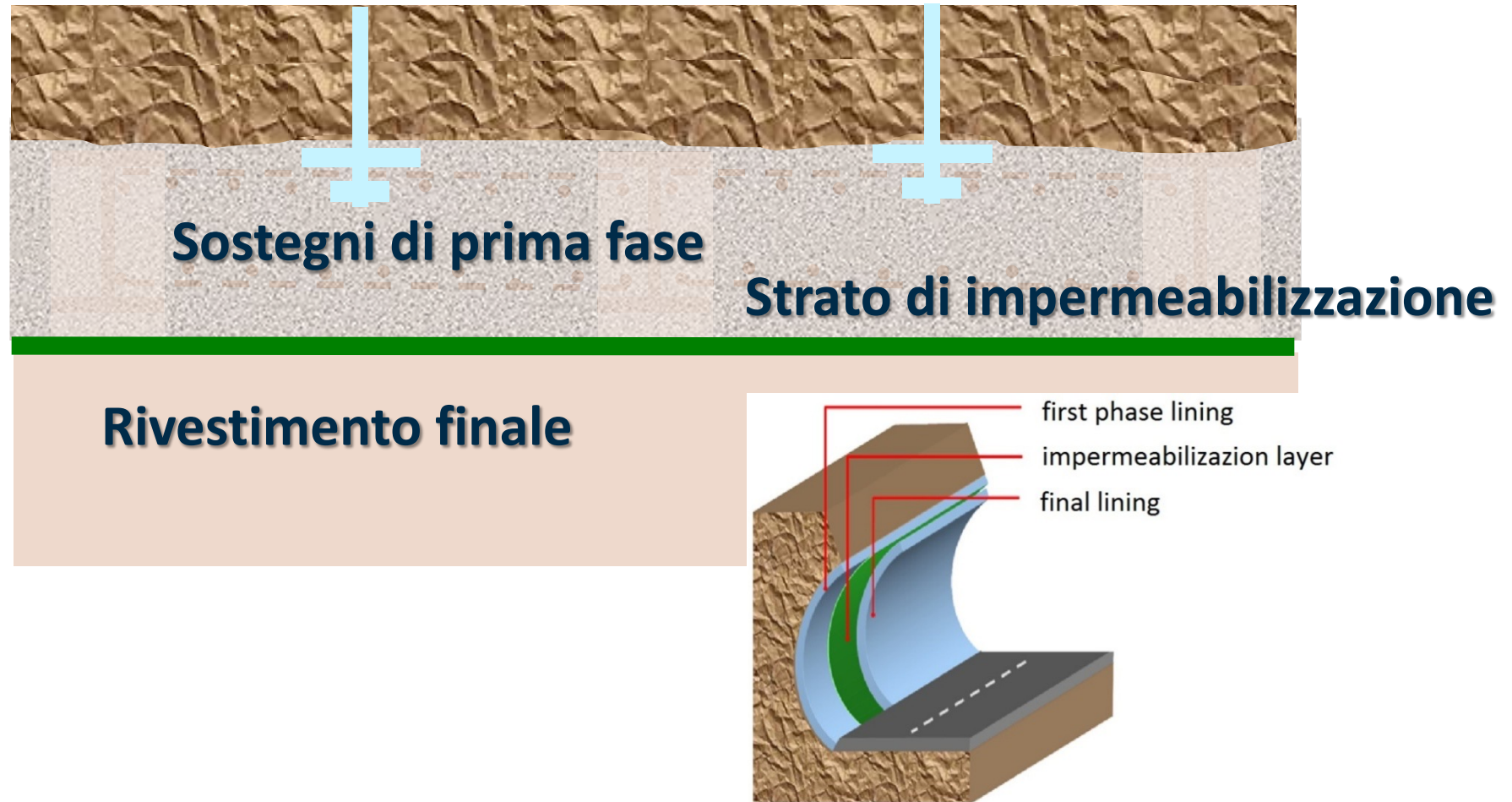
Maidl et al., 1994

Pre-sostegni e consolidamenti

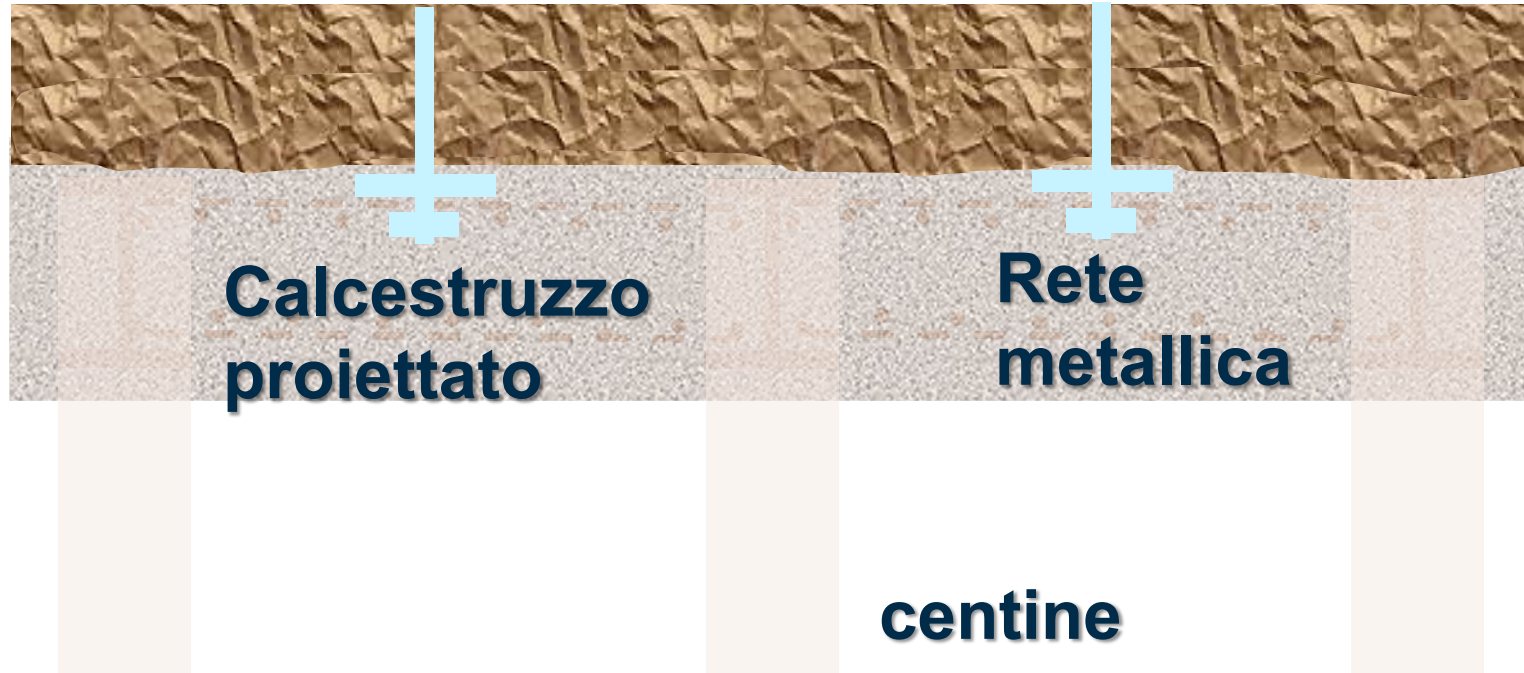


Tratte da: Handbook of Tunnels and Underground Works (2022)

Sostegni – Scavo convenzionale



Bulloni



Sostegni – Scavo convenzionale

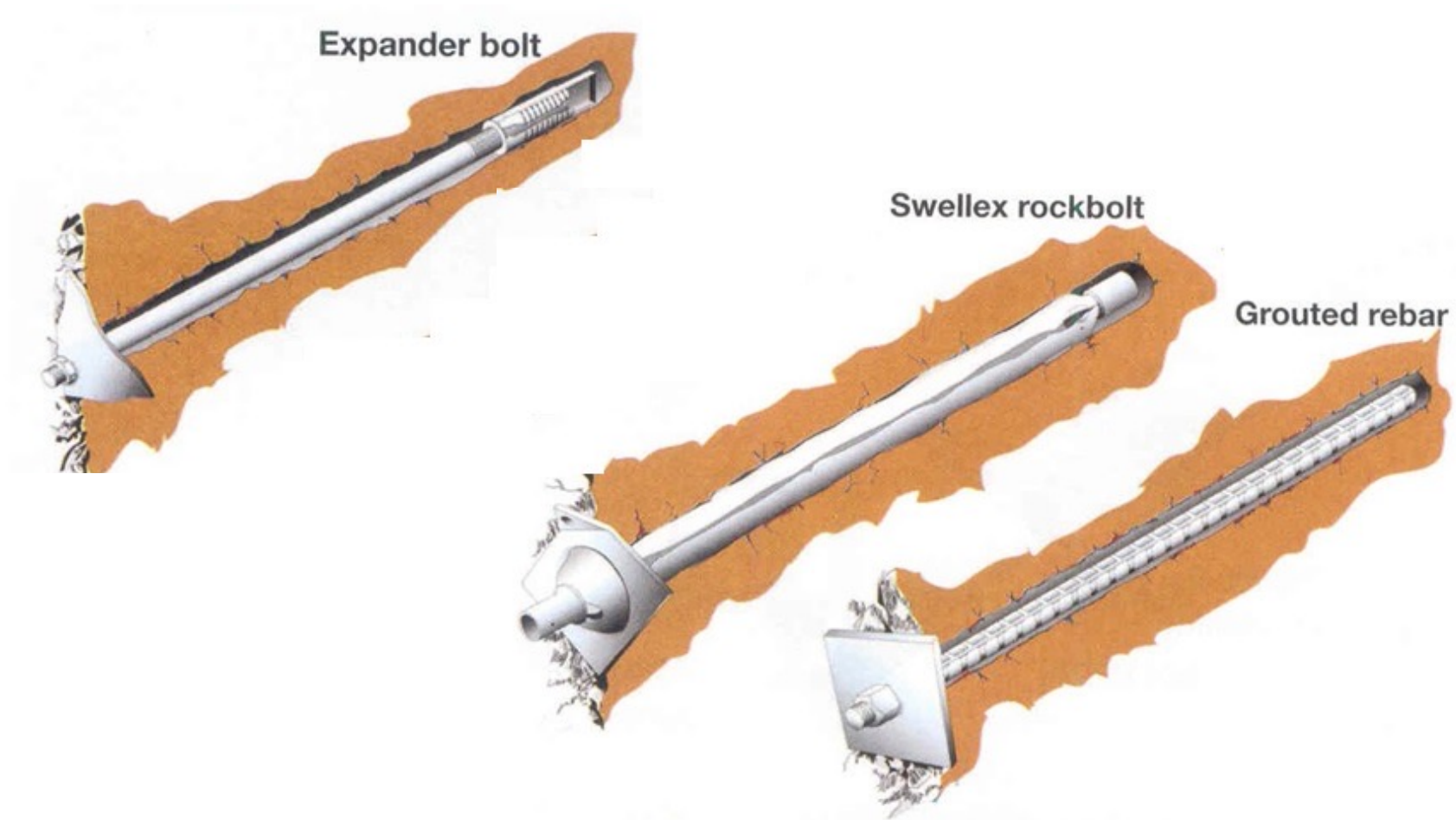
Bulloni



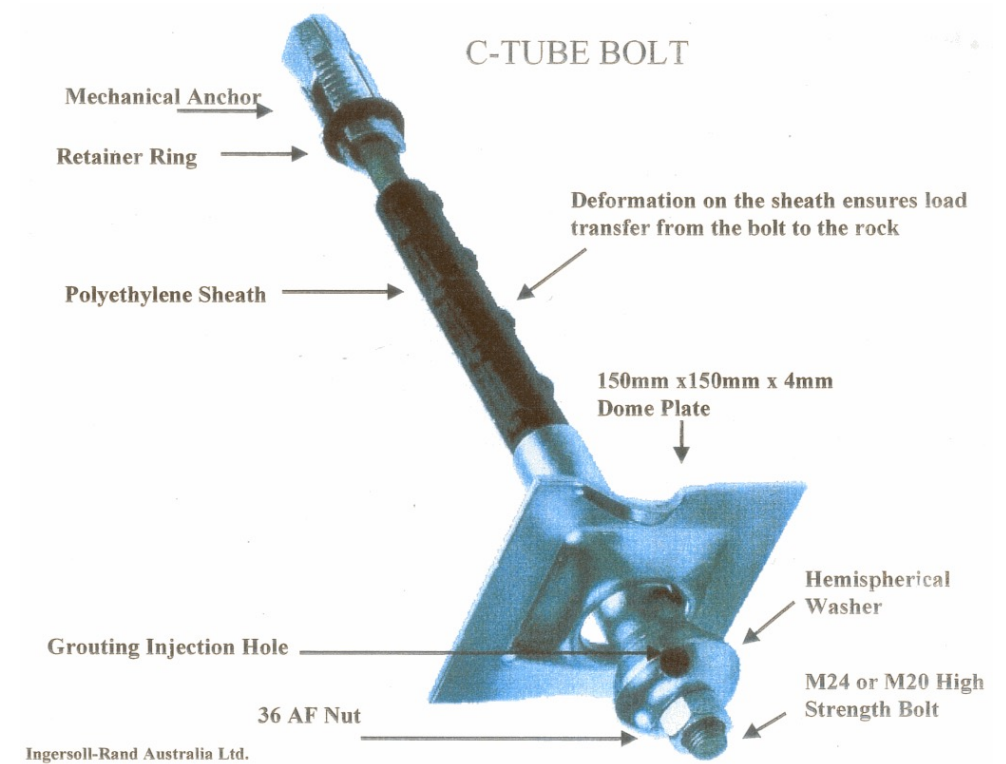
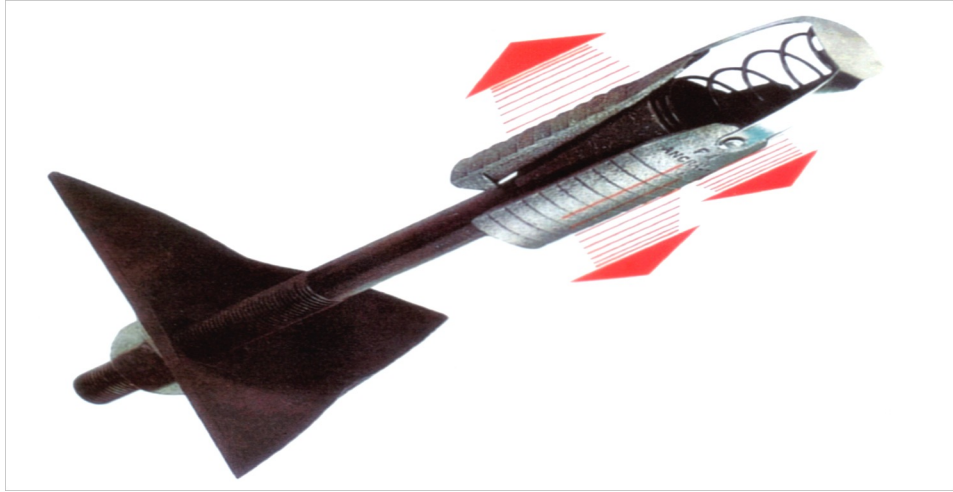
Rete metallica o fibre metalliche



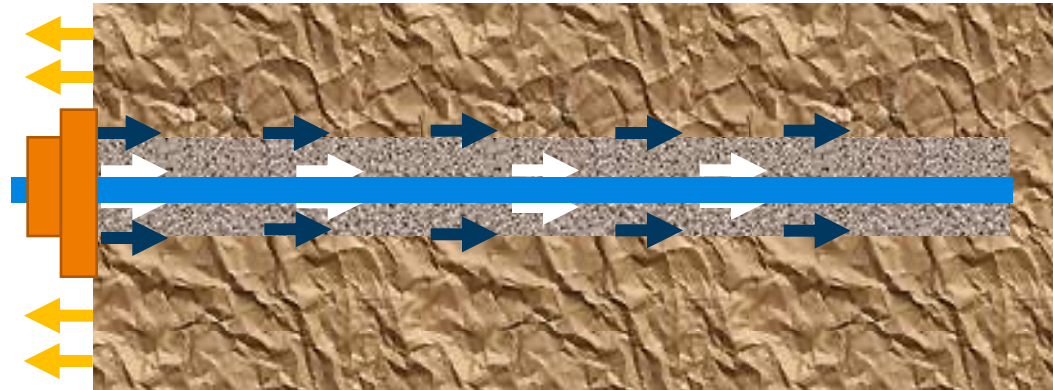
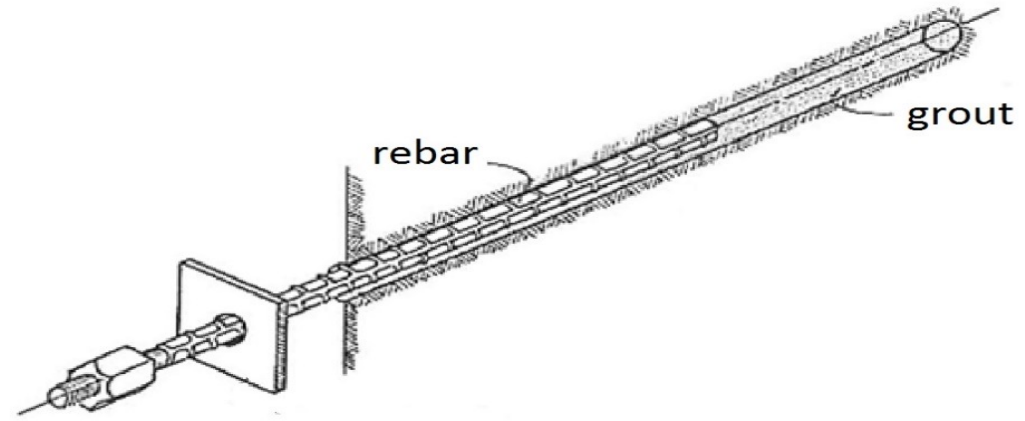
Bulloni



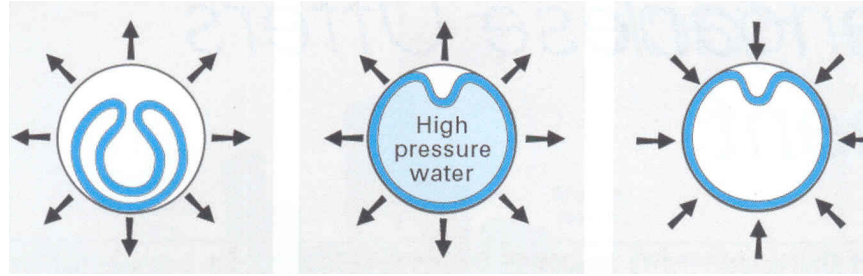
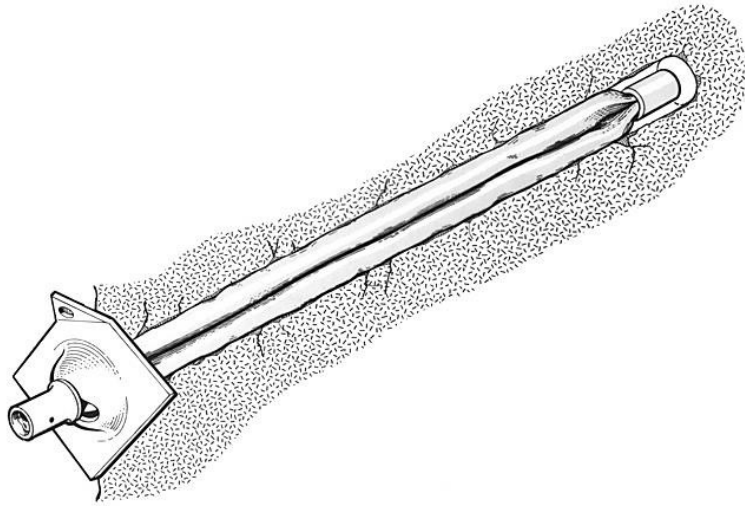
Bulloni



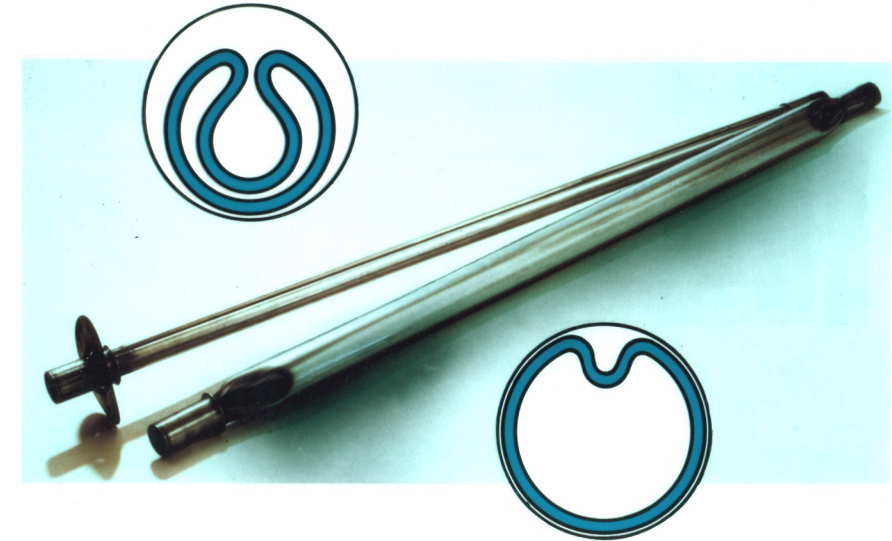
Bulloni



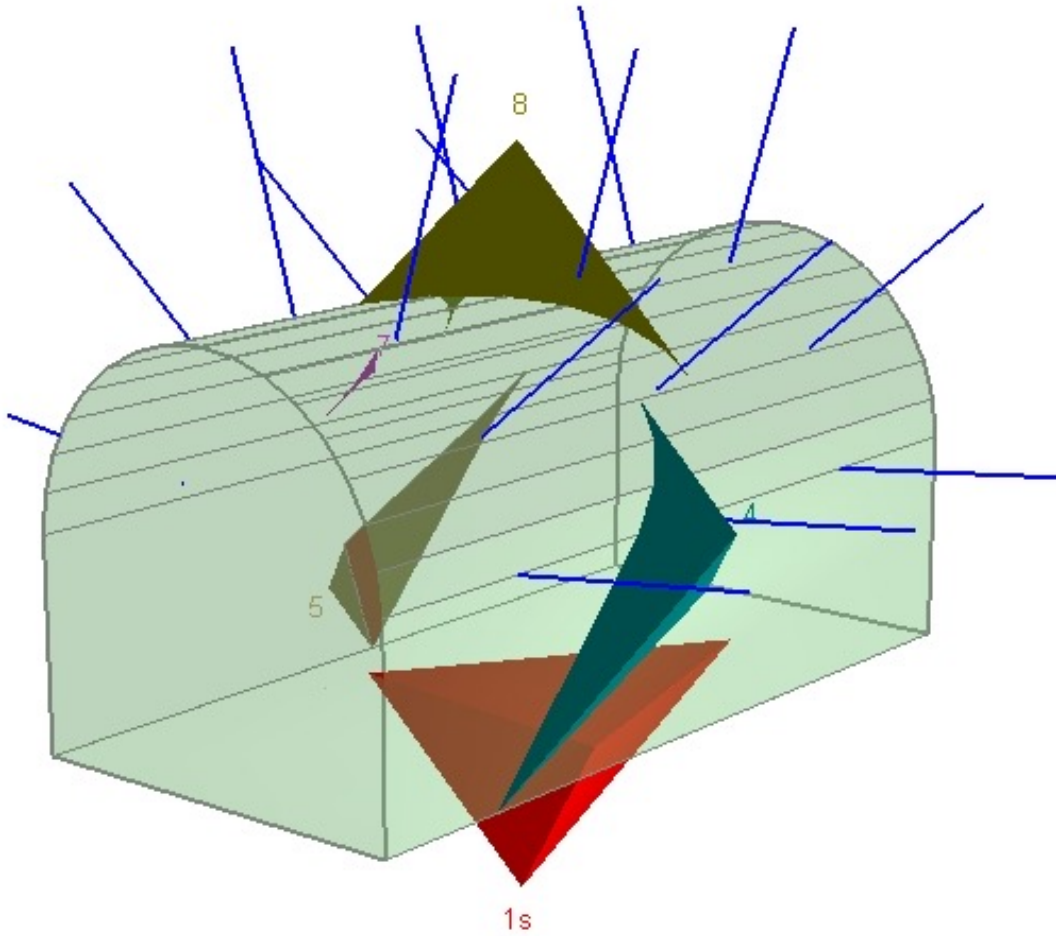
Bulloni



The principle of the Swellex system



Bulloni Swellex



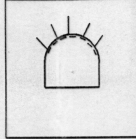
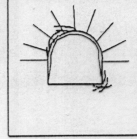
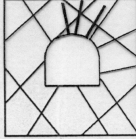
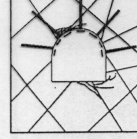
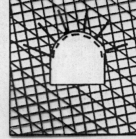
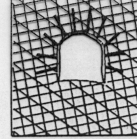
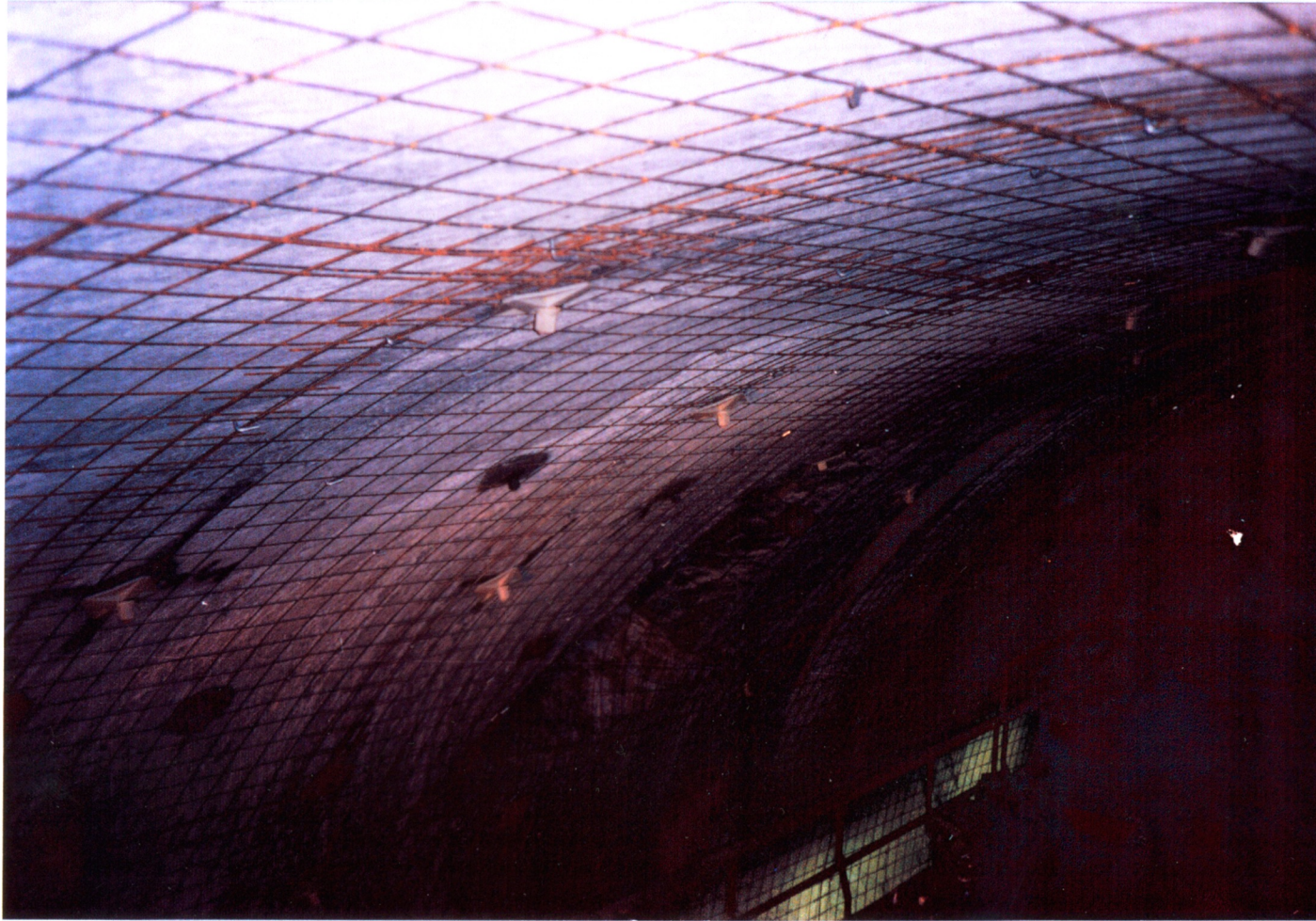
	Low stress levels	High stress levels
Massive rock	 <p>Massive rock subjected to low in situ stress levels. No support or 'safety bolts' or dowels and mesh.</p>	 <p>Massive rock subjected to high in situ stress levels. Pattern rockbolts or dowels with mesh or shotcrete to inhibit fracturing and to keep broken rock in place.</p>
Jointed rock	 <p>Massive rock with relatively few discontinuities subjected to low in situ stress conditions. 'Spot' bolts located to prevent failure of individual blocks and wedges. Bolts must be tensioned.</p>	 <p>Massive rock with relatively few discontinuities subjected to high in situ stress conditions. Heavy bolts or dowels, inclined to cross rock structure, with mesh or steel fibre reinforced shotcrete on roof and side-walls.</p>
Heavily jointed rock	 <p>Heavily jointed rock subjected to low in situ stress conditions. Light pattern bolts with mesh and/or shotcrete will control ravelling of near surface rock pieces.</p>	 <p>Heavily jointed rock subjected to high in situ stress conditions. Heavy rockbolt or dowel pattern with steel fibre reinforced shotcrete. In extreme cases, steel sets with sliding joints may be required. Invert struts or concrete floor slabs may be required to control floor heave.</p>

Figure 12.1: Typical rockbolt and dowel applications to control different types of rock mass failure.

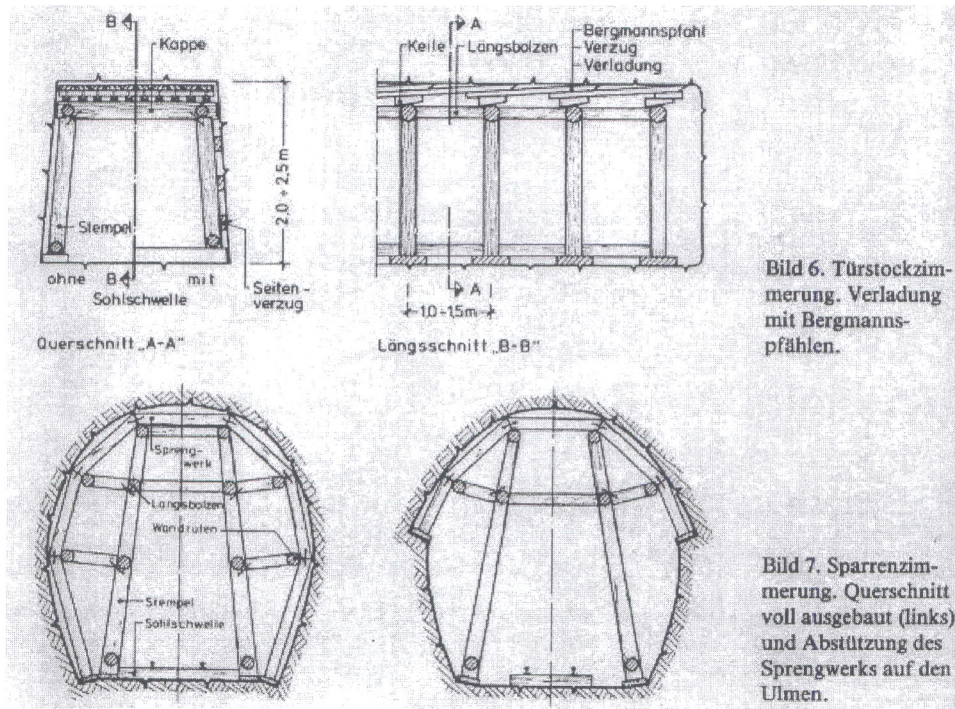
Bulloni



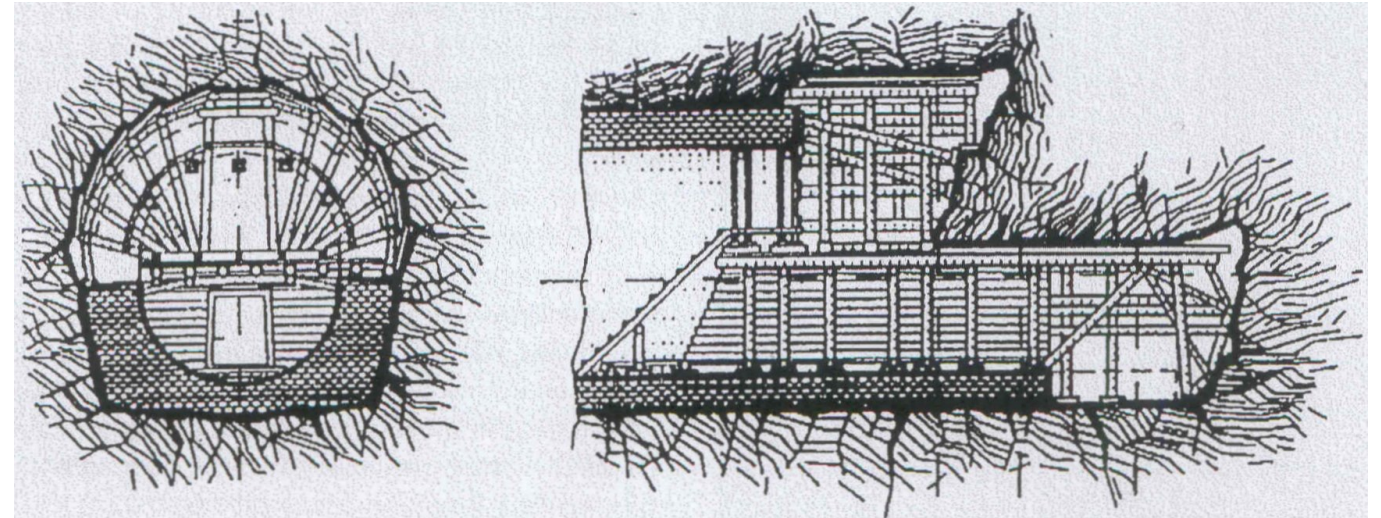
Centine



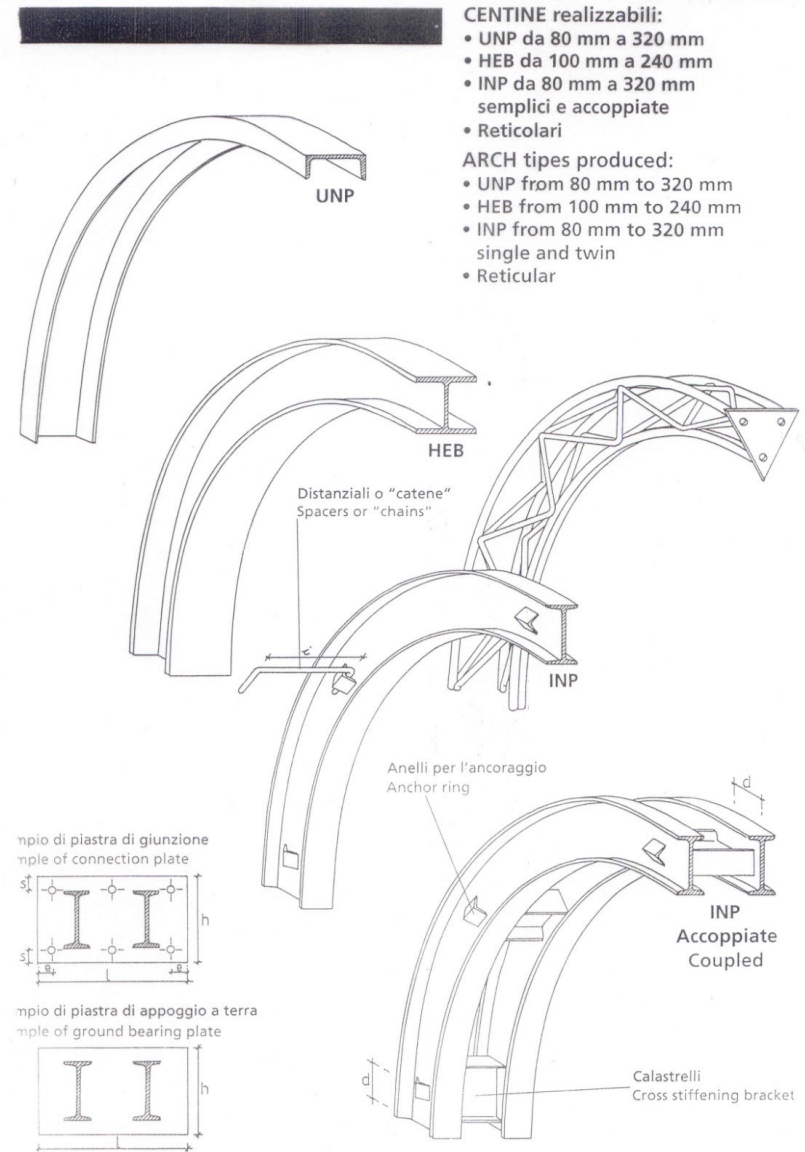
Centine

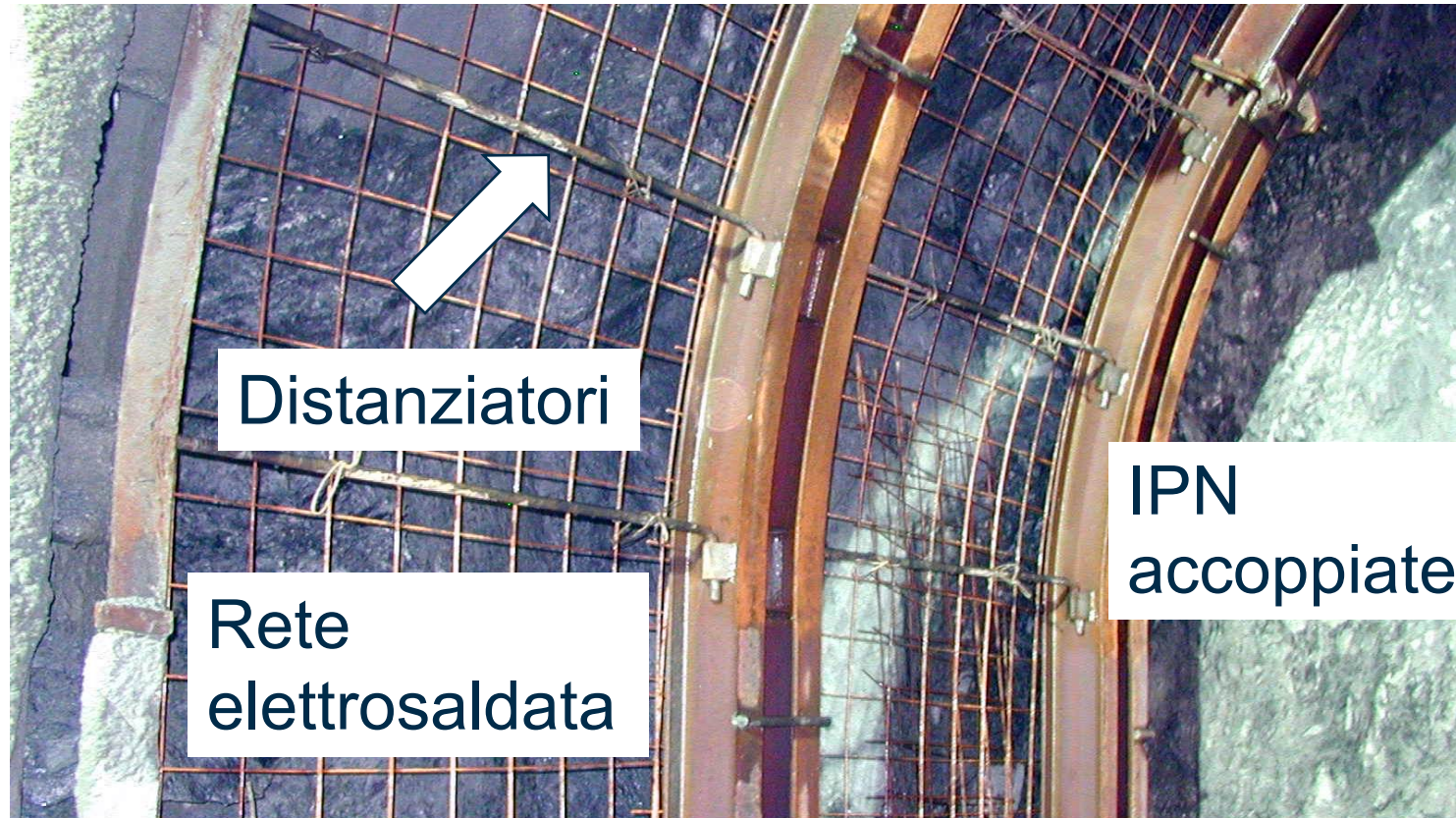


Nel passato : centine in legname

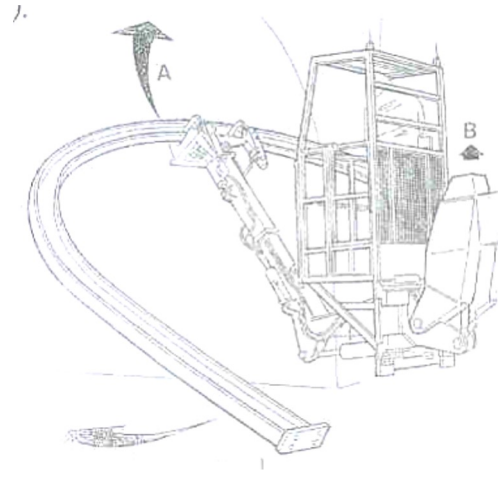


A sketch of the Italian method of excavating and supporting a tunnel in difficult ground conditions applied in the Cristina tunnel





Centine – montaggio



Calcestruzzo proiettato



Calcestruzzo proiettato

Cemento (42.5)

Inerti (0-8)

Accelleranti

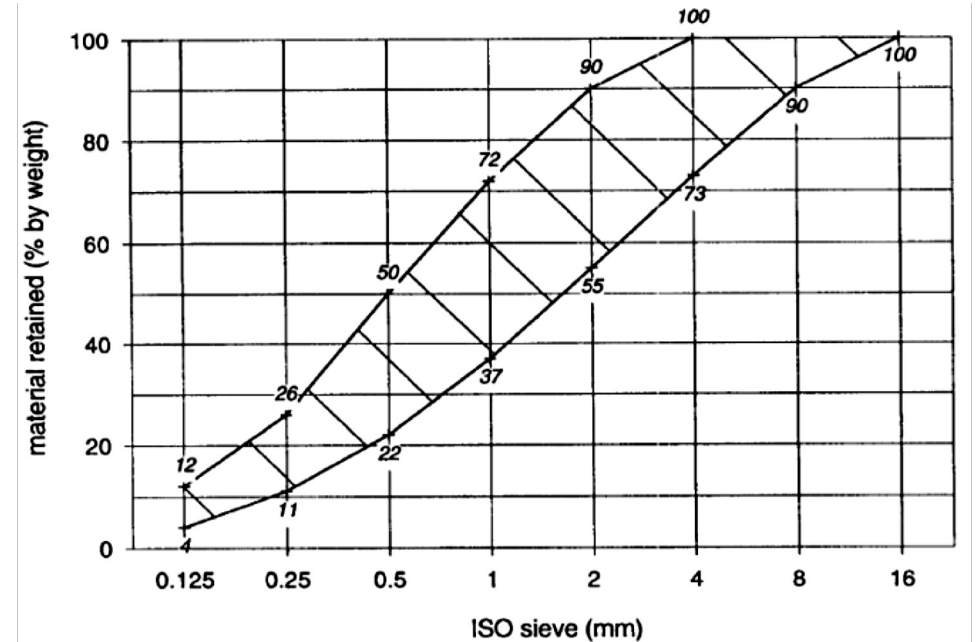
Rapporto acqua cemento

350 - 500 kg/m³

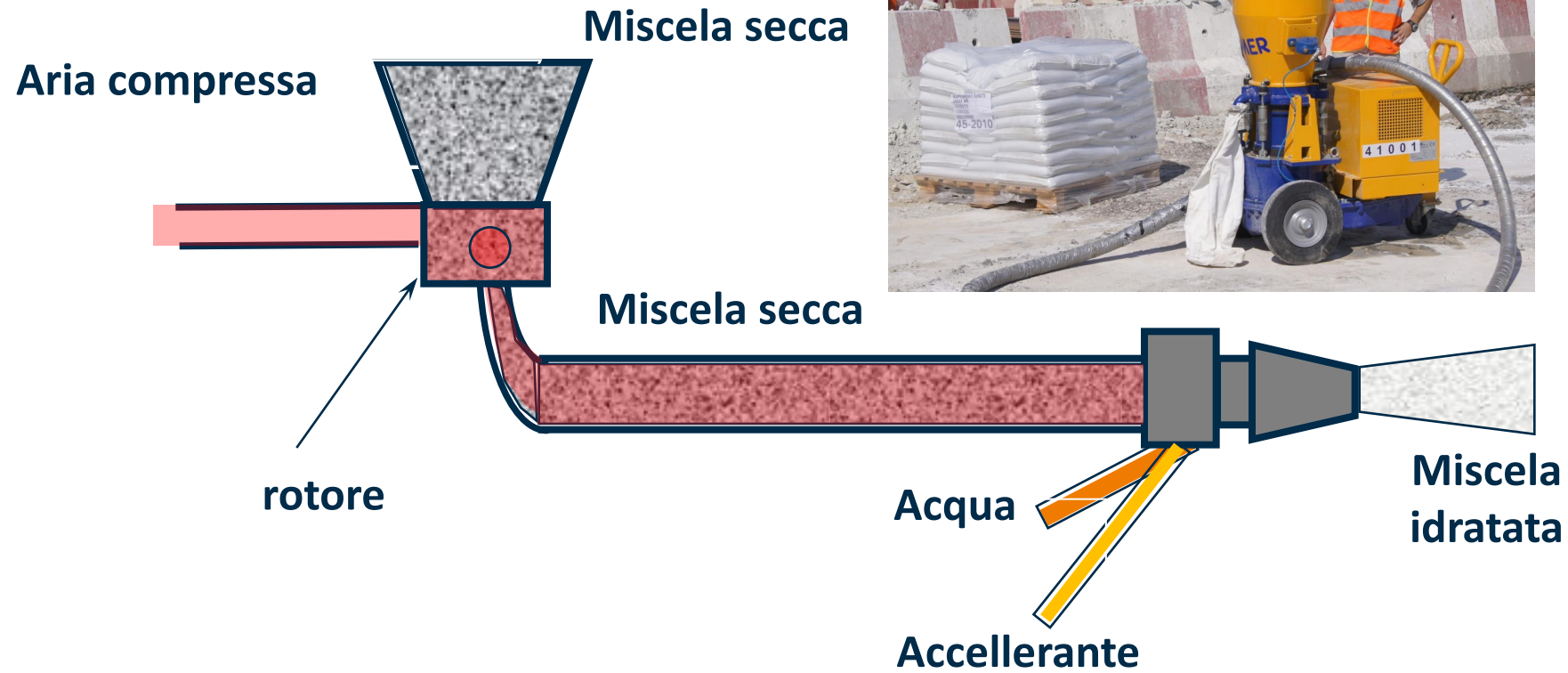
~ 1700 kg/m³

4 - 6 %

0.4 - 0.55



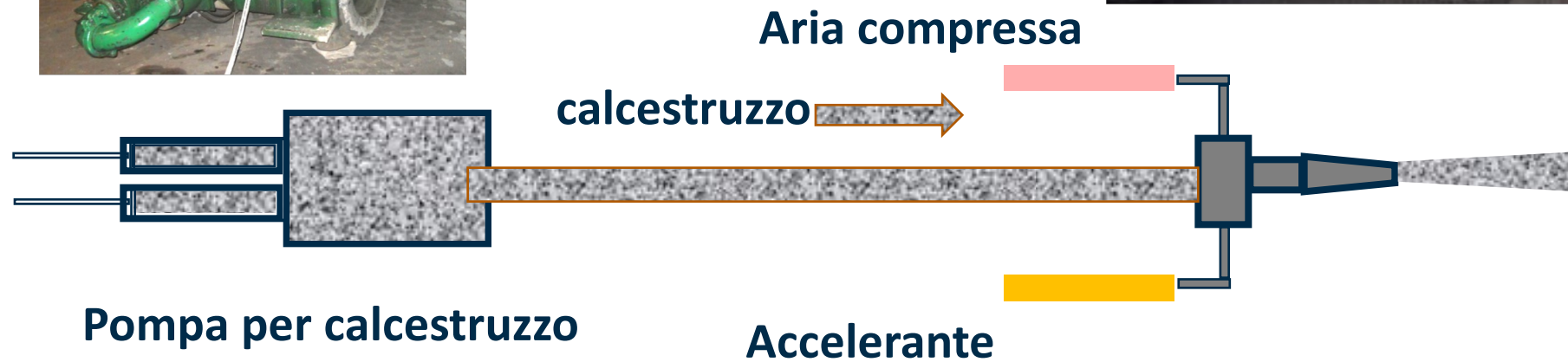
Calcestruzzo proiettato – proiezione a secco



Cortesia Dal Negro

Calcestruzzo proiettato – proiezione a umido

Calcestruzzo preparato
in un impianto di miscelazione



Cortesia Dal Negro

Calcestruzzo proiettato – fibre



Steel fibers



Steel fibers packed



PP structural fibers



Glass fibers



PP anti spalling fibers



Fibre metalliche (dosaggio usuale) $\geq 30 \text{ kg/m}^3$

Calcestruzzo gettato in opera

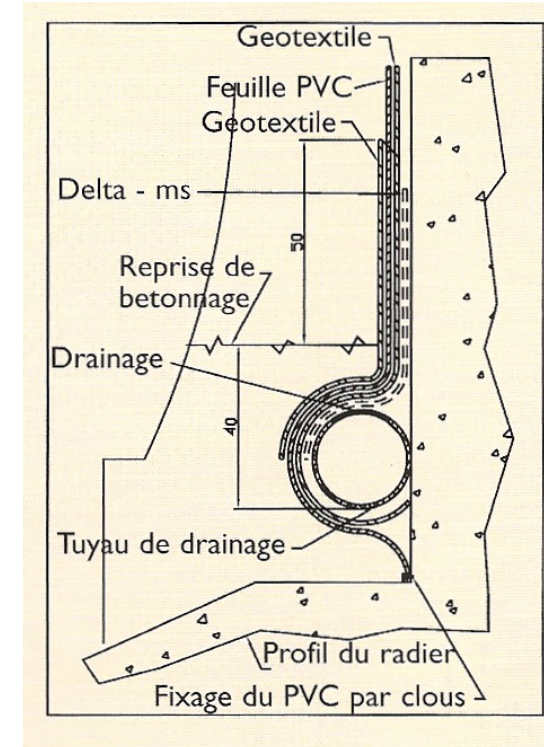
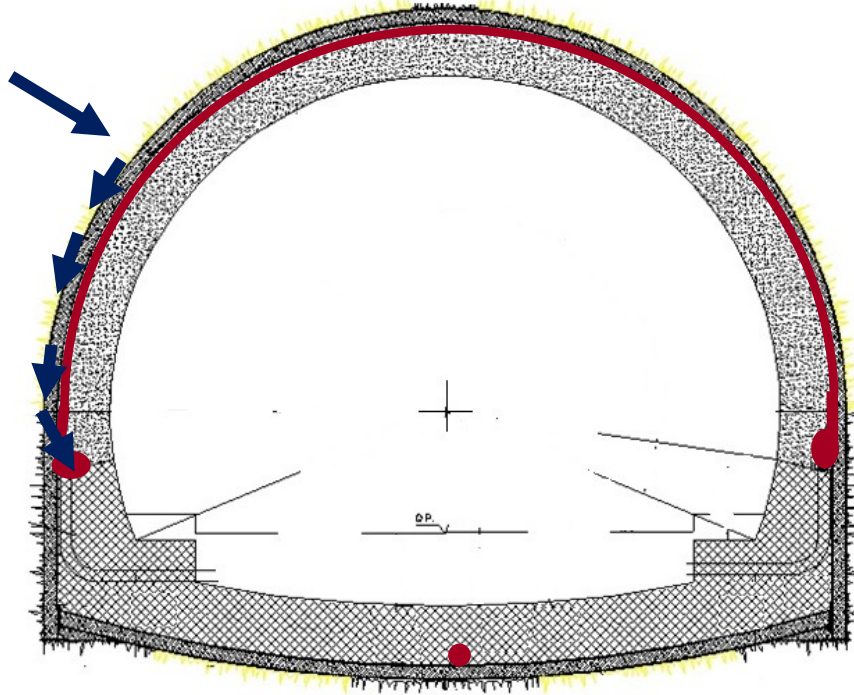


Esempio di cassero

Calcestruzzo gettato in opera



Impermeabilizzazione



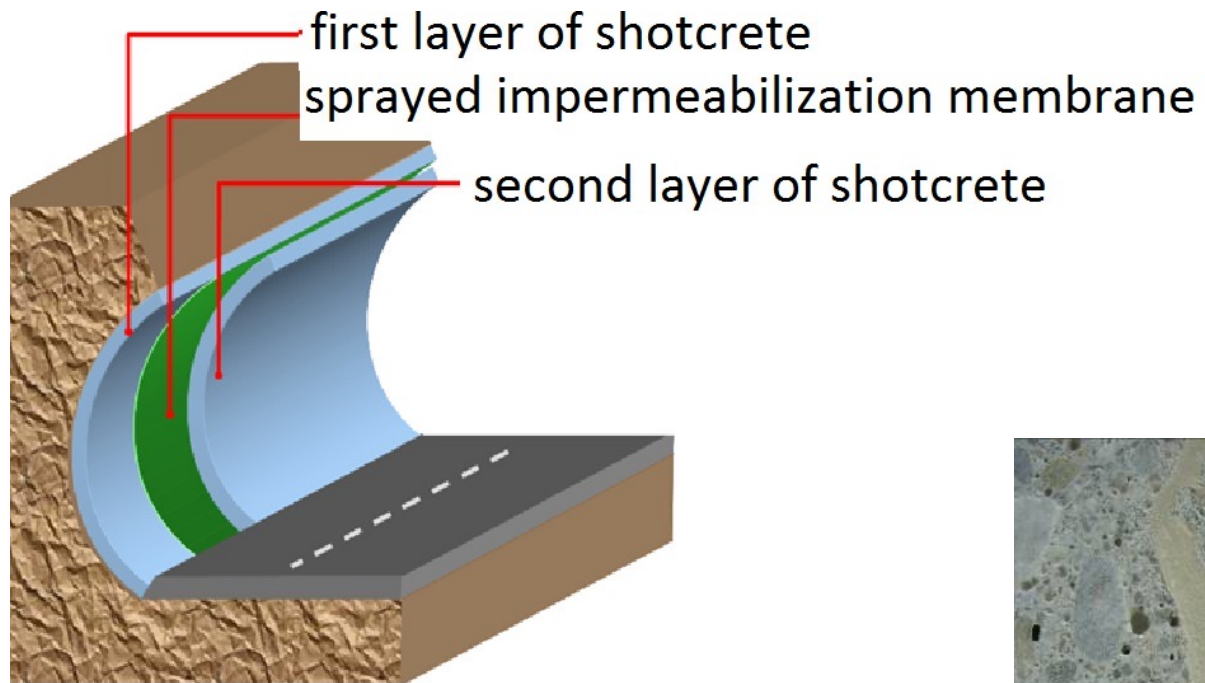
Impermeabilizzazione



Impermeabilizzazione



Impermeabilizzazione – membrane a spruzzo



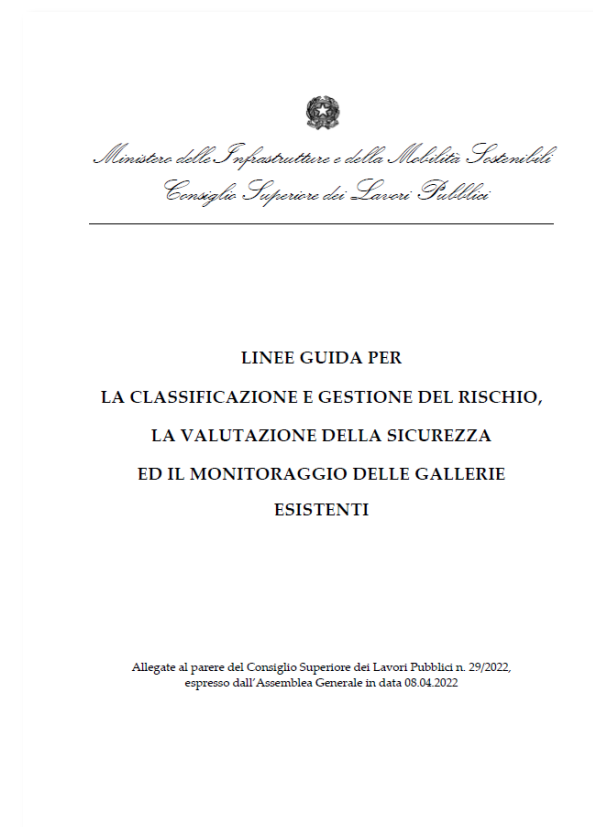
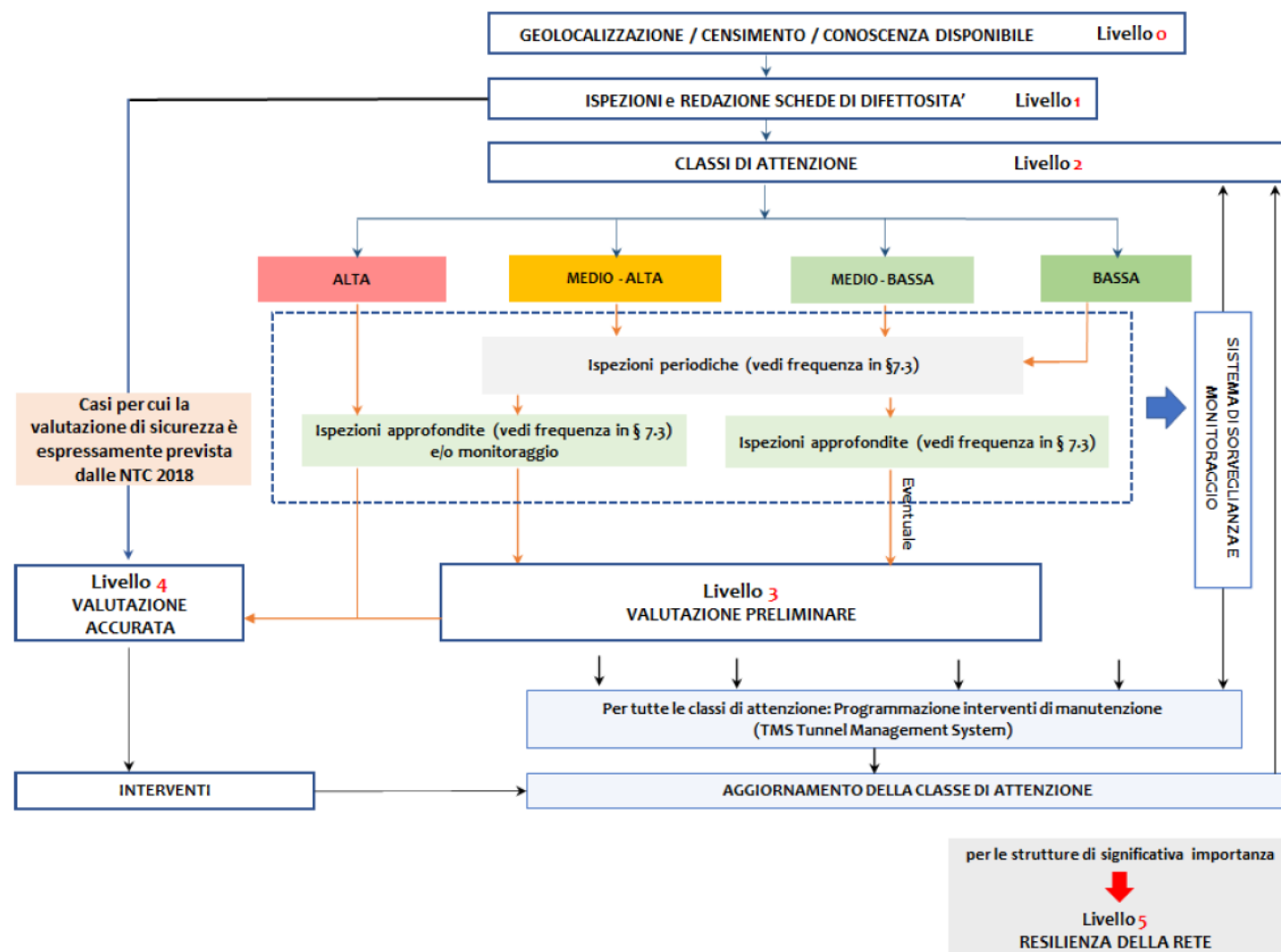
Stati di conservazione delle opere e profili geotecnici

Prof. D. Peila

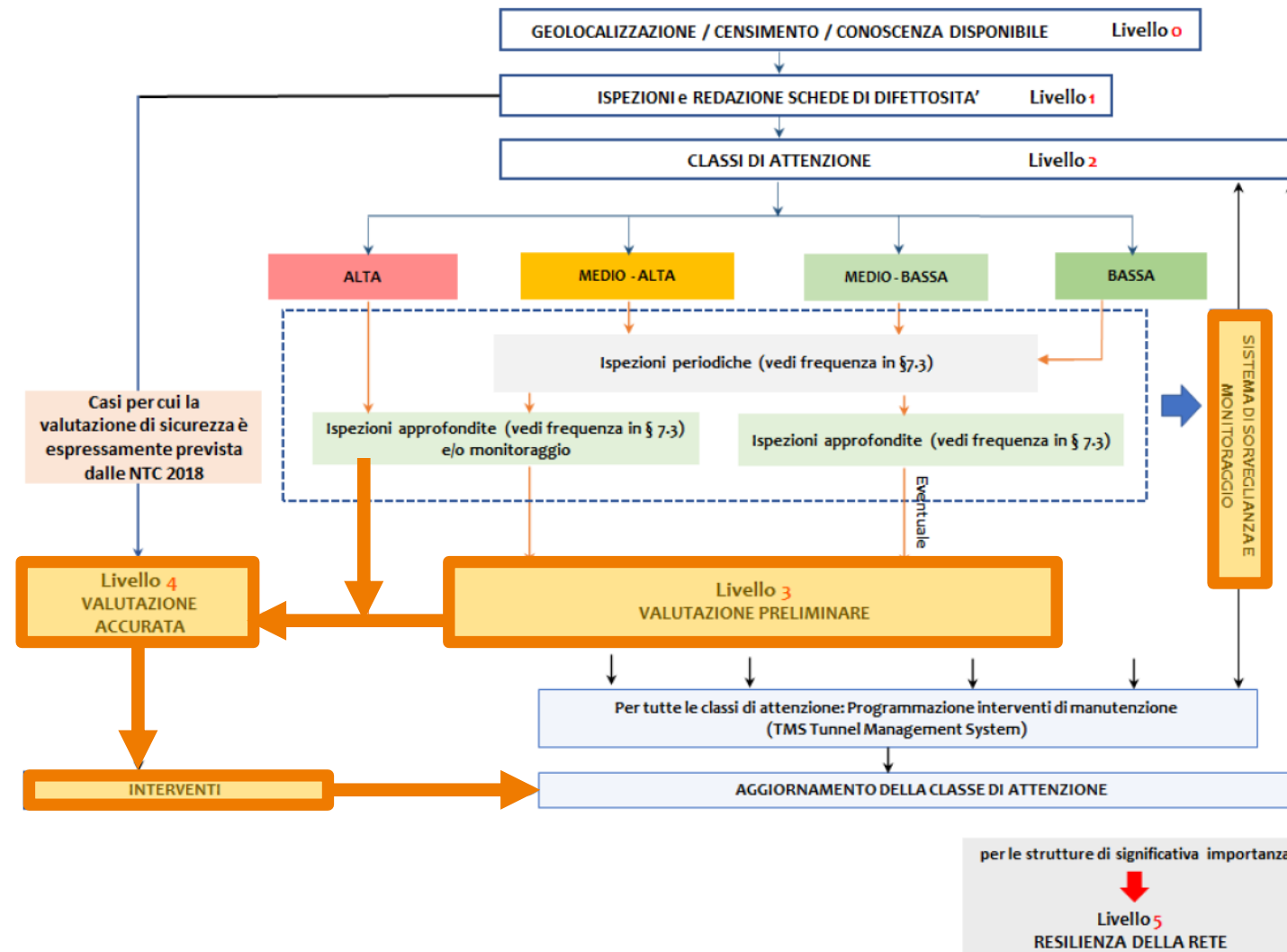


**Politecnico
di Torino**

La sorveglianza delle opere d'arte infrastrutturali



La sorveglianza delle opere d'arte infrastrutturali



Le valutazioni di sicurezza

La valutazione di sicurezza di un'opera deve consentire di ricomporre il quadro delle conoscenze relative al pregresso periodo di esercizio, fin dalle fasi di realizzazione ed a seguito di eventuali interventi successivi.

La verifica della sicurezza è solo la fase finale che, mediante una valutazione numerica, conclude un processo più esteso ed articolato.

Ne consegue che una valutazione di sicurezza sia essa preliminare o approfondita, non può essere ricondotta ad una semplicistica e formale schematizzazione e modellazione numerica ma richiede la ricostruzione accurata del quadro di conoscenza dell'opera,....., ricorrendo anche ad un programma di eventuali indagini integrative opportunamente motivato.

(Linee guida, 2022)



**E' la galleria stessa, con il suo rivestimento e il suo comportamento nel tempo
ad essere una delle fonti principali di conoscenza**

Le valutazioni di sicurezza

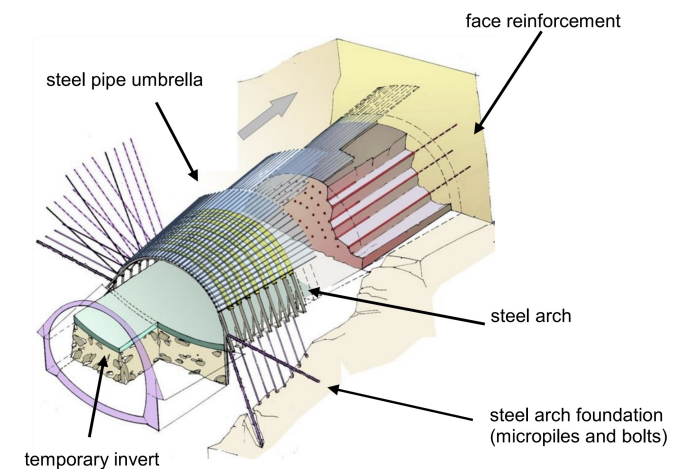
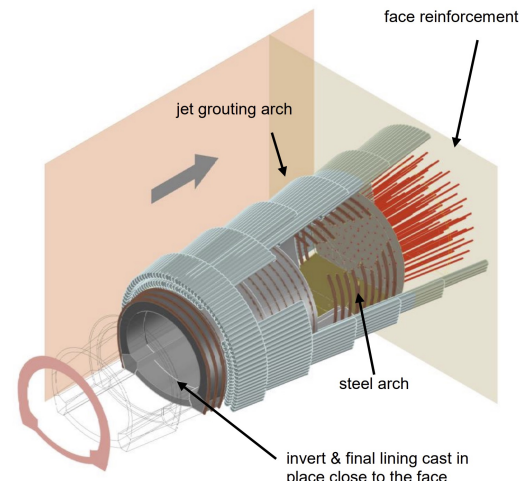
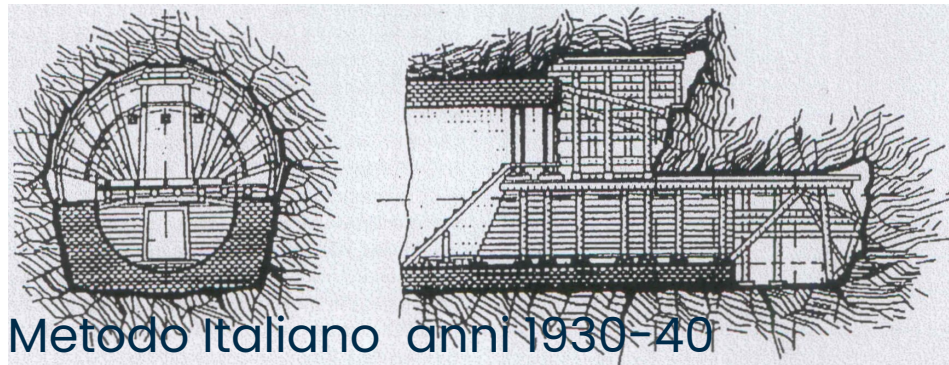
E' necessario ricostruire e comprendere gli schemi, le ipotesi dei carichi e le caratteristiche dei materiali, delle strutture e delle formazioni naturali, presi a riferimento nel progetto originario.

E' necessario mettere in campo una capacità di lettura dell'opera esistente e non limitarsi ad applicare criteri e schemi di calcolo all'attualità valide per opere di nuova costruzione in cui tutte le scelte progettuali sono possibili.

(Linee guida, 2022)



E' necessario un cambio di paradigma



Handbook of Tunnels and Underground Works (2022)

La rete autostradale italiana ha avuto il suo periodo di sviluppo massimo tra gli anni 60 e 70

Le valutazioni di sicurezza

5.2.6 Valutazione accurata

Per le situazioni geotecniche complesse oppure nel caso in cui le analisi preliminari confermano in rischio significativo per l'opera risulta necessario procedere ad una valutazione accurata

In questo caso l'analisi richiede l'impiego di modelli numerici di tipo piano o tridimensionali e al simulazione delle fasi costruttive di scavo, posa in opera delle strutture di rinforzo e sostegno.

L'attendibilità dei risultati ottenuti dal ricorso a modelli numerici avanzati è tuttavia notevolmente influenzata dalla corretta definizione del modello geotecnico dell'ammasso, dalla situazione idraulica attorno allo scavo, dalle caratteristiche dei materiali e dalla fasi costruttive dell'opera.

Anche in presenza della documentazione originaria di progetto è opportuno effettuare indagini per verificare ed integrare le informazioni possedute.

In particolare potranno essere effettuati:

- misure geofisiche per il controllo dello spessore dei rivestimenti e della eventuale presenza di vuoti dietro di essi;
- saggi in situ sugli elementi costruttivi
- prove sperimentali per la determinazione delle proprietà meccaniche dei materiali e delle strutture;
- rilievi in situ e carotaggi per determinare lo stato di durabilità dei materiali
- controlli e misure di tipo geomeccanico e geofisico per valutare le caratteristiche dell'ammasso e per individuare lo spessore della fascia allentata nell'intorno dello scavo

(Linee guida, 2022)

Le valutazioni di sicurezza

La sicurezza di gallerie esistenti consegue da una varietà di problematiche che possono interessare l'opera: epoca di costruzione, scelte progettuali, difetti nei dimensionamenti di progetto, difetti costruttivi, caratteristiche dei materiali impiegati e delle formazioni naturali, usura e degrado, caratterizzazione idrogeologica del sito, condizioni di traffico per volumi e composizione.

(Linee guida, 2022)

Non si deve dimenticare che sull'opera possono essere stati effettuati negli anni interventi di vario tipo ed entità che devono entrare nelle valutazioni di sicurezza ed anche nella valutazione delle classi di attenzione tenendo conto del livello di progettazione a cui possono essere ricondotti

Le valutazioni di sicurezza

La back analysis dell'esistente è un percorso necessario



cosa serve per una buona back analysis

Analisi e conoscenza del contesto «geo»

geologia

geomeccanica

presenza di acqua

.....

Documentazione storica

metodo progettuale

metodo costruttivo

fasi costruttive

situazioni particolari

.....

Ispezione strutturale

materiali

geometrie

.....

Indagine strumentale

stato tensionale nel rivestimento

.....

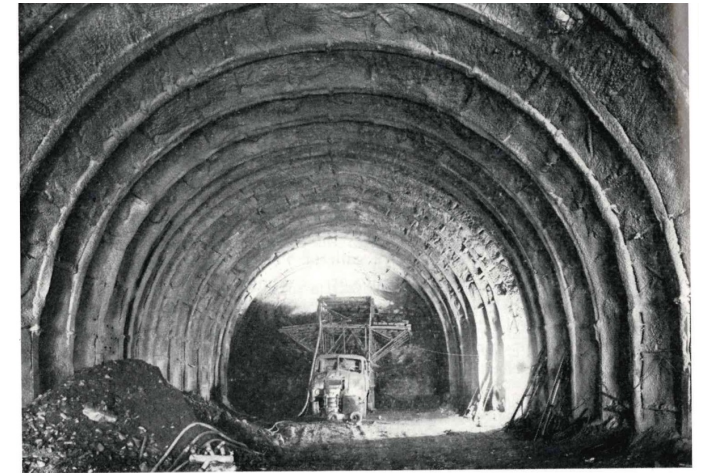
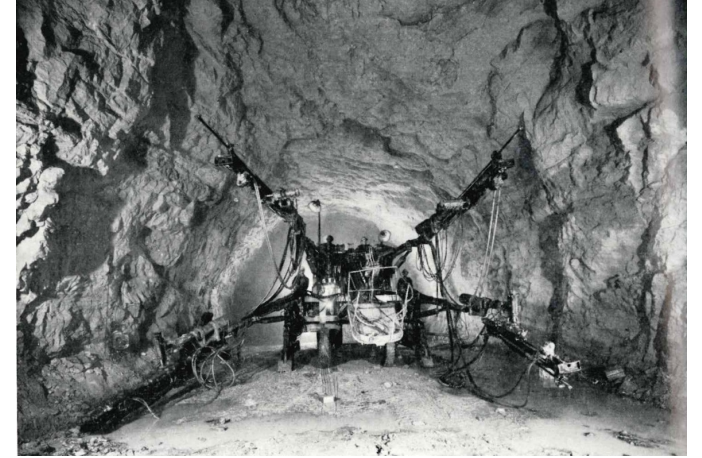


FIG. 7. - Gallerie Montjovet. Nella foto in alto, il carro-jumbo Ingersoll-Rand a quattro bracci Hydra-Booms impiegato per la perforazione dei fori da mina. Nella foto in basso, la tettonizzazione delle rocce attraversate (soprattutto le serpentine) ha reso necessario, per alcuni tratti, l'impiego del prerivestimento in Spritz-beton e di robuste centine.

(Gallerie di Monjovet, AO)

(da F. Grasso, 1969)

La lettura dell'opera: esempio di differenti fasi costruttive usate nel passato

Con l'inizio del '67 si è quindi passati allo scavo a piena sezione, alternato in entrambe le gallerie. Per ogni volata venivano praticati, con le quattro perforatrici Ingersoll, 110 fori da 51 mm di diametro (schema di perforazione a doppia rinora a V), lunghi $2,50 \div 2,80$ m, per la cui preparazione occorreavano circa 3 ore. I fori venivano caricati con esplosivo tipo Gelignite e Nitrogel CFD innescato da detonatori elettrici ritardati. Ogni volata (300 kg di esplosivo) consentiva di abbattere circa 200 m³ di roccia che veniva smarinata in circa 2 ore. Le pareti dello scavo venivano provvisoriamente abbandonate senza alcuna armatura di sostegno.

Durante i tratti in roccia buona (i primi 400 m di ogni galleria) si sono ottenuti avanzamenti massimi di circa 6 m/giorno; pur programmando lo sfondo massimo per volata, non si sono mai raggiunti gli avanzamenti previsti (12 m/giorno) e l'avanzamento medio è stato di 3,50 m/giorno.

Per quanto riguarda le condizioni idrogeologiche, nella galleria destra, tra le progr. 60 e 290 m⁽¹⁾, si è notata solo qualche infiltrazione d'acqua di portata limitata, legata alla presenza di fratture, con tendenza alla progressiva diminuzione di portata, fino anche all'esaurimento; la galleria sinistra invece finora ha attraversato rocce praticamente asciutte.

Alla fine di aprile gli scavi avevano raggiunto, a piena sezione, le progr. 430 (a destra) e 381 (a sinistra), senza che fossero state messe in opera armature di sostegno provvisorio. Qualche distacco lastroide, non degno di rilievo, si è avuto in calotta e nella zona di saldatura fra questa ed il piedritto destro, a causa dei rapporti tra asse delle gallerie e giacitura dei piani di scistosità; per lo stesso motivo è da segnalare qualche difficoltà nell'ottenere contorni di scavo regolari.

Quando già lo scavo aveva raggiunto nella galleria destra la progr. 436 m (tra serpentine molto scistose e pieghettate), tra le progr. 353 e 373 m (a circa 1 mese dalla perforazione) si è verificato un imponente crollo in calotta (circa 1000 m³) in seguito al quale il cantiere è rimasto semiparalizzato. Il crollo fu dovuto alla decompressione (rilascio) delle pareti dello scavo, che ha portato al distacco di una grossa placca di micascisti granatiferi, scollatasi dalle anfiboliti che si trovavano al tetto. Il fenomeno di decompressione certamente è avvenuto per gradi: al suo insorgere le forze in gioco erano assai modeste, ma sono poi andate gradatamente aumentando sino a generare il crollo della volta, che appena innescato è avvenuto in forma massiccia e rapidissima. Per contenere la decompressione sarebbe forse stato sufficiente opporre subito dopo lo scavo una reazione superficiale su tutta la sezione (prerivestimento con spritz-beton e centinatura).

Nella galleria sinistra lo scavo, che frattanto era stato sospeso per circa venti giorni impiegando le maestranze nella realizzazione del rivestimento in calcestruzzo (70 cm di spessore), riprese incontrando serpentine molto fratturate. Le profondità degli sfondi erano limitate dalla qualità della roccia che richiedeva spesso un'abbondante armatura di sostegno (sono state messe in opera centine metalliche con profilato tipo NP 180, distanziate l'una dall'altra di 80÷100 cm): l'avanzamento è stato mediamente compreso tra 0,90 e 1,00 m/giorno. Dalla progr. 381 alla 560 m,

registrandosi brusche ed imprevedibili variazioni delle condizioni fisiche delle rocce (ora scistose e friabili, ora compatte) e quindi possibilità di sviluppo di fornelli sono state messi in opera il prerivestimento in spritz-beton e robuste centine di sostegno del rivestimento (fig. 8) che rimasero murate nel getto della volta costituendone efficace armatura; per un breve tratto (progr. 430-460 m) è stato attuato anche l'arco rovescio.

In corrispondenza alla progr. 464 m è stata aperta una finestra di 20 m, utile per la ventilazione; si pensava anche di costruire, partendo dalla stessa finestra, una strada di servizio a mezza costa lungo il pendio sinistro della stretta valliva per collegarsi con l'imbocco nord della galleria e consentire l'attacco contemporaneo su entrambi i fronti; tale soluzione venne poi accantonata in considerazione dell'acclività marcata del versante e data la presenza della ferrovia sullo stesso pendio, a quota leggermente più bassa (fig. 9).

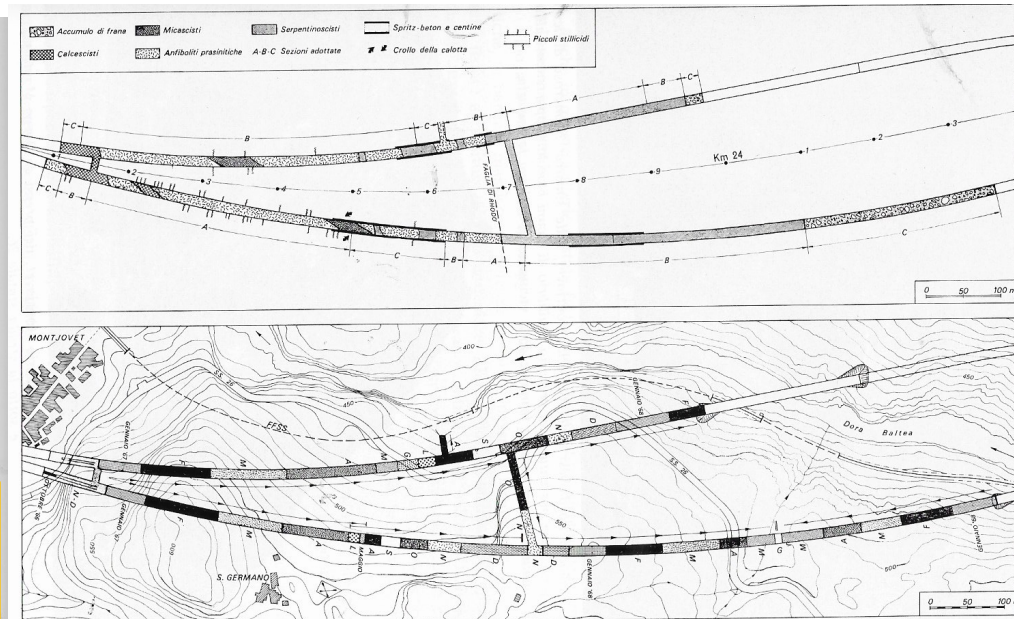
Nella galleria destra intanto, dopo una sosta di circa due mesi durante i quali fu messo in opera il rivestimento in calcestruzzo (50-70 cm di spessore), con estrema attenzione e oculatezza venne superata la frana, procedendo con un cunicolo d'avanzamento in calotta, successivamente allargato con scavo armato, attuando la sezione C con arco rovescio e rivestimento di 100 cm. In agosto venne ripreso l'avanzamento sul fronte abbandonato da tre mesi, impiegando ancora l'arco rovescio fino alla progr. 480 m.

A questo punto, considerando le scadenti caratteristiche della roccia che si stava attraversando (serpentinoscisti), si decise di proseguire l'avanzamento su entrambi i fronti con scavo a piena sezione della sola calotta (circa 40 m²), impiegando ancora il jumbo Ingersoll e servendosi del wagon-drill per il successivo abbattimento dello strozzo e dei piedritti. Appena terminato lo scavo, ogni 10 m veniva messo in opera il rivestimento (spessore di 70 cm) per evitare la decompressione delle masse circostanti la sezione di scavo.

Per accelerare i tempi, considerando che sulla destra dovevano ancora essere perforati 800 m, dalla galleria sinistra si raggiunse l'asse della galleria destra con una traversa di 140 m (utile, oltre che per sveltire le operazioni, anche per la ventilazione) che incontrò le solite difficoltà legate alla tettonizzazione delle serpentine.

Gli avanzamenti proseguirono quindi su tre fronti: uno nella galleria sinistra, due in quella destra (entrambi diretti verso l'imbocco Nord e distanziati di circa 150 m). Le rocce, sempre molto fratturate e talora in condizioni di particolare friabilità, continuarono a costituire notevoli ostacoli all'avanzamento consentendo sfondi giornalieri varianti da 1 a 3 metri.

Nel gennaio '68 iniziarono gli scavi anche dall'imbocco Nord della galleria destra; il lavoro venne affidato all'impresa ICEP di Bologna, che stava per ultimare le Gallerie Petit Monde sul versante destro della stretta. Fu attraversata per un lungo tratto (300 m circa) la copertura quaternaria costituita dall'accumulo della frana del monte Avi (il cui spessore si rivelò decisamente superiore a quanto si poteva prevedere). Data la precaria stabilità dell'accumulo, non vennero impiegati esplosivi, ma solo il martello pneumatico con avanzamenti, in cunicolo armato, di circa 2 m/giorno; successivamente lo scavo veniva allargato e subito rivestito (100 cm di spessore) adottando l'arco rovescio.



(Gallerie di Monjovet, AO)

(da F. Grasso, 1969)

Lettura dell'opera: comprensione del comportamento

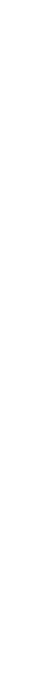
galleria di Hone (AO) Lo scavo attraverso gli gneiss albitici è stato fatto a piena sezione ricorrendo talvolta a qualche bullonaggio in calotta (da F. Grasso, 1969)

Qualche difficoltà s'è incontrata alle progr. km 8,150 e 8,390 ove gli gneiss erano interessati da fratture più frequenti e più vistose; l'avanzamento a piena sezione è stato allora assicurato ricorrendo ad alcune bullonature (fig. 3). Presso gli imbocchi, essendo presente una fitta rete di litoclasti, sono state messe in opera centine metalliche distanziate l'una dall'altra di 1 m: in totale (nei due sotterranei) i tratti centinati ammontano a soli 36 m. Tra le progr. km 8,460 e 8,500 la presenza di rocce aplitiche particolarmente dure da perforare, alternate con altre prevalentemente scistose e friabili, ha presentato alcuni inconvenienti durante la perforazione.

Ultimati gli scavi, è stato eseguito il rivestimento in calcestruzzo (50 cm di spessore, sezione tipo A) in due fasi distinte, piedritti e poi calotta; nei tratti già centinati, ove la roccia si presentava poco stabile, lo spessore del rivestimento è stato portato a 80 ÷ 100 cm.

Le venute d'acqua, diffuse capricciosamente nelle due gallerie lungo le litoclasti, sono state molto limitate; è più opportuno parlare di stillicidi dovuti ad una certa permeabilità per fessurazione degli gneiss. I lavori d'avanzamento comunque non sono mai stati ostacolati. Le acque sono state raccolte in scanalature di drenaggio applicate lungo le fratture e concentrate in una canaletta laterale per lo smaltimento verso l'esterno.

Due situazioni diverse



galleria di Hone (AO) Lo scavo attraverso gli gneiss albitici è stato fatto a piena sezione ricorrendo talvolta a qualche bullonaggio in calotta (da F. Grasso, 1969)

Lettura dell'opera: modalità costruttive

Getto dei rivestimenti in calcestruzzo



Galeria di Petit Mond (AO)

inizio 900: il calcestruzzo si movimentava e gettava con benne e nastri trasportatori

dal 1930 si iniziarono ad usare pompe con impulso pneumatico che rimasero in uso sino al 1960/65.

dal 1965 si iniziarono ad impiegare pompe peristaltiche e successivamente pompe a doppio pistone con valvole di scambio a diversa soluzione

dal 1965-70 si utilizzano sempre più pompe a pistoni per getti in galleria (Putzmeister, Schwing, Case (USA), Waizingher, CIFA).

In Italia le gallerie del Frejus stradale e del Gran Sasso sono le prime grandi opere in sotterraneo con getti realizzati con pompe a pistoni.

(Cortesia F. Bertino)

Lettura dell'opera: modalità costruttive

Getto dei rivestimenti in calcestruzzo



(Cortesia F. Bertino)

Lettura dell'opera: modalità costruttive

Uso del calcestruzzo proiettato e dei bulloni



La prima applicazione di bullonature sistematiche può essere fatta risalire al 1950 per una gallerie di derivazione di 250m di lunghezza nell'impianto idroelettrico di Keyhole (Wyoming, USA)
(Kovari, 2003)

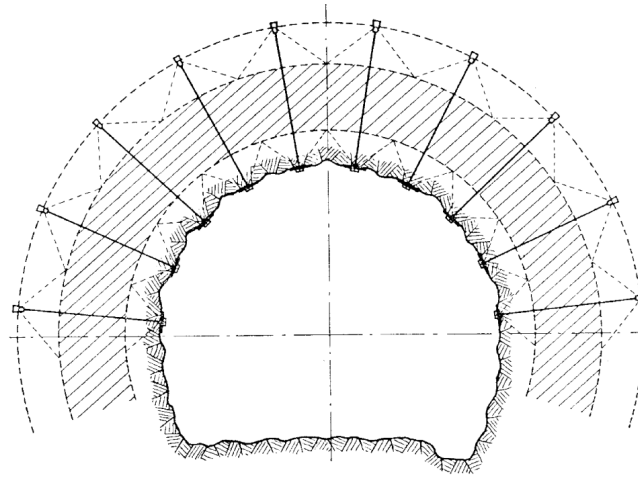
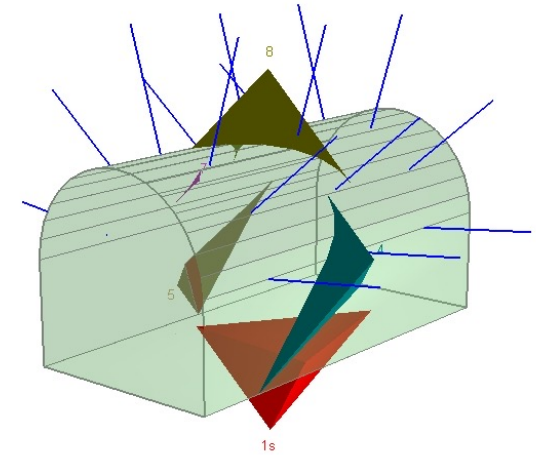


Fig. 4. Ground arch produced by rock bolts (Talobre, 1957).

L'uso sistematico del calcestruzzo proiettato nelle gallerie civili abbinato alle centine si può far risalire a circa gli anni 60 ed un analogo sviluppo temporale può essere attribuito ai bulloni.



Lettura dell'opera: modalità costruttive

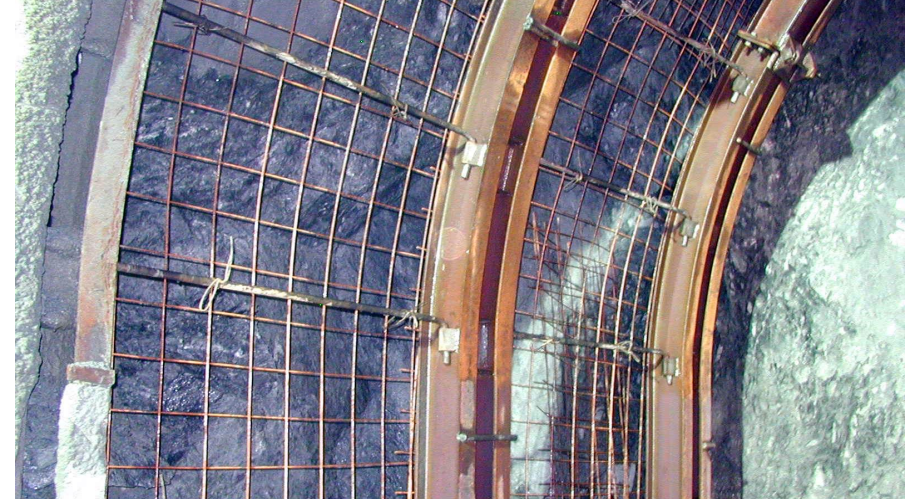
Centine



(Proctor & White, 1946)

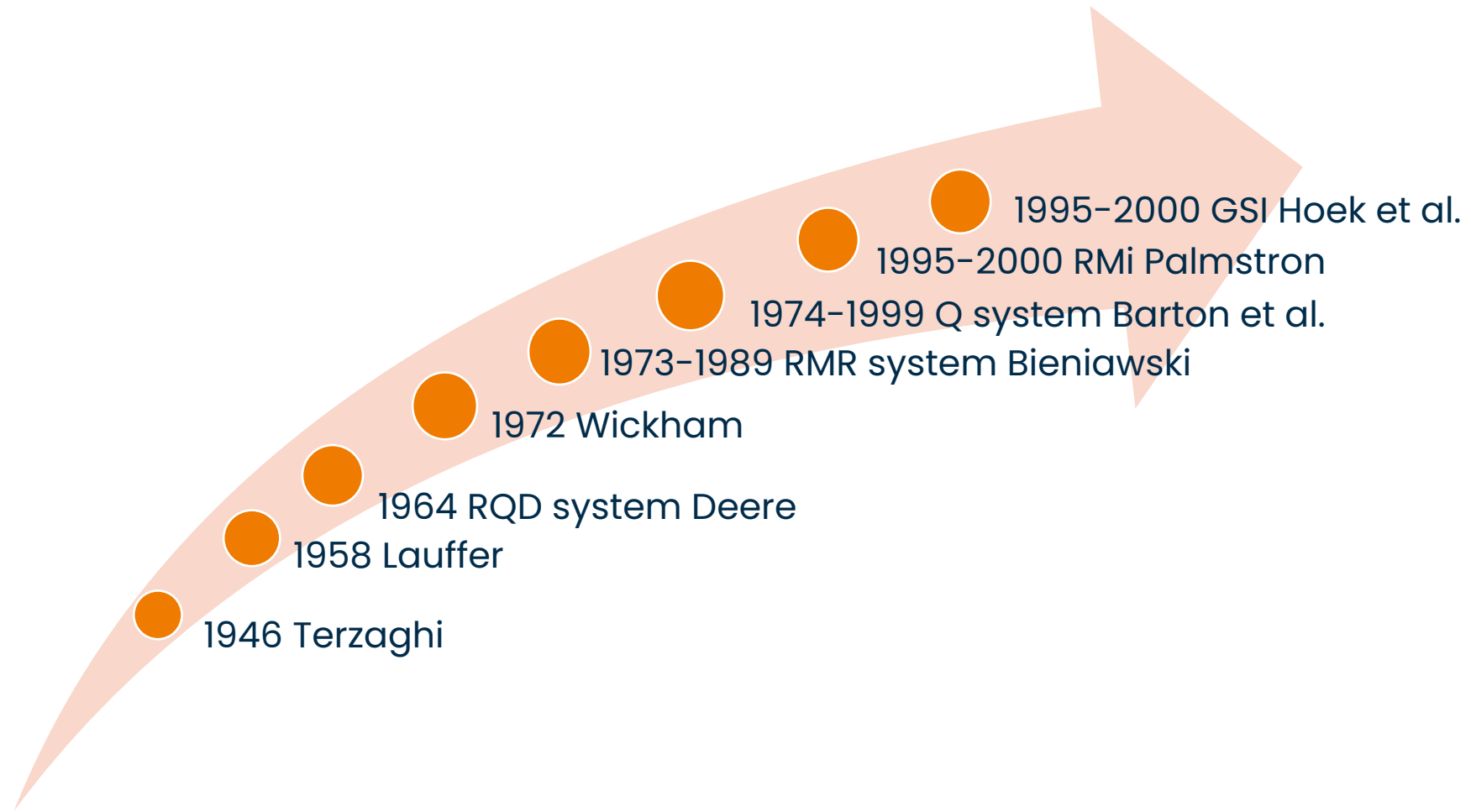


(anni '60)

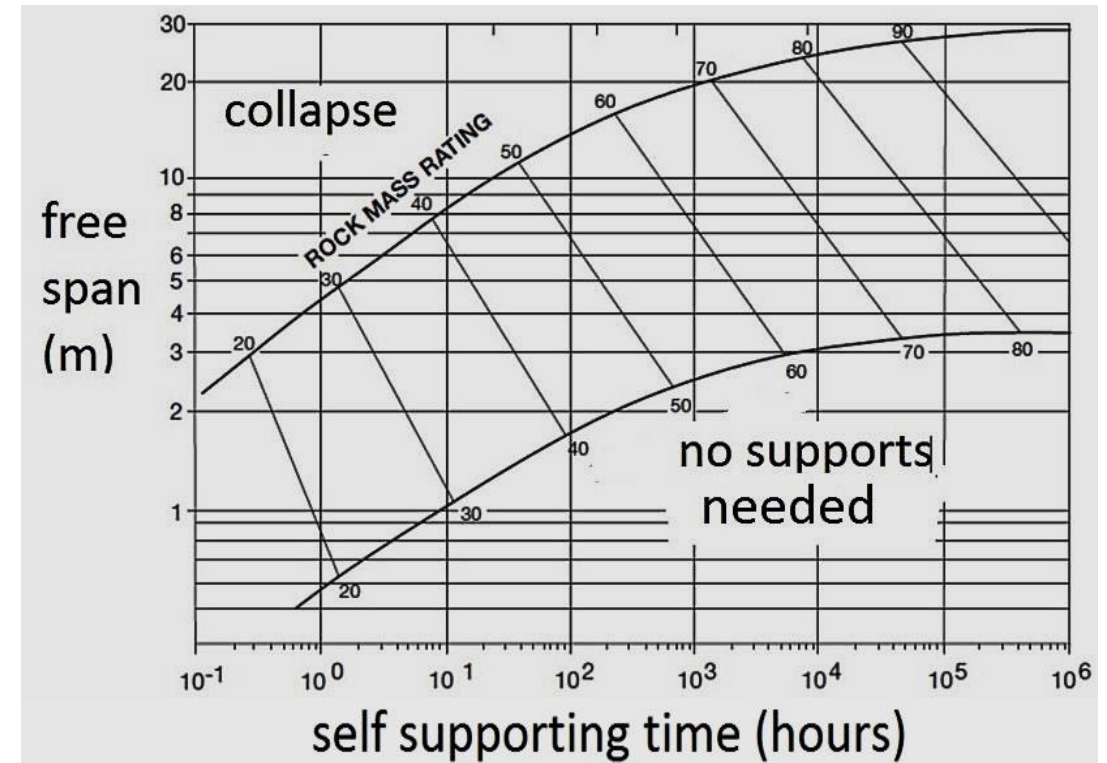
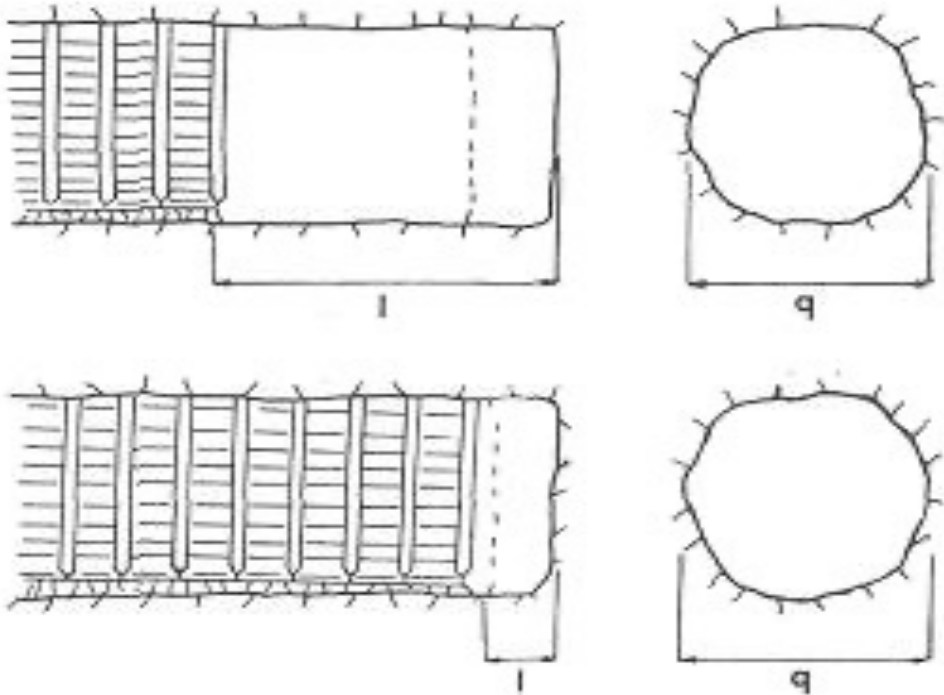


(anni '90)

Progettazione dell'opera esistente: caratterizzazione della massa rocciosa e valutazione dei carichi agenti



Progettazione dell'opera esistente: caratterizzazione della massa rocciosa e valutazione dei carichi agenti



Progettazione dell'opera esistente: caratterizzazione della massa rocciosa e valutazione dei carichi agenti

Metodo del solido di carico: varie formulazioni basate sullo stesso principio

CONDIZIONI DELLA ROCCIA	RQD	CARICO DI ROCCIA H_p AGENTE SUL SOSTEGNO DI UNA GALLERIA DI LARGHEZZA B ED ALTEZZA H_i PER PROFONDITÀ DELLA GALLERIA SUPERIORI A $(B + H_i)$	OSSERVAZIONI
1. Roccia dura e intatta	95 – 100	Zero	Rivestimento leggero soltanto se, per effetto dello scavo con esplosivo, dopo ore o giorni dallo scavo la roccia comincia a mostrare distacchi di schegge (spalling, sfoliazione, desquamazione) o, indipendentemente dalle mine dello sparo, avvengono spontanee e violente proiezioni di crostoni dalla calotta o dalle pareti (popping, colpo di montagna, colpi di tetto, colpi di parete)
2. Roccia dura stratificata o scistosa	90 – 99	$0 + 0.5 B$	Leggero rivestimento con funzione di protezione e sicurezza
3. Roccia massiva moderatamente fratturata	85 – 95	$0 + 0.25 B$	Il carico può variare da punto a punto senza una regola dominante
4. Roccia suddivisa in blocchi disgiunti con discontinuità vuote o riempite di materiale proveniente dalla alterazione esterna della roccia stessa	75 – 85	$0.25 B + 0.35 (B + H_i)$	Non vi sono spinte laterali (sulle pareti)
5. Roccia come al punto 4 ma più intensamente suddivisa e più fittamente spezzettata e fratturata	30 – 75	$(0.35 + 1.10) (B + H_i)$	Modeste spinte laterali
6. Roccia completamente frantumata, ma non alterata (dal punto di vista chimico) 6a. Sabbie e ghiaie	3 – 30 0 – 3	$1.10 (B + H_i)$	Spinte laterali considerevoli. In presenza di acqua sul fondo occorre dare una adeguata base alle centine o adottare centine circolari (chiuse)
7. Rocce spingenti (ma non rigonfianti, senza cioè variazioni percettibili del volume, contenenti elevate quantità di minerali argillosi, non rigonfianti, tipo caolinite, illite, ecc.) a media profondità	NA	$(1.10 + 2.10) (B + H_i)$	Forti spinte laterali; occorrono centine anche in arco rovescio: sono raccomandabili centine circolari
8. Rocce spingenti (come al punto 7) a grande profondità	NA	$(2.10 + 4.50) (B + H_i)$	Forti spinte laterali; occorrono centine anche in arco rovescio: sono raccomandabili centine circolari
9. Terreni spingenti e rigonfianti, contenenti, cioè, minerali argillosi molto rigonfianti come montmorillonite e simili	NA	75 m indipendentemente dal valore di $(B + H_i)$	Centine circolari. In casi estremi occorrono centine e armature deformabili ("cedevoli")

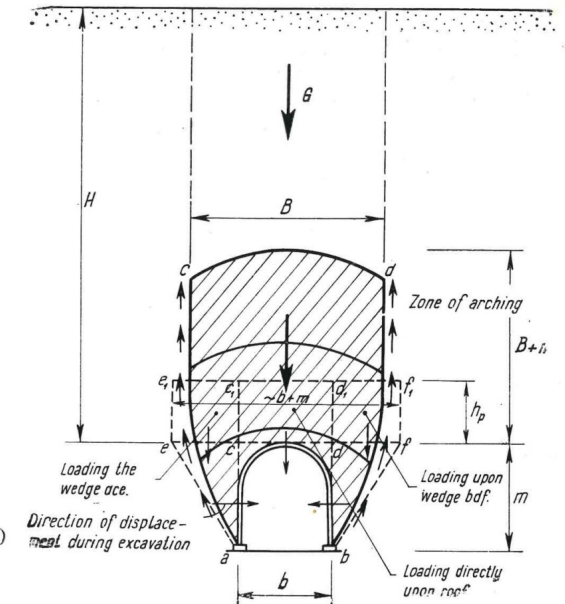
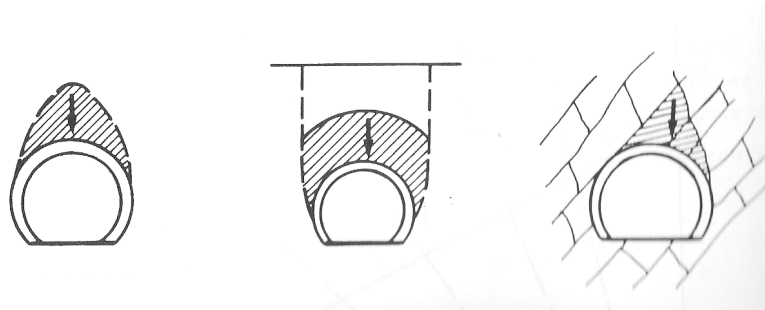
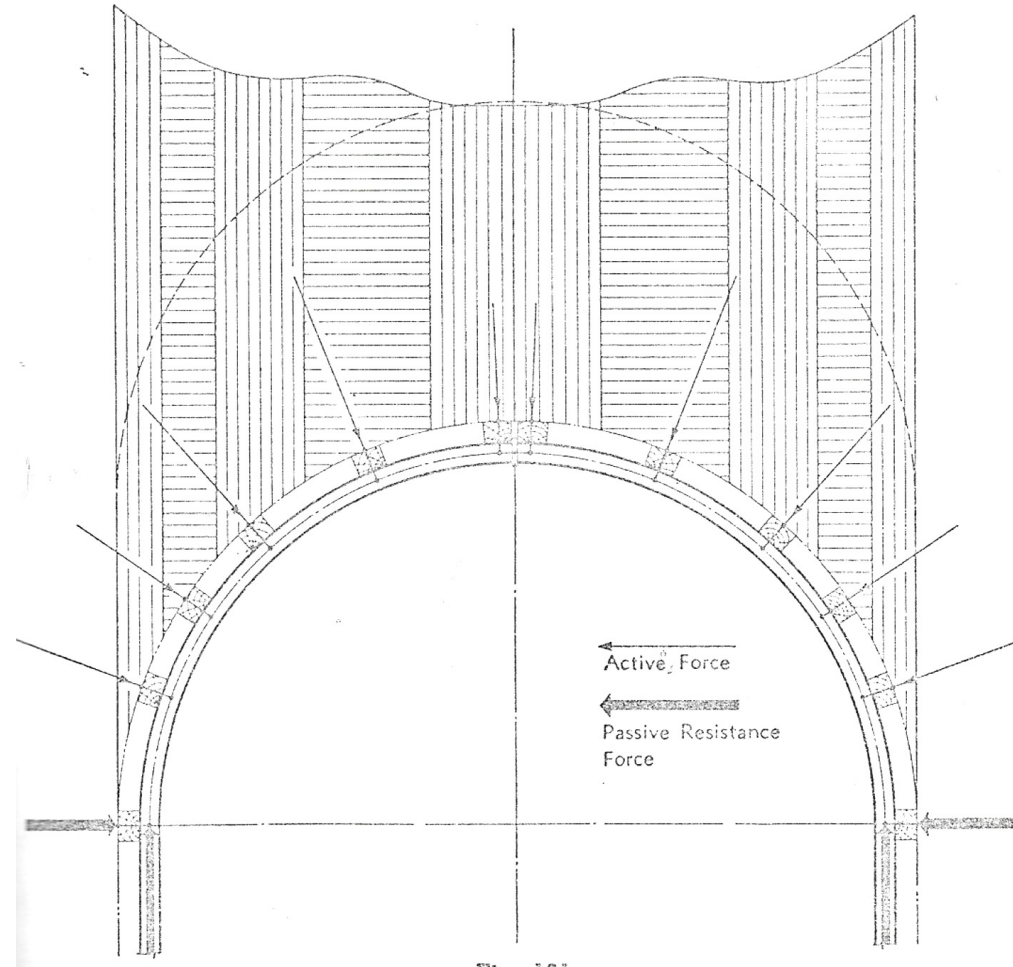


FIG. 3/5. Arching above cavity (after TERZAGHI)

(Szechy, 1966)

Progettazione dell'opera esistente: calcolo strutturale

Dal solido di carico al dimensionamento del rivestimento

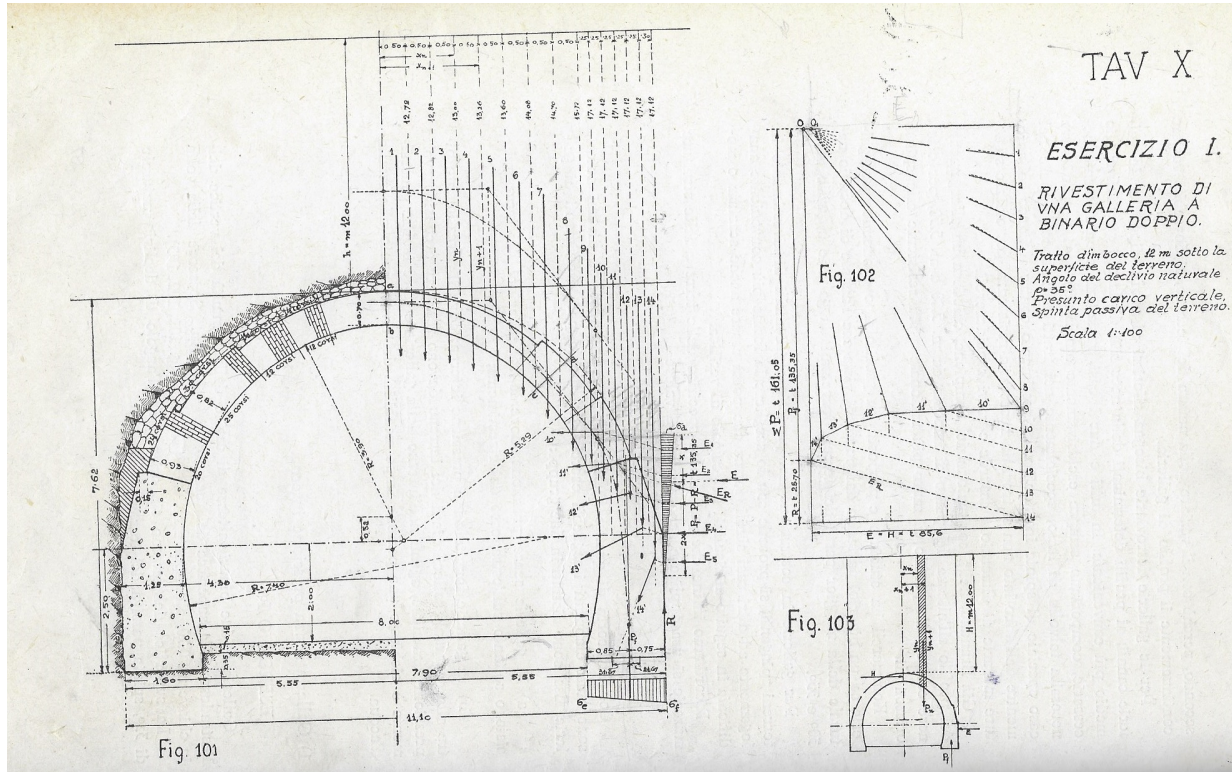


Calcolo centine metalliche

(Proctor & White, 1946)

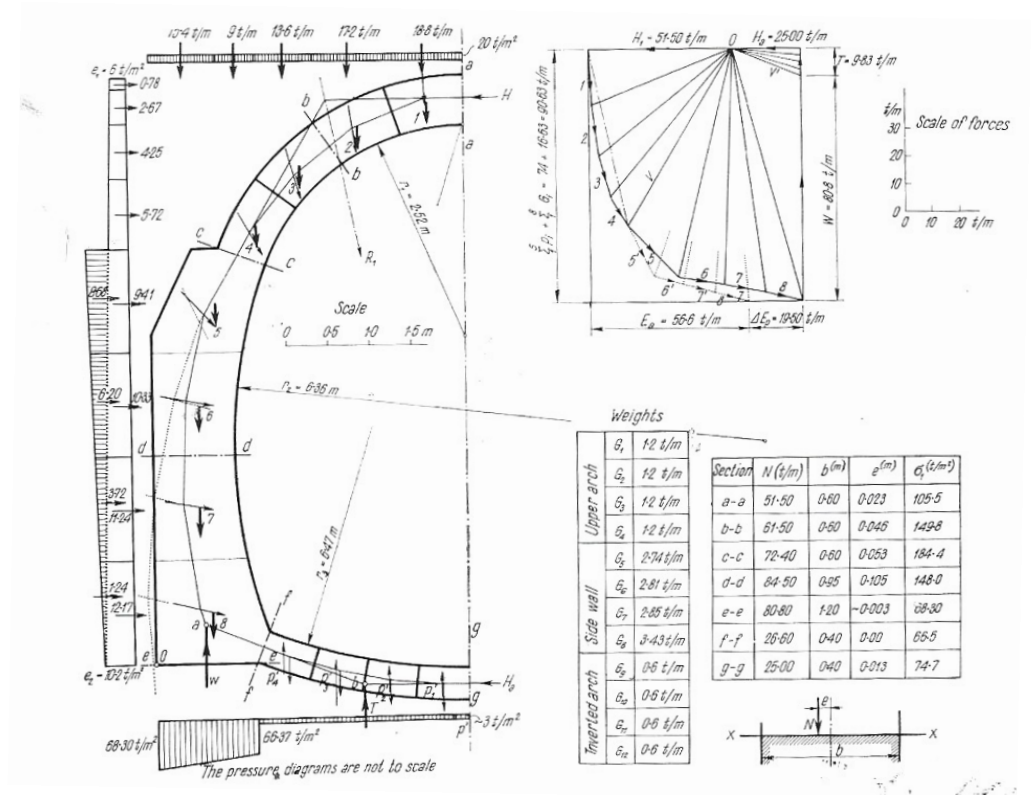
Progettazione dell'opera esistente: calcolo strutturale

Dal solido di carico al dimensionamento del rivestimento



Rivestimento definitivo

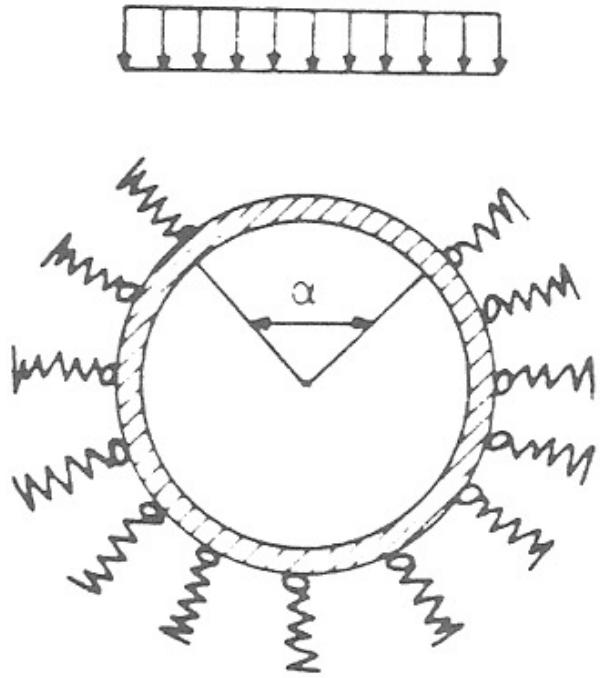
(Desimon, 1939)



(Szechy, 1966)

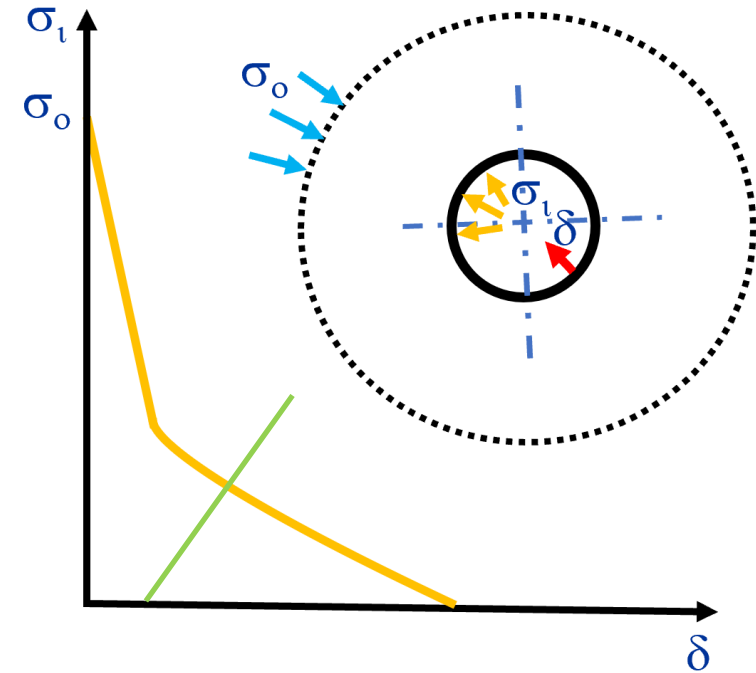
Progettazione dell'opera esistente: calcolo strutturale

Dal solido di carico al dimensionamento del rivestimento



Modello «barre & molle»

(Descoeudres, 1989)

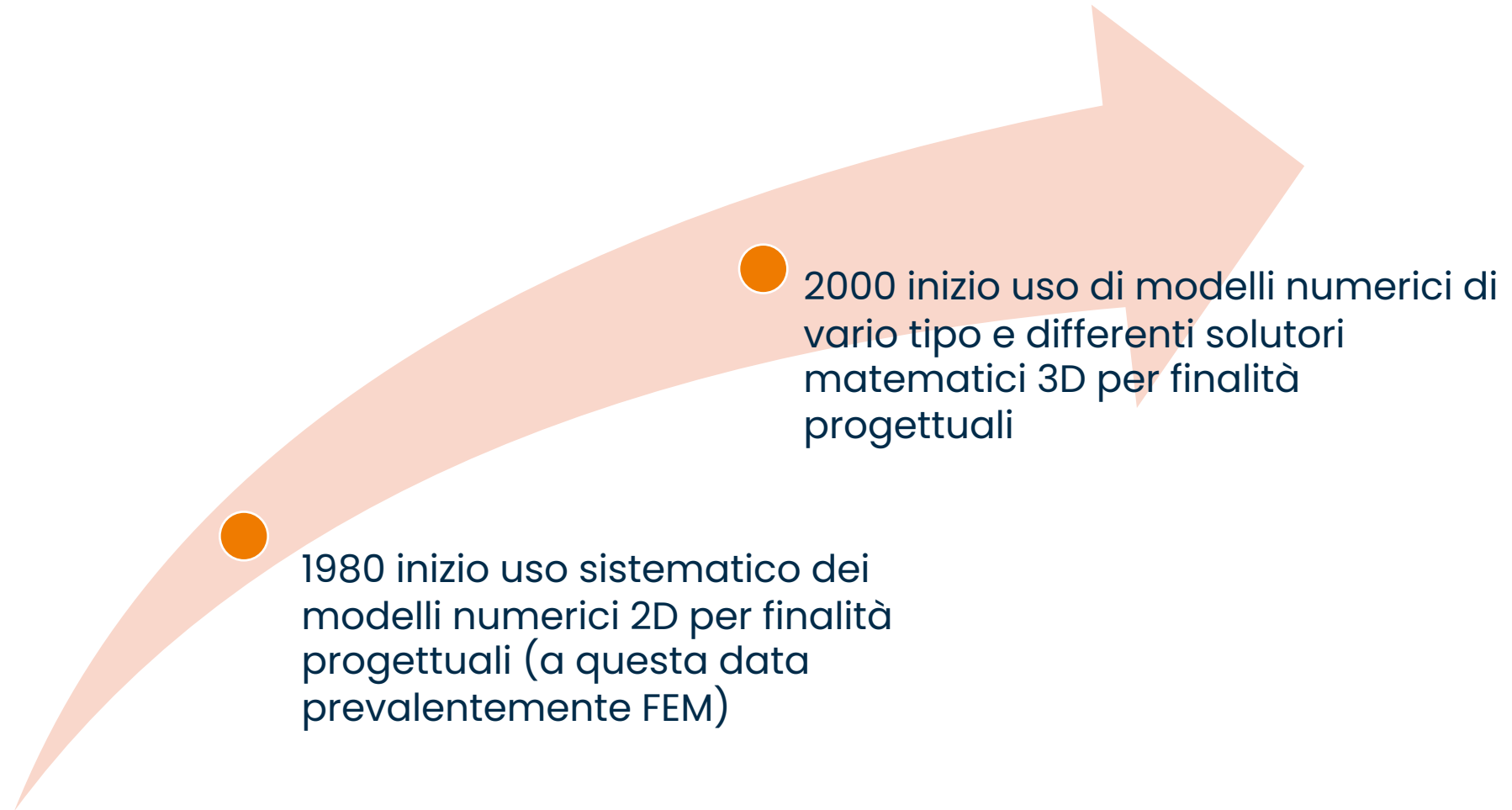


Metodo delle curve caratteristiche

(Brown et al., 1983)

Progettazione dell'opera esistente: calcolo strutturale

Progettazione con modelli numerici



Le valutazioni di sicurezza

Contesti geomeccanici semplici

rivestimento esistente scarico o con livelli di carico riconducibili all'effetto del peso proprio del rivestimento;
contesto geomeccanico lapideo;
assenza di evidenze circa problematiche realizzative elevate;
assenza di condizioni geomorfologiche significativamente sfavorevoli

Contesti geomeccanici complessi

rivestimento esistente carico;
contesto geomeccanico lapideo molto fratturato, contesti in terreni sciolti;
terreni rigonfianti
presenza di evidenze circa problematiche realizzative elevate (fornelli, distacchi, venute d'acqua);
condizioni geomorfologiche significativamente sfavorevoli (gallerie parietali, stati tensionali anomali)
presenza di frane in movimento ed interagenti con la galleria

Le valutazioni di sicurezza

Contesti geomeccanici semplici

Valutazione a ritroso del carico limite sopportabile dal rivestimento definitivo esistente

mediante

- applicazione carichi (metodo del solido di carico) e procedura verifiche secondo metodi storici

- analisi parametriche sviluppate con metodi di calcolo piu' recenti «barre e molle», metodi numerici,.....

Progettazione degli interventi sul rivestimento o del loro rifacimento seguendo le norme in vigore progettazione sismica

Progettazione dei monitoraggi e definizione di soglie di attenzione ed allarme

Verifiche di compatibilità: Contesto geomeccanico vs carico limite stimato

CONDIZIONI DELLA ROCCIA	RQD	CARICO DI ROCCIA H_r AGENTE SUL SOSTEGNO DI UNA GALLERIA DI LARGHEZZA B ED ALTEZZA H_t PER PROFONDITÀ DELLA GALLERIA SUPERIORI A $(B + H_t)$	OSSERVAZIONI
1. Roccia dura e intatta	95 - 100	Zero	Rivestimento leggero soltanto se, per effetto dello scavo con esplosivo, dopo ore o giorni dallo scavo la roccia comincia a mostrare distacchi di schegge (spalling, sfoltazione, desquamazione) o, indipendentemente dalle mine dello sparo, avvengono spontanee e violente proiezioni di crostoni dalla calotta o dalle pareti (popping, colpo di montagna, colpi di letto, colpi di parete)
2. Roccia dura stratificata o scistosa	90 - 99	$0 + 0.5 B$	Leggero rivestimento con funzione di protezione e sicurezza
3. Roccia massiva moderatamente fratturata	85 - 95	$0 + 0.25 B$	Il carico può variare da punto a punto senza una regola dominante
4. Roccia suddivisa in blocchi disgiunti con discontinuità vuote o riempite di materiale proveniente dalla alterazione esterna della roccia stessa	75 - 85	$0.25 B + 0.35 (B + H_t)$	Non vi sono spinte laterali (sulle pareti)
5. Roccia come al punto 4 ma più intensamente suddivisa e più fittamente spezzettata e fratturata	30 - 75	$(0.35 + 1.10) (B + H_t)$	Modeste spinte laterali
6. Roccia completamente frantumata, ma non alterata (dal punto di vista chimico) 6a. Sabbie e ghiaie	3 - 30 0 - 3	$1.10 (B + H_t)$	Spinte laterali considerevoli. In presenza di acqua sul fondo occorre dare una adeguata base alle centine o adottare centine circolari (chiuse)
7. Rocce spingenti (ma non rigonfanti, senza cioè variazioni percettibili del volume, contenenti elevate quantità di minerali argillosi, non rigonfanti, tipo caolinite, illite, ecc.) a media profondità	NA	$(1.10 + 2.10) (B + H_t)$	Forti spinte laterali; occorrono centine anche in arco rovescio: sono raccomandabili centine circolari
8. Rocce spingenti (come al punto 7) a grande profondità	NA	$(2.10 + 4.50) (B + H_t)$	Forti spinte laterali; occorrono centine anche in arco rovescio: sono raccomandabili centine circolari
9. Terreni spingenti e rigonfanti, contenenti, cioè, minerali argillosi molto rigonfanti come montmorillonite e simili	NA	75 m indipendentemente dal valore di $(B + H_t)$	Centine circolari. In casi estremi occorrono centine e armature deformabili ("codevoli")

Le valutazioni di sicurezza

Contesti geomeccanici complessi

Non si può prescindere da una accurata caratterizzazione meccanica dei terreni

facile eseguire sondaggi dall'interno della galleria se questa non è impermeabilizzata
come fare se è presente l'impermeabilizzazione ?
come fare per gallerie profonde ?

Non si può prescindere dalla modellazione della «storia della galleria» con la back analysis della costruzione

necessaria la simulazione corretta
della sequenza di scavo
distanza tra il fronte ed i getti
resistenza dei sostegni

quali dei livelli di detensionamento applicare nei modelli bidimensionali

- le condizioni di stabilità dei rivestimenti di prima fase (se presenti e conosciuti) sono un utile strumento di verifica
- i valori tensionali misurati sui rivestimenti devono essere verificati numericamente

Lettura dell'opera

PRIMO CONVEGNO INTERNAZIONALE SUI PROBLEMI TECNICI NELLA COSTRUZIONE DI GALLERIE

Torino, 26-27-28 settembre 1969

SESSIONE II COMUNICAZIONE 12

PROBLEMI GEOLOGICI RELATIVI ALLE GALLERIE DELL'AUTOSTRADA GENOVA - SESTRI LEVANTE

Giulio Gentili ()*

È vero, la galleria è un qualche cosa che potrebbe definirsi vivo e palpitante, per le mille manifestazioni che offre e per le più disparate situazioni che presenta. Durante l'esecuzione si è constatato che una stessa formazione presentava condizioni geologico-applicative fra loro disparate, tanto da influire sullo scavo in maniera diversa. Ne è risultata una suddivisione qui di seguito elencata, di carattere geologico-tecnico, in relazione alla eseguibilità:

- 1) Argilloscisti
 - a) argilloscisti fortemente tettonizzati ed alterati del Torbello
 - b) argilloscisti passanti a marnoscisti, di monte Sperone
 - c) argilloscisti della zona Chiavari e Lavagna
- 2) Calcarei marnosi
 - a) fratturati ed alterati della zona di Rapallo
 - b) fortemente tettonizzati e alternati a marnoscisti ed argilloscisti delle zone Apparizione e Veilino
 - c) debolmente alterati e tettonizzati con limitate intercalazioni argillose delle zone Camaldoli - Quezzi - Bogliasco - Sori
 - d) scarsamente alterati, e quasi privi di tettonizzazione e di infiltrazioni idriche, delle zone di S. Martino e Zoagli
- 3) Arenarie grossolane ad interstratificazioni argilloscistose ed ardesiache con infiltrazioni idriche e fratturazioni, della zona S. Anna di Sestri L.
- 4) Ardesie alternate a veli argillosi, e a letti argilloscistosi con fitta fratturazione e debole tettonizzazione e diffusi stillicidi, della zona di S. Giulia - Lavagna.

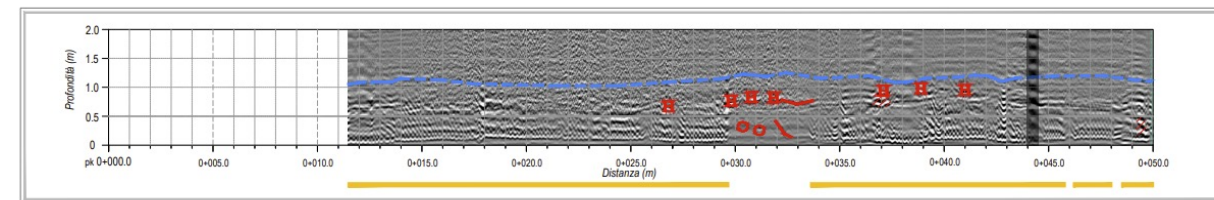
Lettura dell'opera

1) Roccia argilloscistosa, fortemente alterata, a debole contenuto arenaceo, interessata da faglie longitudinali, da localizzate infiltrazioni idriche plastificanti; giacitura a franapoggio rispetto al paramento di monte della galleria a piedritto centrale, in condizioni di accentuata parietalità e con scarsa copertura. Sistema esecutivo a scavo di calotta ed armatura in legname con centine a doppio T affogate nel calcestruzzo. Esempio: galleria Madonna della Neve con attacco in entrambe le sedi: produzione media totale 1,50 m/giorno.

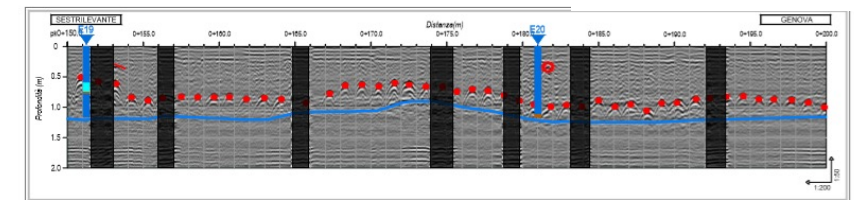
2) Roccia argilloscistosa squamosa e fissile in banchi di spessori limitati, 20÷30 cm; con interstrati calcareo arenacei e arnioni albitici, tutto in giacitura, quando esiste, subverticale, a tratti fortemente plastificata, allentata grafitosa interessata da numerose e sparse infiltrazioni idriche. Raramente priva di disgiunzioni e di alterazioni, con scarsi passaggi di litotipi a normale tenacità e comunque con superfici di contatto sempre lubrificate e tendenti a ridurre in ogni modo l'attrito. In questa formazione sono state scavate le gallerie degli svincoli di Rivarolo, quegli svincoli che connettono la Genova - Sestri Levante alla Genova - Milano. Il sistema qui adottato è quello del betoncino proiettato armato (Spritz-beton) con attacco in una singola sede ma da due lati. Produzione media totale di galleria finita 3,50 m/giorno.

3) Argilloscisti passanti a marnoscisti, fortemente imbibiti e tettonizzati comprendenti argilloscisti, vinacei e verdastri, nella zona di contatto con i calcari marnosi. Stratificazioni di limitata potenza da 2-3 cm a 30-40 cm, di norma subverticali. Il complesso è facilmente sgretolabile e addirittura fortemente plastico specialmente nella zona di contatto coi calcari marnosi, dove si sono riscontrate venute d'acqua dell'ordine di 21 litri al secondo. Sistema esecutivo a scavo di calotta ed armatura in legname con centine metalliche a doppio T affogate nel calcestruzzo, di spessore adeguato a materiali fortemente spingenti.

Esempio: galleria Sperone - lato Genova. Produzione media totale di galleria finita 3,00 m/giorno.



(Cortesia SINA)



(Cortesia Tecne)

Lettura dell'opera

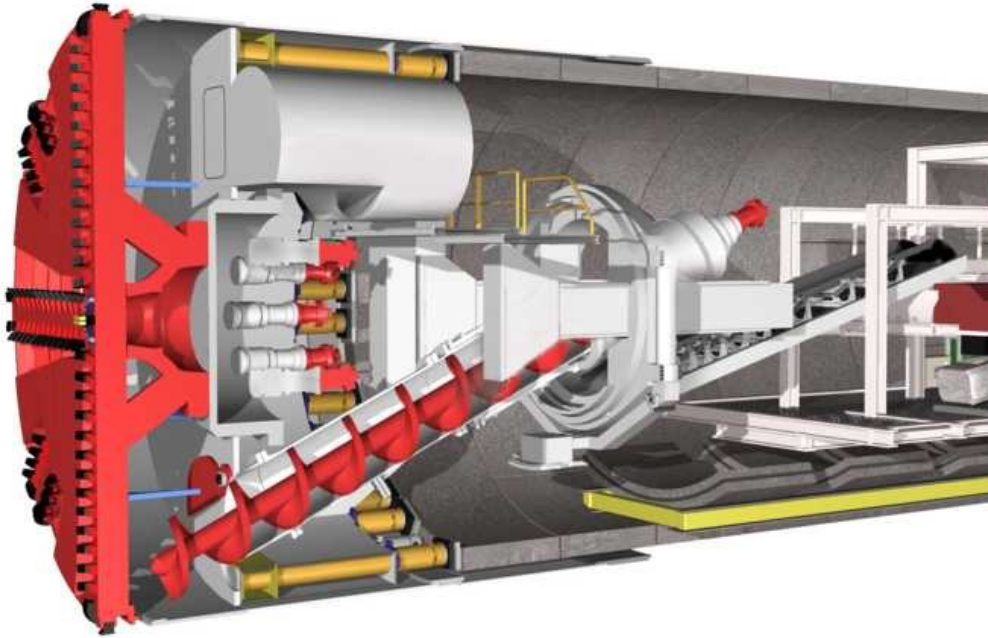
GALLERIA S. AGOSTINO I

Per l'esecuzione di questa galleria è stato adottato il metodo a scavo di calotta (circa 45 m²) e rivestimento in calcestruzzo con annegate centine metalliche a doppio T, quindi strozzo e piedritti e, dove necessario, arco rovescio.

Il traforo attraversa in condizioni di superficialità e parietalità e per un buon tratto a piedritto centrale la roccia appartenente alla formazione calcareo marnosa già descritta al n. 4. La giacitura predominante degli strati è a franapoggio, con angolo di inclinazione di 20÷25°. La eterogeneità e la inomogeneità del complesso roccioso ha determinato sulla canna sinistra, della sede a monte, una lesione longitudinale all'altezza delle reni per quasi tutta la lunghezza della sede, cioè circa 240 metri. La causa del lesionamento è stata attribuita all'influenza dei componenti plastici nel complesso roccioso. Questi, di scarsa consistenza, hanno favorito il cedimento del piano di appoggio dell'imposta di calotta.

Si è posto rimedio a siffatto inconveniente con l'esecuzione di murette armate al piede, da cui sono state fatte partire delle staffe che sono andate ad annegarsi nella calotta sin quasi in chiave. Inoltre, si è proceduto a scavi di avanzamento cautelativi, con riduzioni di tiraggio di volate e con il rivestimento sino al fronte di scavo. Lo strozzo è stato ridotto ed i piedritti sono stati immediatamente eseguiti, in quelle tratte ove le lesioni erano più intense. Inoltre, poichè i piedritti in buona parte della galleria sono ravvicinati, si è provveduto a collegarli direttamente, ottenendo così una struttura maggiorata e rinforzata. Il ricorso con prontezza ai sovra accennati accorgimenti ha dato assoluta stabilità a tutta la galleria, stanti le negative caratteristiche geologiche, geotecniche e morfologiche di cui si è detto.

Lettura dell'opera: dal passato al presente



Come si deve operare per la gestione del processo di stesura delle classi di attenzione e valutazione della sicurezza nel caso di gallerie scavate con TBM e rivestite con conchi prefabbricati

I processi costruttivi sono differenti dallo scavo convenzionale. Devono essere correttamente «letti».
Il livello di conoscenza sui materiali è completo (elementi prefabbricati)
Il livello di conoscenza costruttivo richiede analisi specifiche



**Politecnico
di Torino**