

CONSOLIDAMENTO di TERRENI e ROCCE



***Interventi di consolidamento in scavi sotterranei
Aspetti teorici e sperimentali per la progettazione di
gallerie profonde***

M.Rita Migliazza



Politecnico
di Torino



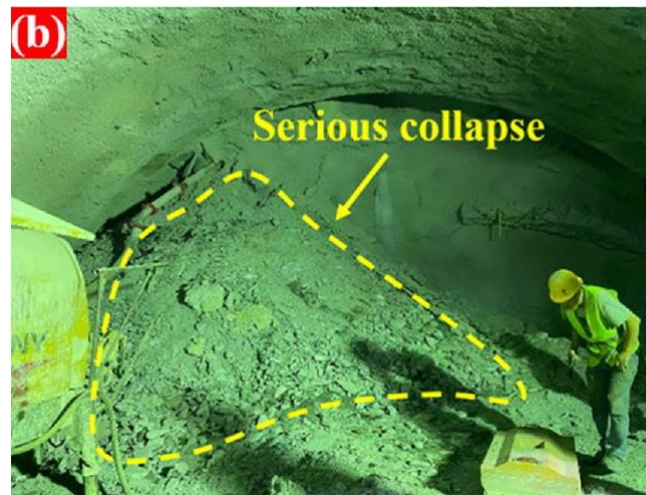
- Problemi di instabilità di scavi sotterranei
- Sistemi di rinforzo – sostegno – stabilizzazione
- Fattori influenzanti lo stato tensio-deformativo al contorno degli scavi
- FASI PRINCIPALI per la progettazione di opere in sotterraneo
- Approcci Empirici
- Metodi Analitici
- Approcci Numerici
- Misure in site

PROBLEMI di STABILITA'

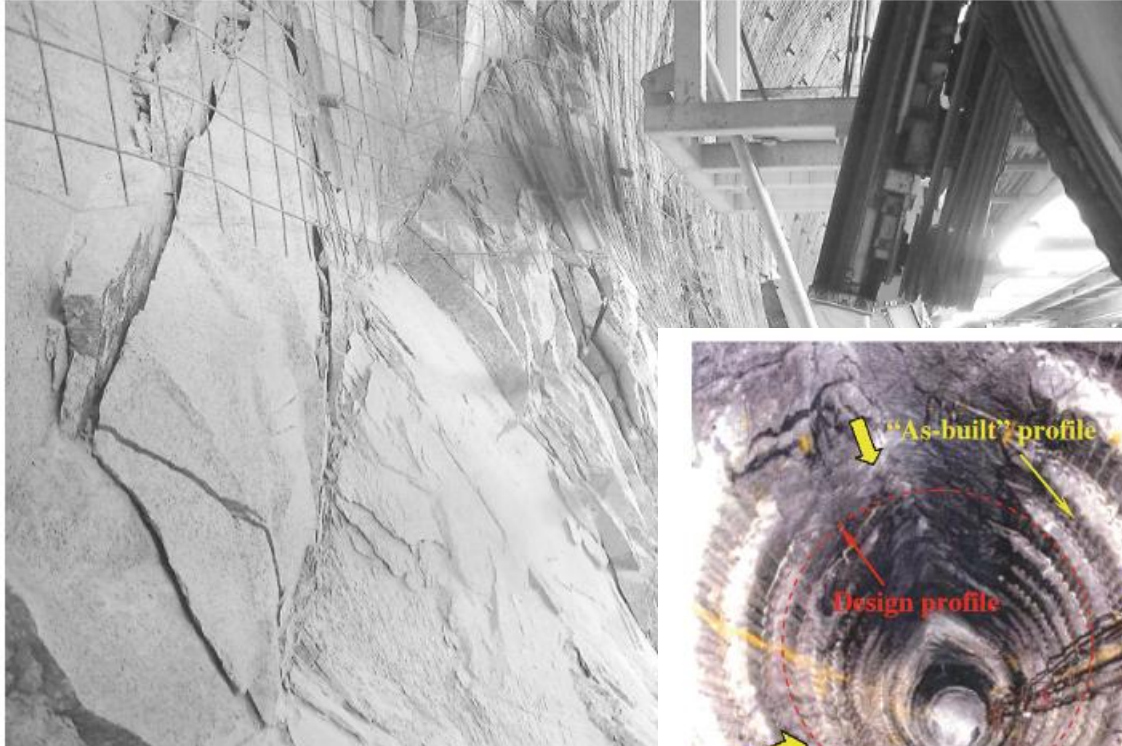


Rotture Fragili
Rockburst
Spalling
Slabbing

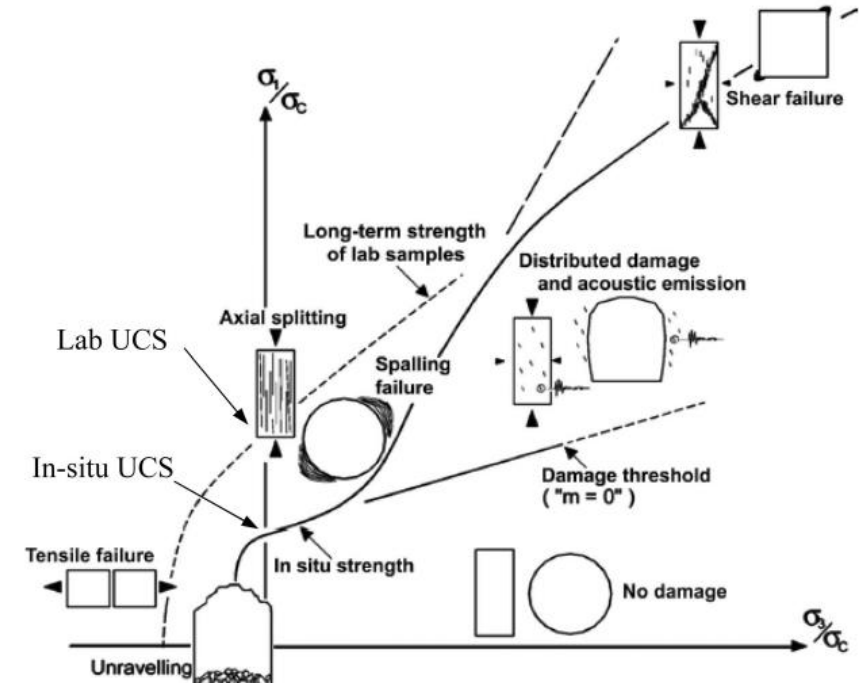
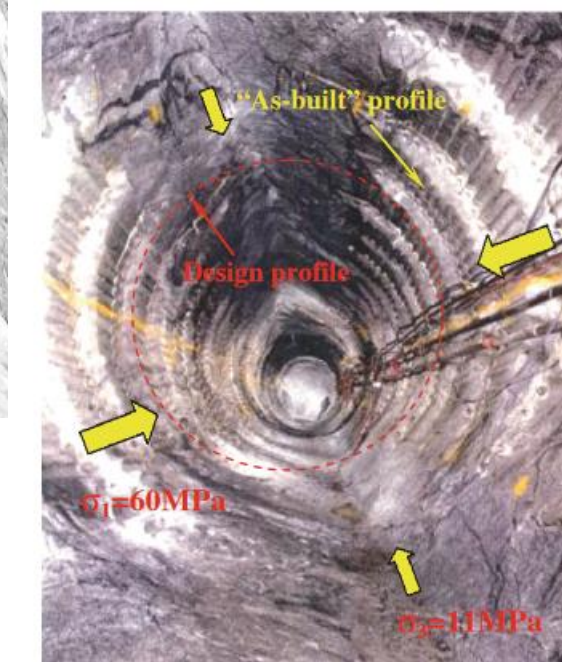
Novembre 2023. crollo di un tunnel stradale in costruzione nel Nord dell'India



Photos of rockburst in assistant tunnels a surface spalling, b deep rockburst pit, c schistose rupture in pit, d parabolic shape of desquamation rock



Onion-skinning at the tunnel wall, TBM drive Steg
 In the Loetschberg base tunnel the natural principal stress is vertical so that onion-skinning (spalling) appeared symmetrically in the side wall according to theory.



In-situ Rock Spalling Strength near Excavation Boundaries

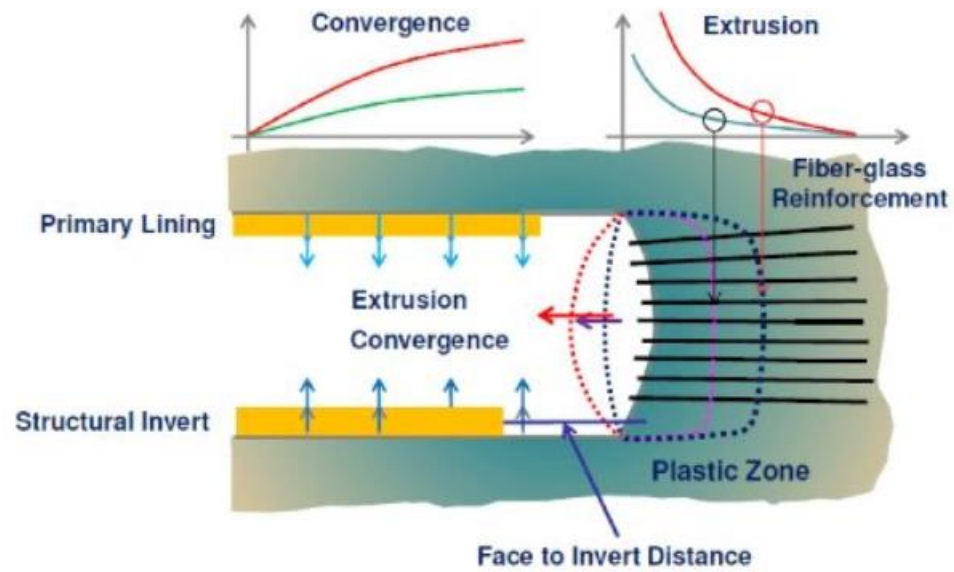
In-situ Rock Spalling Strength near Excavation Boundaries
 M. Cai • P. K. Kaiser Rock Mech Rock Eng (2014) 47:659–675



very large anisotropic convergence in Saint-Martin-la-Porte access gallery (after Mathieu 2008)

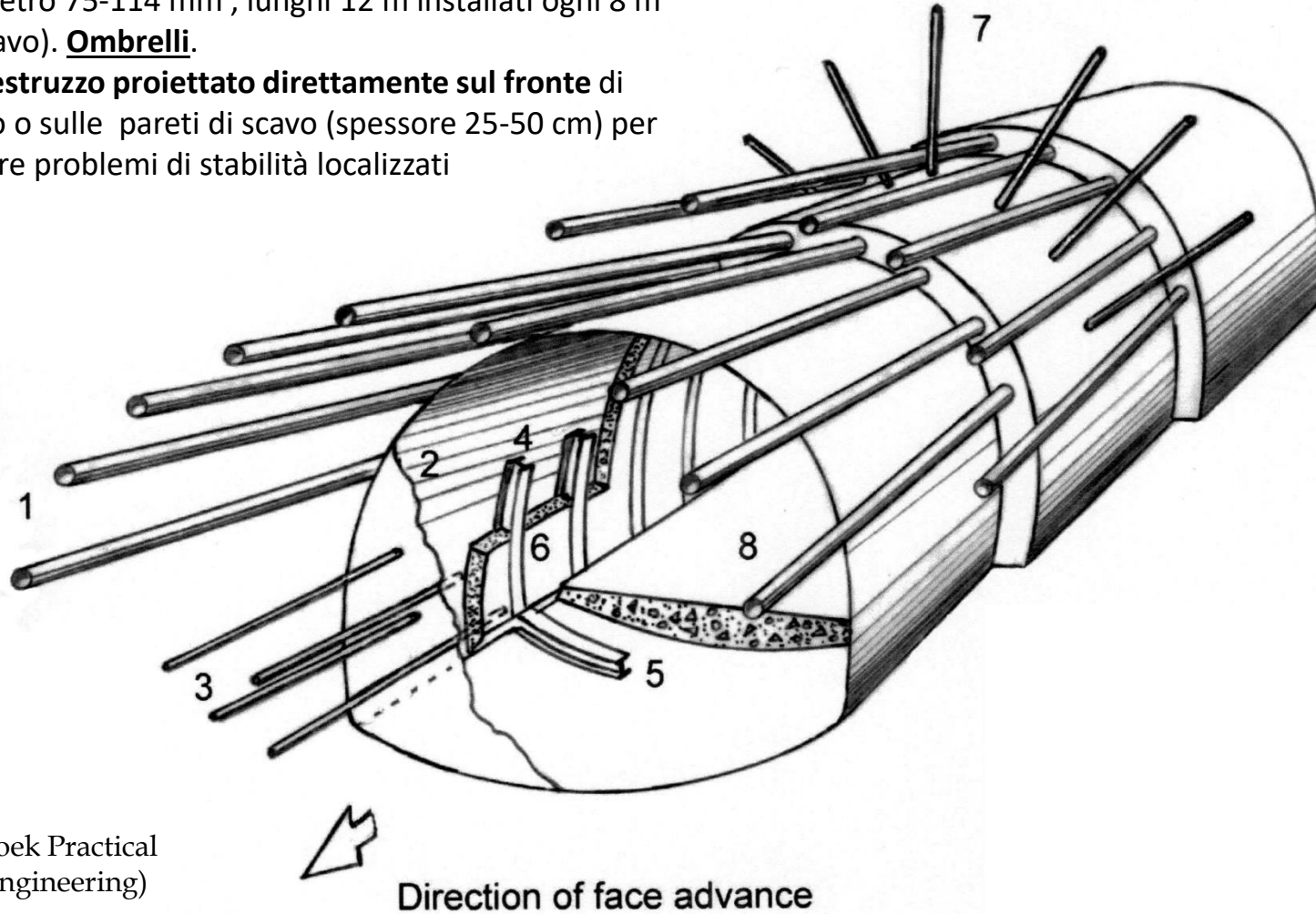


Estrusione del fronte di scavo



SISTEMI di RINFORZO

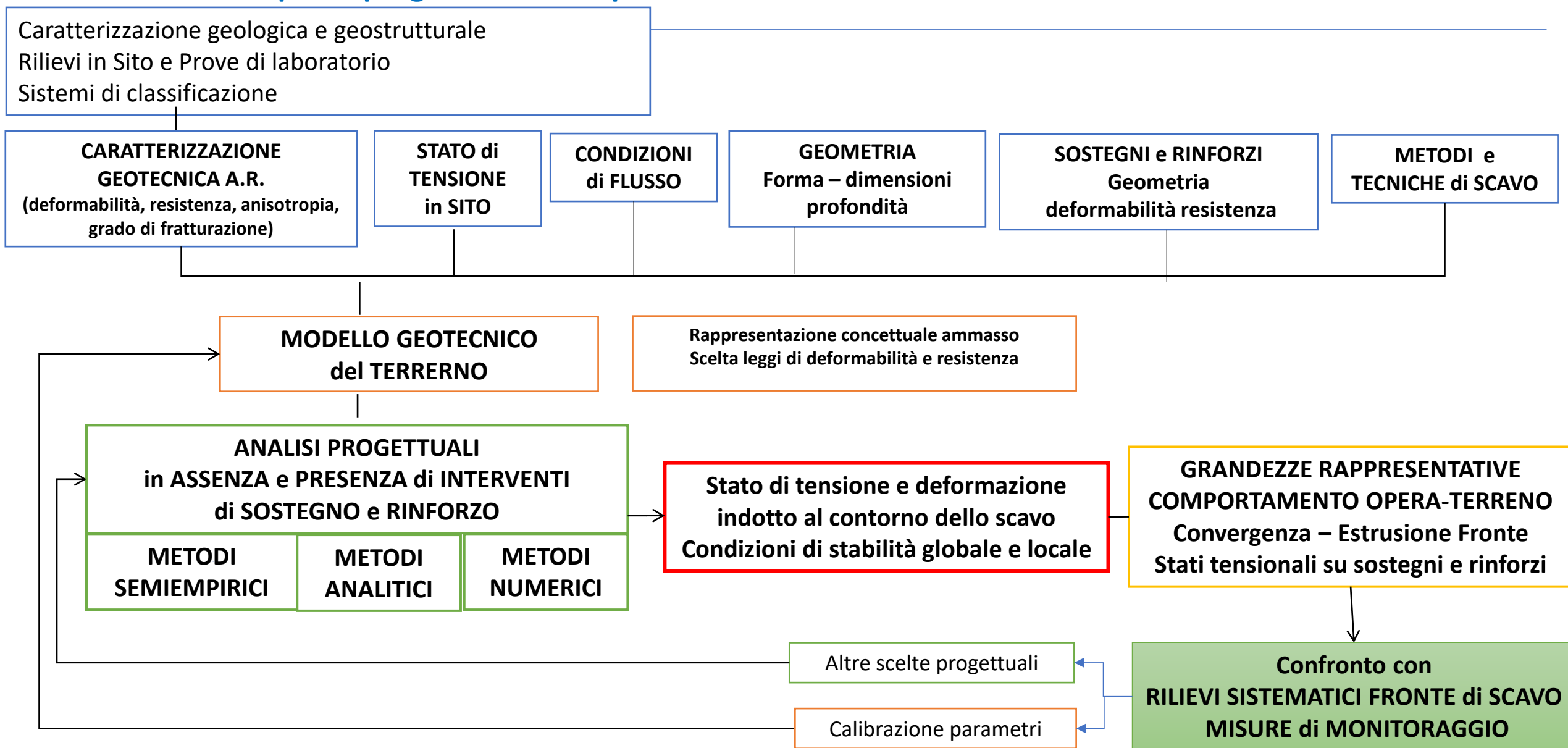
1. Realizzazione di infilaggi in avanzamento (tubi diametro 75-114 mm , lunghi 12 m installati ogni 8 m di scavo). **Ombrelli**.
2. **Calcestruzzo proiettato direttamente sul fronte di scavo** o sulle pareti di scavo (spessore 25-50 cm) per evitare problemi di stabilità localizzati



(da Hoek Practical rock engineering)

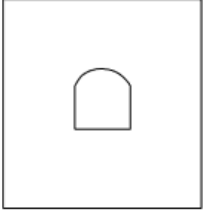
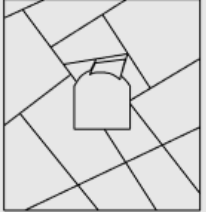
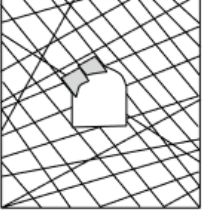
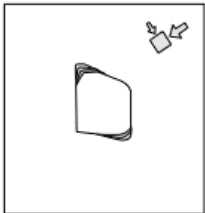
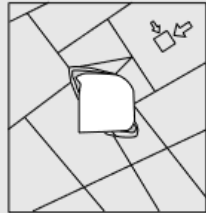
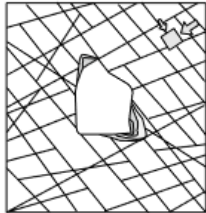
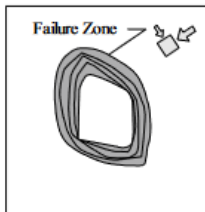

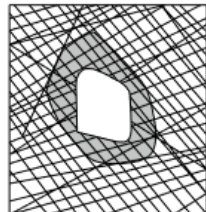
3. **Bulloni di vetroresina (VTR)** posizionati in corrispondenza del fronte di scavo (lunghezza 6-12 m, griglia 1x1 m)
4. **Centine metalliche** installate in prossimità del fronte
5. Profilo in acciaio installato per controllare gli spostamenti dell'ammasso e del piede delle centine. **Chiusura centina**
6. **Calcestruzzo proiettato, anche fibro - rinforzato** (fibre acciaio , metallo o vetroresina) che ingloba le centine. O **rivestimento definitivo in calcestruzzo armato**
7. **Bulloni o chiodi in acciaio**
8. **Realizzazione dell'arco rovescio**

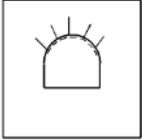
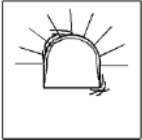


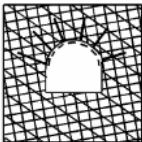
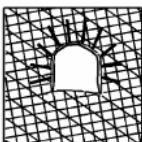
FASI PRINCIPALI per la progettazione di opere in sotterraneo



Ammasso Roccioso – Stato tensionale – Modi di Rottura

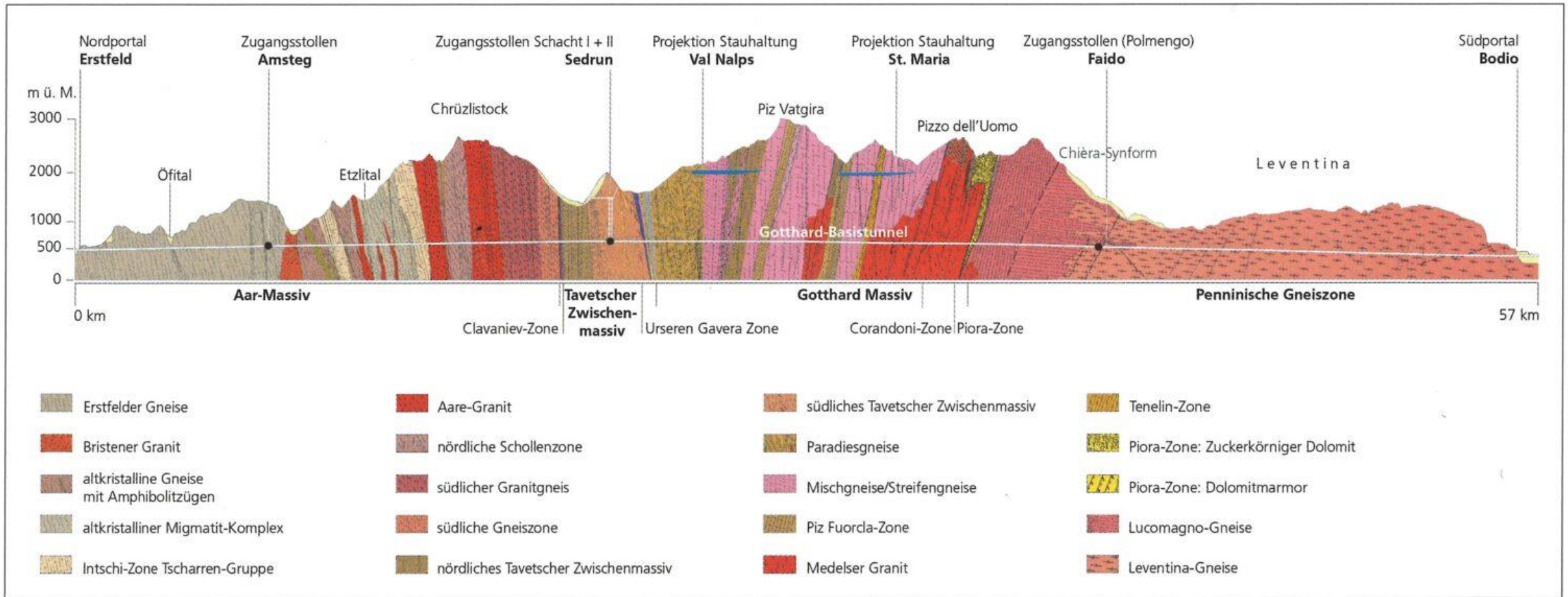
Martin C, Kaiser P, McCreath D (1999) Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels. Can Geotech J 36:136–151

	Massive (RMR>75)	Moderately Fractured (50<RMR<75)	Highly Fractured (RMR<50)
Low In-Situ Stress ($\sigma_1/UCS < 0.15$)	 <p>Linear elastic response.</p>	 <p>Falling or sliding of blocks and wedges.</p>	 <p>Unravelling of blocks from the excavation surface.</p>
Intermediate In-Situ Stress ($0.15 < \sigma_1/UCS < 0.4$)	 <p>Brittle failure adjacent to excavation boundary.</p>	 <p>Localized brittle failure of intact rock and movement of blocks.</p>	 <p>Localized brittle failure of intact rock and unravelling along discontinuities.</p>
High In-Situ Stress ($\sigma_1/UCS > 0.4$)	 <p>Brittle failure around the excavation.</p>	 <p>Brittle failure of intact rock around the excavation and movement of blocks.</p>	 <p>Squeezing and swelling rocks. Elastic/plastic continuum.</p>

	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 unravelling 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>

Hoek, E., Kaiser, P.K., and Bawden, W.F. 1995. Support of underground excavations in hard rock. A.A. Balkema, Rotterdam

Complessità Geologico-strutturale delle formazioni incontrate dagli scavi



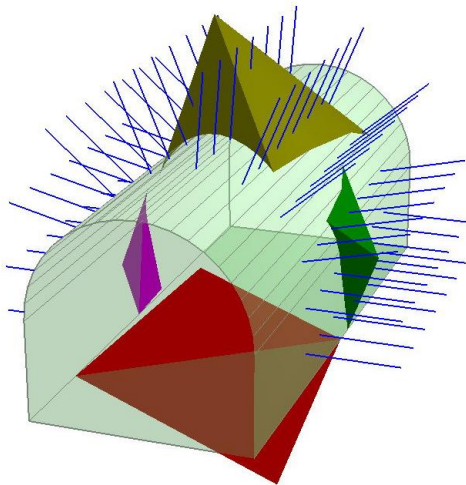
2 Geologisches Längensprofil Gotthard-Basistunnel (Befund 2011)

2 Geological longitudinal section of the Gotthard base tunnel (on-site findings 2011)

Nel caso di gallerie, generalmente, gli ammassi rocciosi vengono considerati **mezzi continui equivalenti** per le analisi di stabilità globale e **mezzi discontinui** per considerare problemi di rottura localizzata.

mezzi discontinui

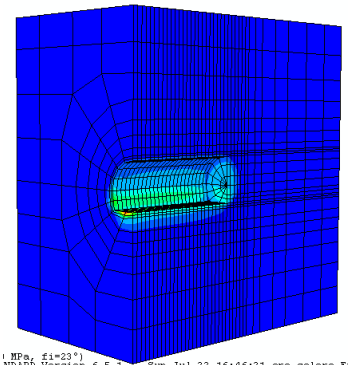
1. Orientazione Discontinuità
2. Resistenza taglio discontinuità
3. Proprietà Roccia Intatta



mezzi Continui equivalenti

I metodi di classificazione permettono di suddividere l'ammasso roccioso in ***classi*** di diversa qualità dal punto di vista delle loro proprietà meccaniche globali. Questi metodi esaminano alcune fondamentali caratteristiche della roccia intatta e delle discontinuità dando, a seconda delle diverse situazioni, dei valori quantitativi, per ognuna di esse.

- | | | |
|----|-----|--|
| a) | RMR | ROCK MASS RATING, Bieniawski, (1973, 1984) |
| b) | Q | QUALITY SYSTEM, Barton et al. 1974 |
| c) | RMi | ROCK MASS INDEX, Palmostrøm, 1996 |
| d) | GSI | GEOLOGICAL STRENGTH INDEX, Hoek, 1994c |



- STIMA dei parametri di deformabilità e resistenza di un ammasso con formulazioni empiriche
- Valutazione Preliminare Sistemi di Sostegno e Rinforzo

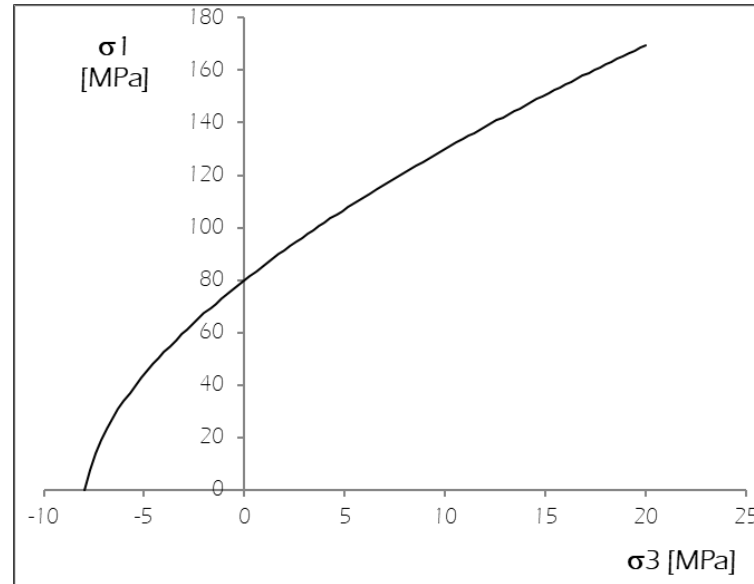
Caratterizzazione Geotecnica Ammassi Rocciosi – Criterio Resistenza Hoek e Brown (2002)

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sigma_{ci} \left(m_b \frac{\sigma_3'}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$$

$$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9 - 3D}\right)$$

$$a = 0.5 + \frac{1}{6} \left(e^{-GSI/15} - e^{-20/3} \right)$$



Può essere linearizzato al fine di stimare i parametri equivalenti di Mohr Coulomb (nota: linearizzazione nell'intervallo corretto di stato tensionale caratterizzante il problema ingegneristico)

I parametri m_b , s , a sono funzione di:

- **indice GSI** che generalmente non assume un valore unico ma intervallo (es 45 – 55)
- **Indice di disturbo D** funzione del grado di danneggiamento indotto nell'ammasso durante le fasi di scavo



No misure dirette
Elevato grado di incertezza

Geological Strength Index GSI

Pick GSI Value		SURFACE CONDITIONS				
Rock Type:	General	VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
GSI Selection: 45		DECREASING SURFACE QUALITY →				
STRUCTURE		DECREASING INTERLOCKING OF ROCK PIECES ↓				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90	80	70	N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets	80	70	60	50	29
	VERY BLOCKY - interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets	70	60	50	40	30
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity	60	50	40	30	20
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces	50	40	30	20	10
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A	10		

Caratterizzazione Geotecnica Ammassi Rocciosi – Stima Parametri Deformabilità

RMR	$E_M = 2RMR - 100$	Bieniawski (1978)
	$E_M = 10^{\frac{RMR-10}{40}}$	Serafim & Pereira (1983)
	$E_M = E_i \cdot \left[0.0028 \cdot RMR^2 + 0.9 \cdot \exp\left(\frac{RMR}{22.82}\right) \right] / 100$	Nicholson & Bieniawski (1990)
	$E_M = E_i \left[0.5 \left(1 - \left(\cos\left(\frac{\pi \cdot RMR}{100}\right) \right) \right) \right]$	Mitri et al (1994)
	$E_M = 0.4H^{\alpha} 10^{\frac{RMR-20}{38}}$	Verman (1997)

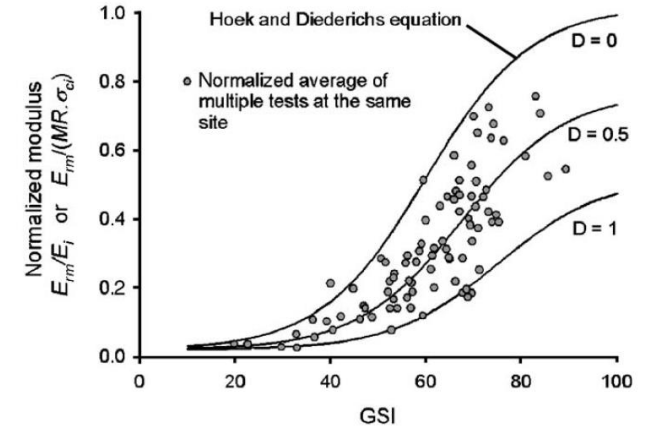
RQD	$E_M = E_i \cdot 0.0267(RQD - 62.5)$	Bieniawski (1978)
	$E_M = (0.0231 \cdot RQD - 1.32) \cdot E_i$	Gardner (1987)
	$E_M = 0.1423 \left[\frac{E_i \cdot (1 + 0.01 \cdot RQD)}{WD} \right]^{1.1747}$	Kayabasi et al. (2003)
	$E_M = 0.001 \left[\frac{(E_i / \sigma_c)(1 + 0.01 \cdot RQD)}{WD} \right]^{1.5528}$	Gokceoglu et al. (2003)
	$E_M = E_i \cdot 10^{0.0186 \cdot RQD - 1.91}$	Zhang & Einstein (2004)

GSI	$E_M = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} 10^{\frac{GSI-10}{40}}$	$\sigma_c < 100MPa$	Hoek & Brown (2002)
	$E_M = \left(1 - \frac{D}{2}\right) 10^{\frac{GSI-10}{40}}$	$\sigma_c > 100MPa$	

Q	$E_M = 25 \cdot \log Q$	Barton (1980)
	$E_M = 10 \cdot \sqrt[3]{Q_c} = 10 \cdot \sqrt[3]{Q \frac{\sigma_c}{100}}$	Barton (1995)

RMi	$E_M = 5.6 \cdot RMi^{0.375}$	$RMi > 0.1$	Palmstrom (1995)
	$E_M = 7 \cdot RMi^{0.4}$	$1 < RMi < 30$	Palmstrom & Singh (2001)

Edyn - s kn	$E_M = \frac{E_i}{1 + E_i / (s \cdot k_n)}$	Amadei & Goodman (1981)
	$E_M = E_i \cdot \frac{E_{M-dyn}}{E_{i-dyn}}$	Clerici (1993)



$$E_{rm} = E_i \left(0.02 + \frac{1 - D/2}{1 + e^{((60+15D-GSI)/11)}} \right)$$

Hoek e Diederichs (2006)

STATO di TENSIONE INIZIALE

Prima della realizzazione di un scavo, il terreno o l'A.R. è caratterizzato da uno stato di equilibrio al quel corrisponde uno stato di tensione naturale o iniziale che deve essere stimato per valutare lo stato tensio-deformativo indotto dagli scavi.

Lo stato di tensione iniziale dipende da:

- Storia geologica dell'ammasso
- Condizioni geostrutturali (presenza di FAGLIE e loro caratteristiche cinematiche)
- Fenomeni tettonici
- Vicinanza ai pendii

Esso può essere MISURATO (difficile) o VALUTATO in maniera approssimata

Nel caso di gallerie profonde è usuale considerare una condizione di stato tensionale pre-esistente caratterizzato da componenti di tensione principali:

- Verticale pari alla tensione litostatica

$$\sigma_V = \gamma_r \cdot z$$

$$K_o = 1$$

STATO ISOTROPO

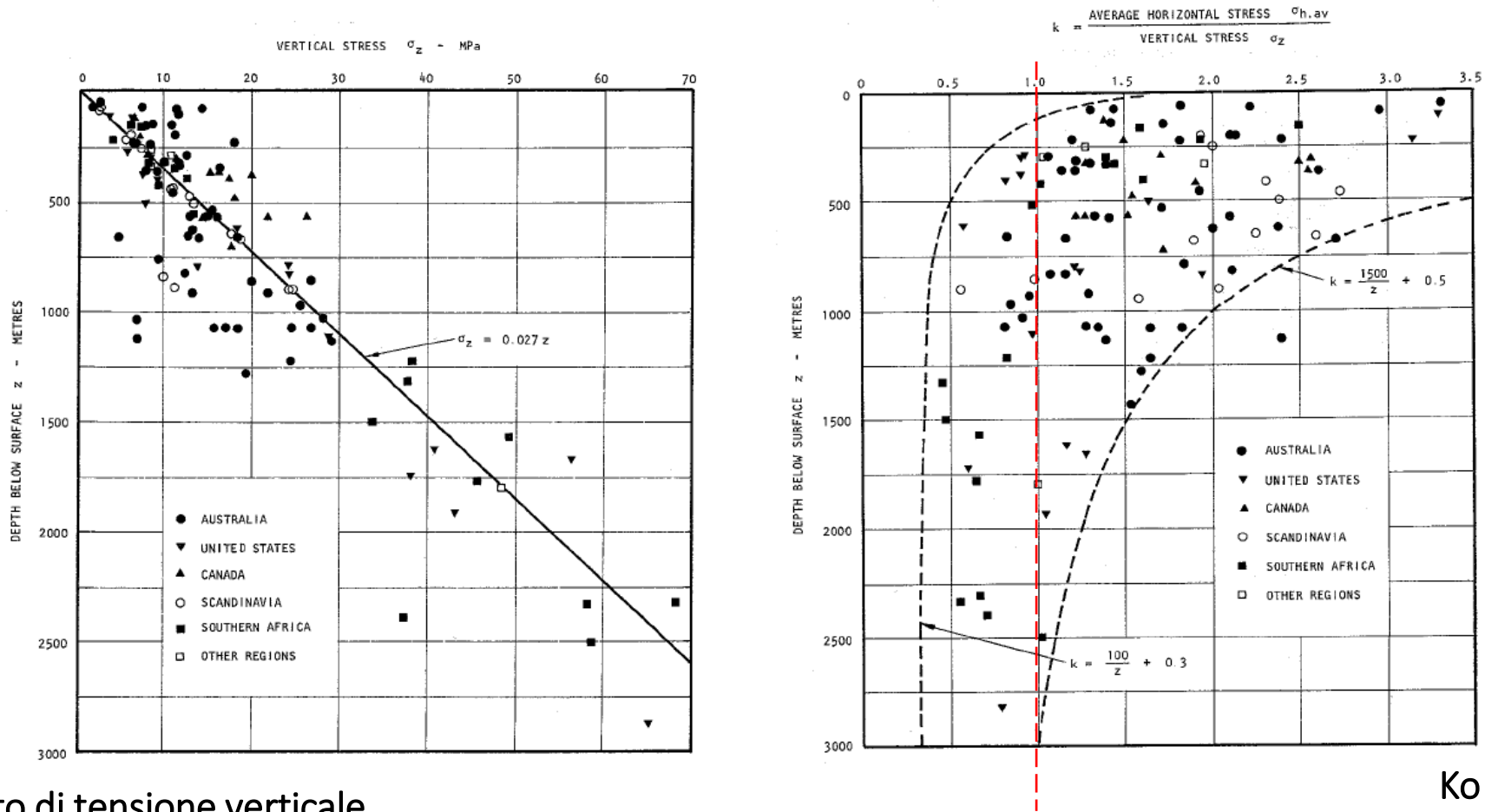
- Orizzontale

$$\sigma_H = K_o \cdot \sigma_V$$

$$K_o \neq 1$$

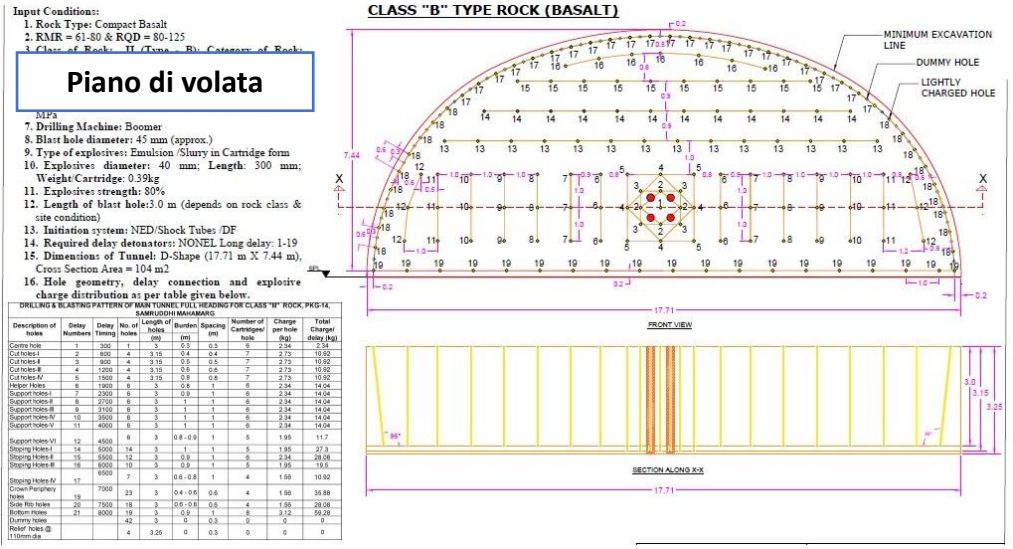
STATO ANISOTROPO

In realtà non sempre gli tensionali sono geostatici e, soprattutto, isotropi



Stato di tensione verticale

Le tecniche tradizionali maggiormente impiegate vedono l'uso di esplosivi (blasting) opportunamente dimensionati tramite i piani di volata e/o di mezzi dotati di frese puntali



JUMBO per PERFORMANCE



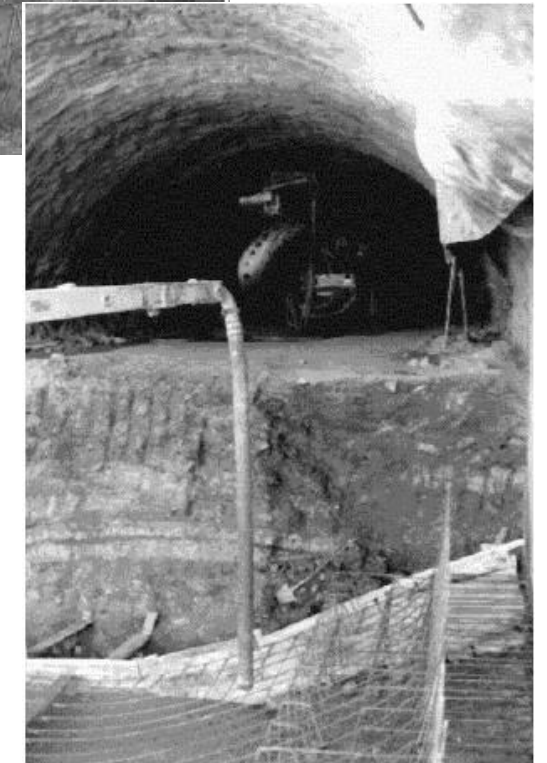
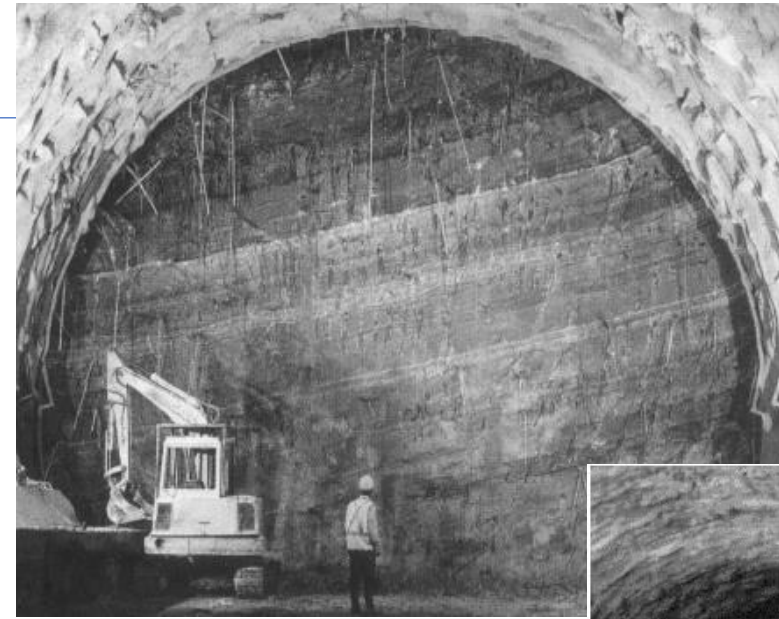
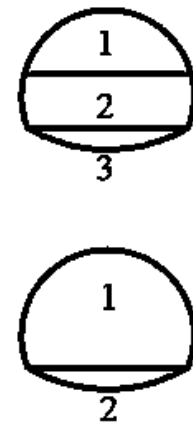
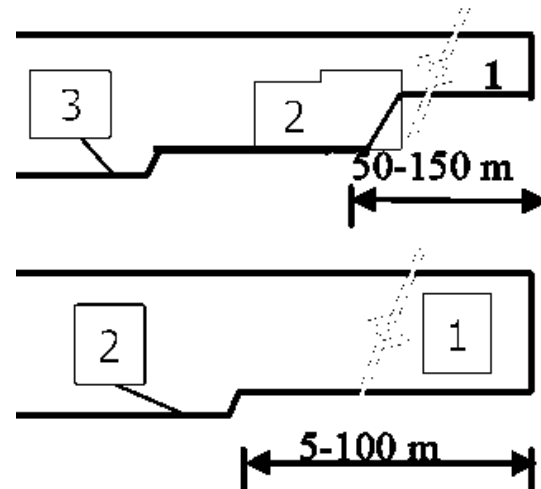
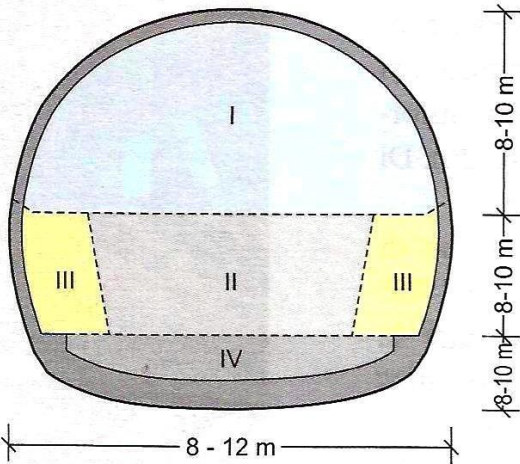
FRESA ad ATTACCO PUNTUALE



TECNICHE e FASI di SCAVO

A seconda delle caratteristiche dell'ammasso roccioso e delle dimensioni della galleria lo scavo può essere programmato a:

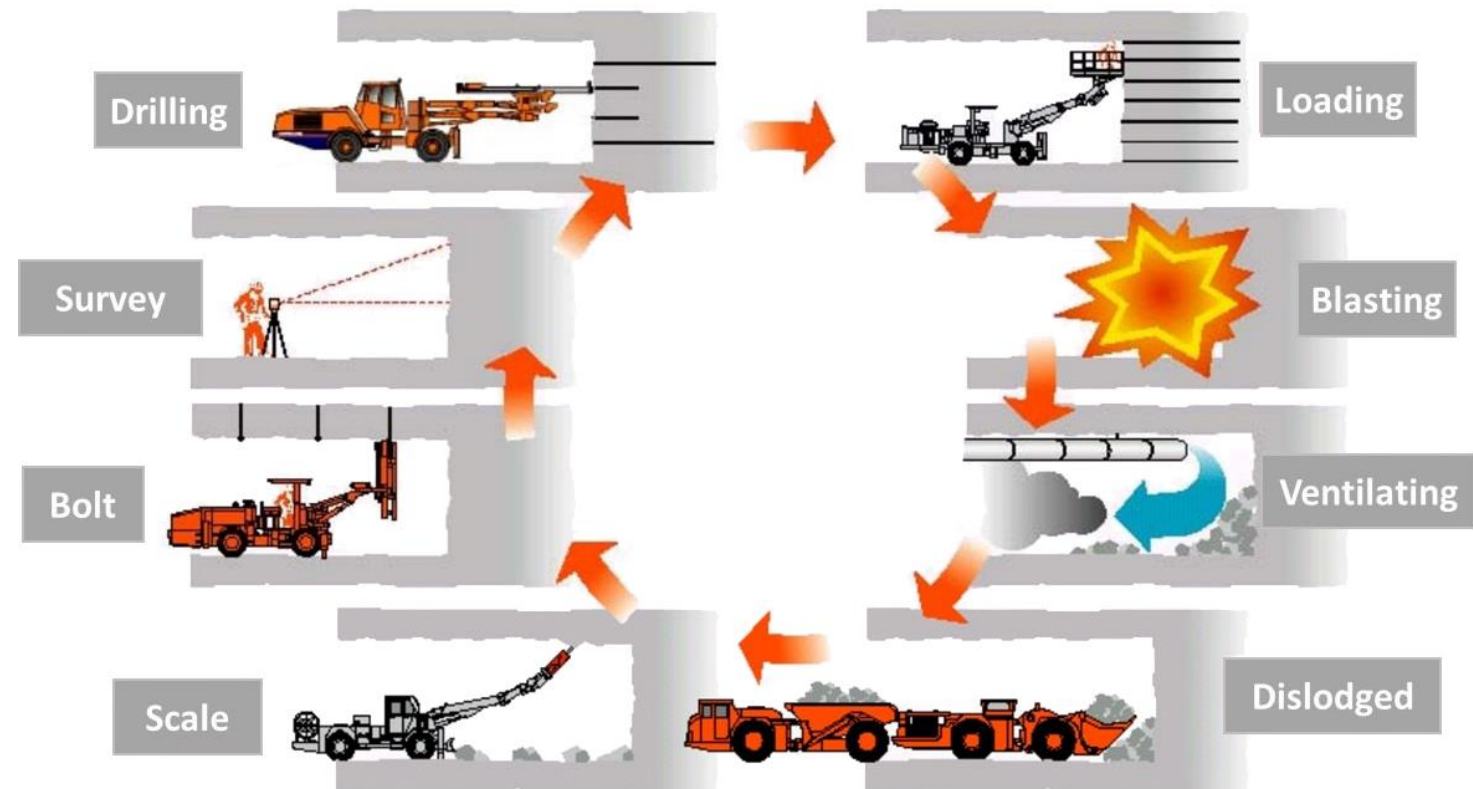
- Piena Sezione
- Sezione parzializzata
 - I. Scavo calotta
 - II. Ribasso parte centrale
 - III. Scavo setti laterali
 - IV. Scavo arco rovescio

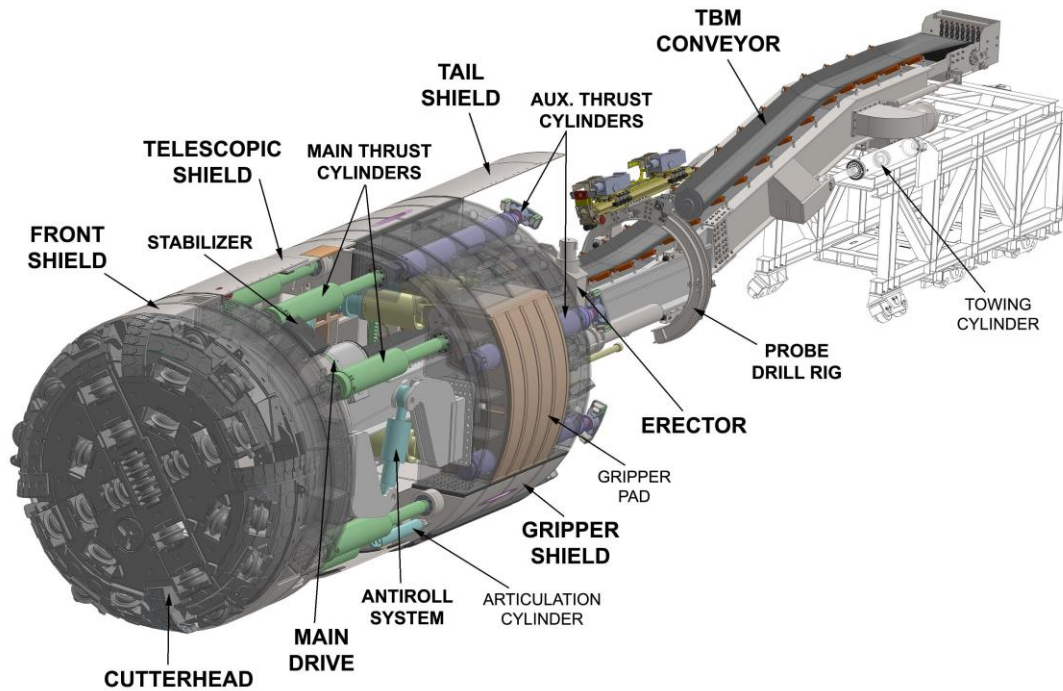


TECNICHE e FASI di SCAVO

Il processo di scavo è caratterizzato da una serie di fasi operative che si ripetono ciclicamente. Una di queste fasi riguarda la posa o l'installazione dei sistemi di sostegno - rinforzo - consolidamento per la messa in sicurezza della porzione di scavo appena realizzata e della parte (nucleo di avanzamento) che deve ancora essere scavata.

Con tecniche di scavo tradizionali le fasi di scavo e i sistemi di consolidamento possono essere modificati in opera in relazione alle condizioni di ammasso che si incontra





TBM Doppio Scudo (DS) (TunnelPro)

Scavi meccanizzati con TBM (Tunnel Boring Machine) con caratteristiche generali differenti (scudata, doppio scudata, aperta) a seconda delle proprietà delle formazioni litologiche che si incontreranno durante gli scavi.

Scavo a sezione piena (Circolare)

La macchina NON può essere cambiata in corso d'opera
Possono prevedere l'installazione automatizzata di sistemi di consolidamento



TBM aperta a singolo ancoraggio (Herrenknecht, 2019)

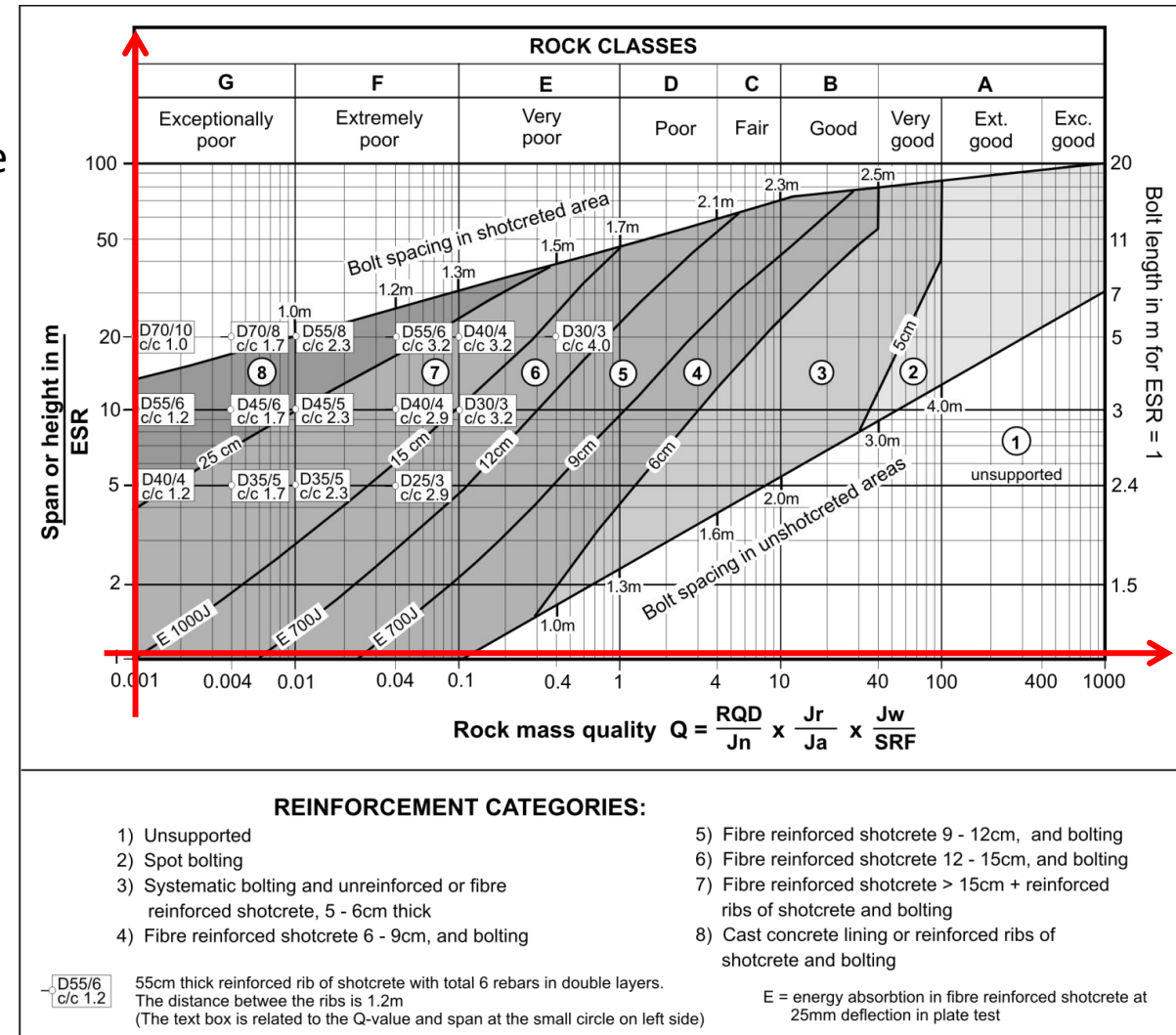
VALUTAZIONE PRELIMINARE con SISTEMI di CLASSIFICAZIONE

I Sistemi di classificazione (RMR, Qsystem, Rmi, ...) forniscono strumenti qualitativi per decidere in via preliminare che tipologie di interventi di stabilizzazione possono essere previsti in relazione alla

- QUALITA' dell'AMMASSO ROCCIOSO, alle
- DIMENSIONI dello SCAVO o della LUNGHEZZA LIBERA di AVANZAMENTO (SPAN).

	ESR
Scavi sotterranei temporanei	3-5
Pozzo verticale (circolare)	2.5
(rettangolare)	2.0
Scavi sotterranei permanenti	1.6
Depositi sotterranei, gallerie stradali secondarie ecc.	1.3
Centrali elettriche (sotterranee), gallerie stradali principali	1.0
Centrali nucleari, stazioni ferroviarie	0.8

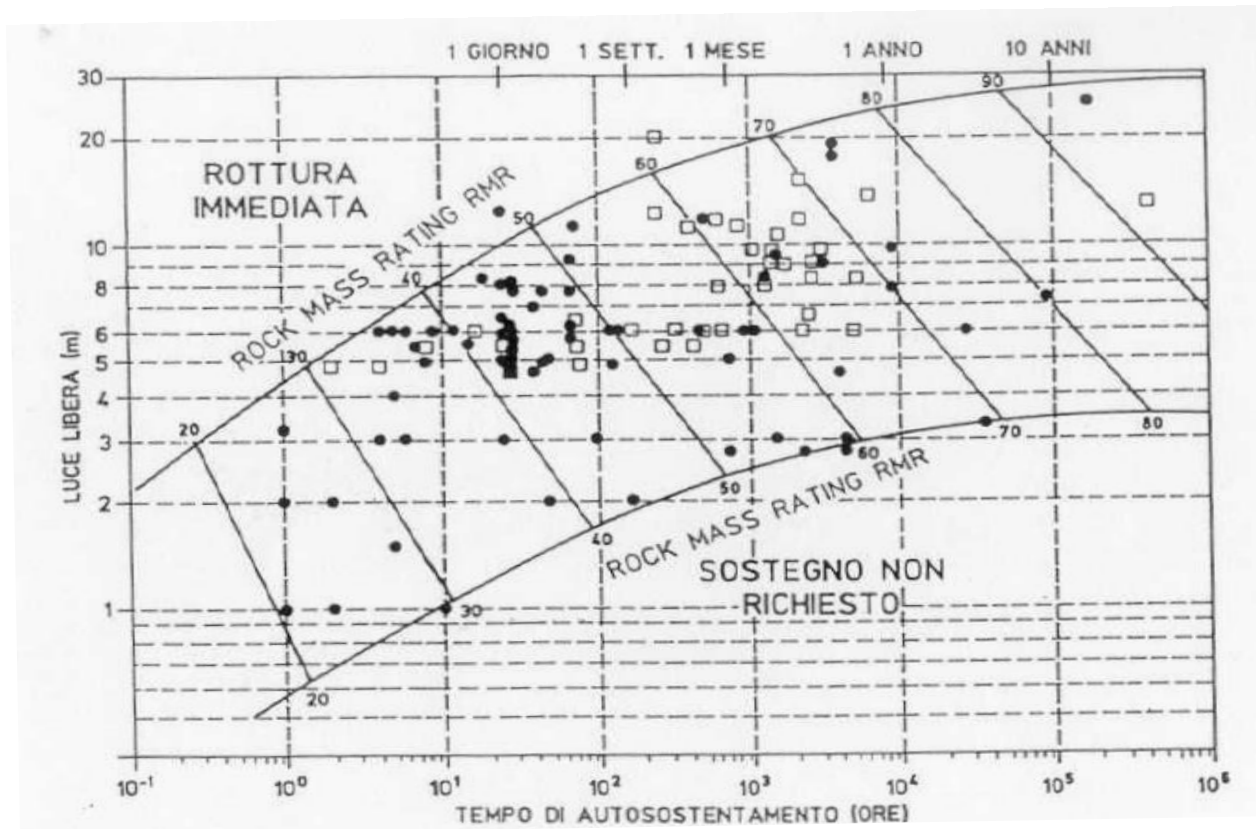
Q System (Barton)



VALUTAZIONE PRELIMINARE con SISTEMI di CLASSIFICAZIONE

RMR (Bieniawsky)

RMR	100-80	80-60	60-40	40-20	<20
CLASSE	I	II	III	IV	V
Qualità ammasso	Molto buona	Buona	Media	Povera	Molto povera

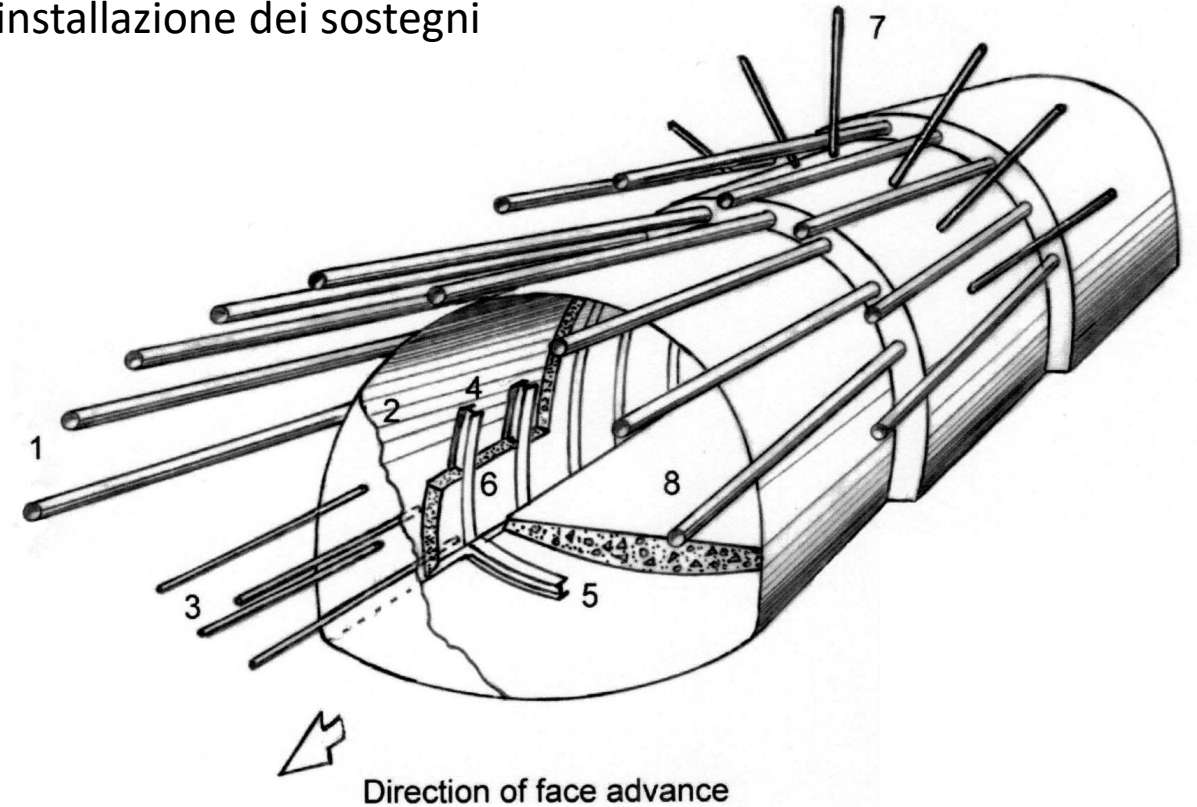
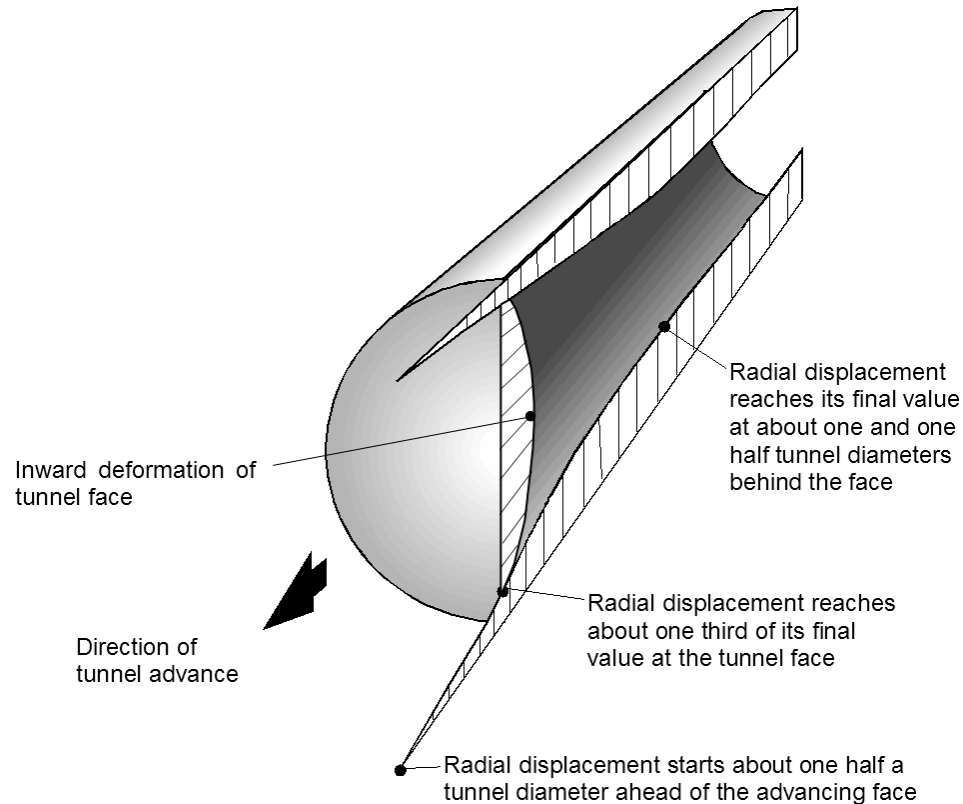


Classe dell'ammasso roccioso	Avanzamento	Bulloni (diametro 20 mm iniettati su tutta la lunghezza)	Calcestruzzo proiettato	Centine
I Molto buono RMR: 81 – 100	A piena sezione, a 3 m dal priverivestimento	Generalmente non è richiesto alcun sostegno ad eccezione di qualche bullone isolato		
II Buono RMR: 61 – 80	A piena sezione, a 1 - 1.5 m dal priverivestimento. Installazione del priverivestimento ad una distanza massima di 20 m dal fronte	Localmente bulloni in calotta, lunghezza 3 m, spaziatura 2.5 m con eventuale rete metallica	50 mm in calotta dove richiesto	Non necessarie
III Discreto RMR: 41 – 60	A sezione parziale, avanzamento massimo in calotta di 1.5 – 3 m. Installazione del priverivestimento ad una distanza massima di 10 m dal fronte	Bulloni di lunghezza 4 m disposti regolarmente con spaziatura 1.5 – 2 m in calotta e sulle pareti, con rete metallica in calotta	50 – 100 mm in calotta e 30 mm sulle pareti	Non necessarie
IV Scadente RMR: 21 – 40	A sezione parziale, avanzamento massimo in calotta di 1.0 – 1.5 m. Installazione del priverivestimento ad una distanza massima di 10 m dal fronte	Bulloni di lunghezza 4 – 5 m disposti regolarmente con spaziatura 1 – 1.5 m in calotta e sulle pareti, con rete metallica	100 – 150 mm in calotta e 100 mm sulle pareti	Profilati leggeri ad interasse di 1.5 m dove necessari
V Molto scadente RMR: < 20	Avanzamento con cunicoli ed allarghi. Avanzamento massimo in calotta di 0.5 – 1.5 m. Immediata installazione del priverivestimento. Calcestruzzo proiettato il più presto possibile dopo l'effettuazione della volata	Bulloni di lunghezza 5 – 6 m disposti regolarmente con spaziatura 1 – 1.5 m in calotta e sulle pareti, con rete metallica. Bulloni in arco rovescio	150 – 200 mm in calotta, 150 mm sulle pareti e 50 mm sul fronte di scavo	Profilati pesanti in acciaio ad interasse di 0.75 m con puntone in arco rovescio

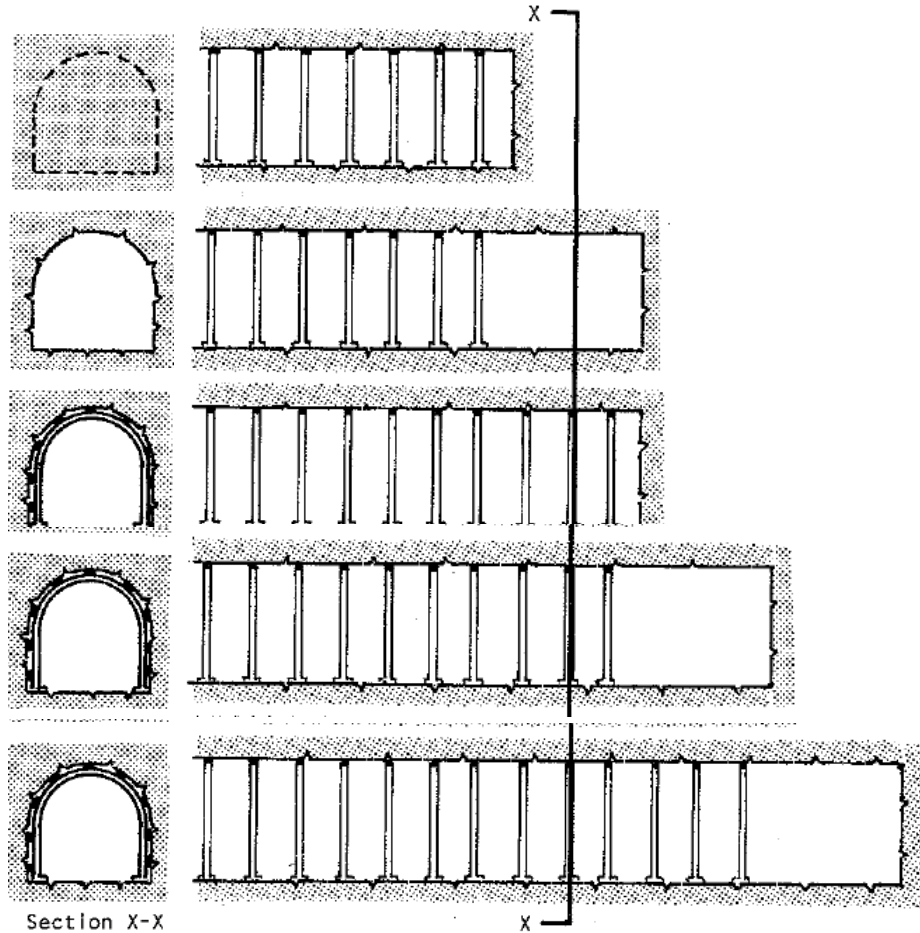
Stato tensio- deformativo 3D indotto durante le fasi di scavo

I sistemi di sostegno o rinforzo vengono di norma installati progressivamente nella zona in prossimità del fronte di scavo dove lo stato tensio-deformativo è modificato rispetto a quello iniziale ma non ha ancora raggiunto una stazionarietà che si ha (escludendo altri fenomeni legati, ad esempio, a creep) lontano dal fronte di scavo.

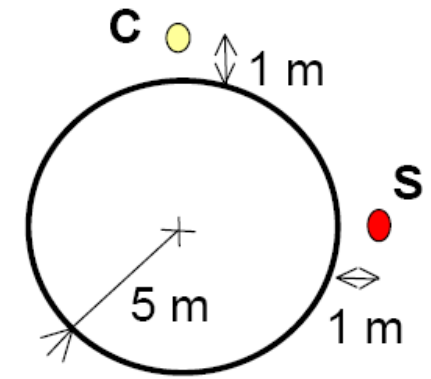
A rigore i processi di dimensionamento devono tenere conto della tridimensionalità e della non stazionarietà del problema con approcci accoppiati che simulino l'avanzare degli scavi e l'installazione dei sostegni



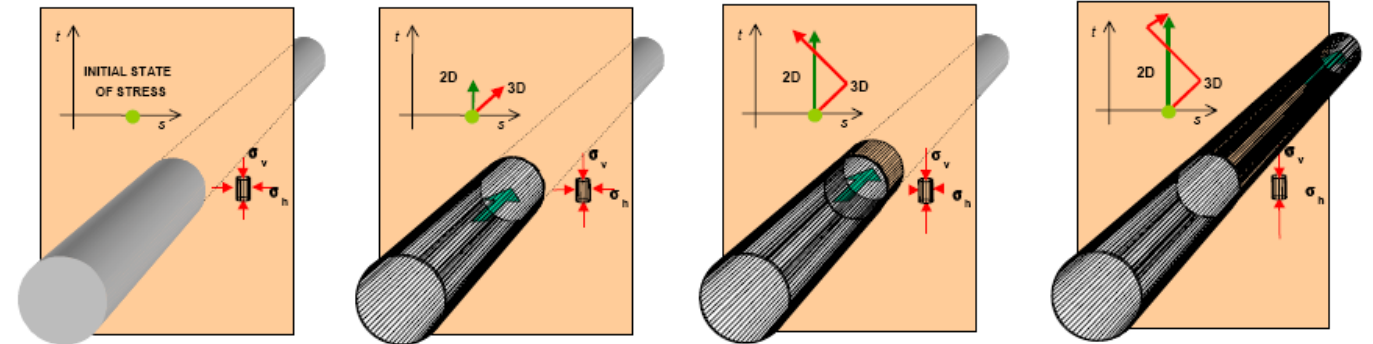
Controllo del percorso tensionale



Sezione longitudinale



Sezione trasversale A-A



(Da "Practical Rock Engineering. E.Hoek)

METODI ANALITICI – CURVA CARATTERISTICA

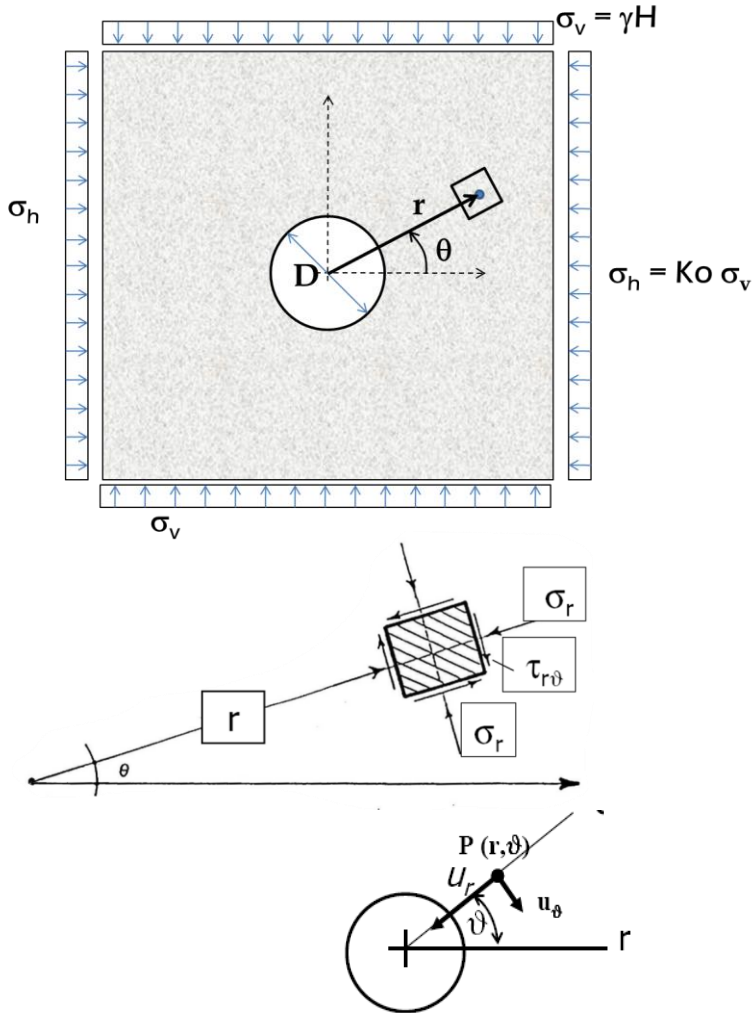
Consentono la definizione dello **stato tensio-deformativo** indotto al contorno della galleria individuando:

- le componenti di tensione
- le componenti di deformazione e spostamento
- l'estensione delle zone in cui si raggiungono le condizioni di plasticizzazione.

LIMITAZIONI:

- **Gallerie PROFONDE** per le quali lo stato di tensione pre-esistente può essere considerato costante nella zona della galleria e del suo contorno
- **Campo 2D** in condizioni di **DEFORMAZIONE PIANA**: LONTANO dagli imbocchi e dal FRONTE di SCAVO (condizioni stazionarie)
- **GEOMETRIA**: galleria circolare (con alcuni accorgimenti anche ellittica)
- **STATO TENSIONALE INIZIALE**
 - isotropo ($K_0 = 1$)
 - anisotropo ($K_0 \neq 1$) (solo in condizioni elastiche)
- **COMPORTAMENTO A.R.**
 - Elastico
 - Elasto-plastico
- **SISTEMI DI SOSTEGNO**
 - assenza
 - presenza

Sistema di riferimento



Soluzione di Kirsh

$$\sigma_r = \frac{1}{2} p_0 \left[(1+k_0) \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) - (1-k_0) \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2} \right) \cos 2\theta \right]$$

Tensione normale radiale

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2} p_0 \left[(1+k_0) \left(1 + \frac{a^2}{r^2} \right) + (1-k_0) \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} \right) \cos 2\theta \right]$$

Tensione normale
circonferenziale

$$\tau_{r\theta} = \frac{1}{2} p_0 (1-k_0) \left(1 - \frac{a^2}{r^2} \right) \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} + \frac{2a^2}{r^2} \right) \sin 2\theta$$

Tensione tangenziale

$$u_r = - \frac{\sigma_v a^2}{4rG} \left\{ (1+k_0) - (1-k_0) \left[4(1-\nu) - \frac{a^2}{r^2} \right] \cos 2\theta \right\}$$

Spostamento radiale

$$u_\theta = - \frac{\sigma_v a^2}{4rG} \left\{ (1-k_0) \left[2(1-2\nu) + \frac{a^2}{r^2} \right] \sin 2\theta \right\}$$

Spostamento circonferenziale

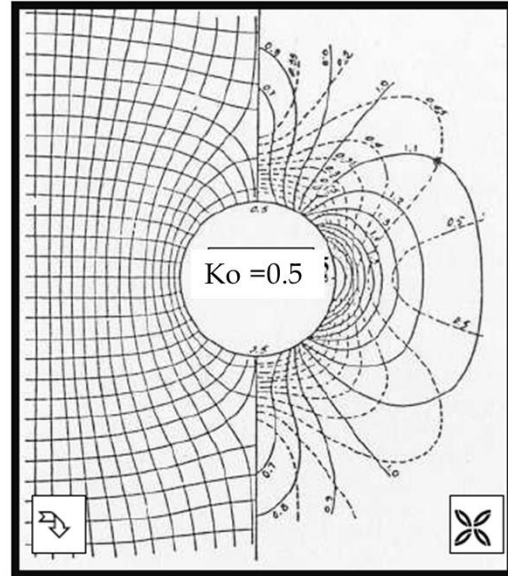
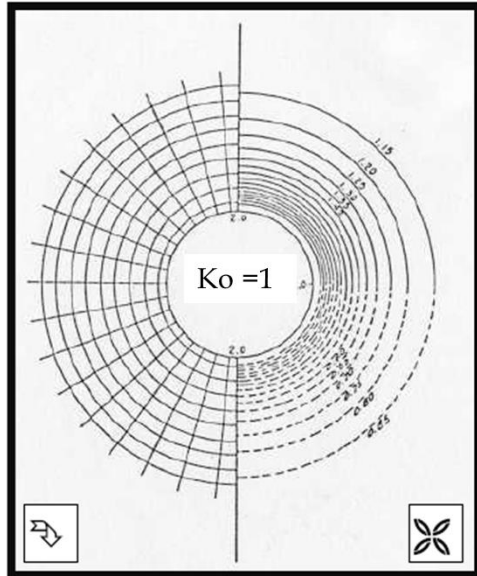
$$\sigma_v = p_0 = \gamma H$$

$$\sigma_h = k_0 p_0$$

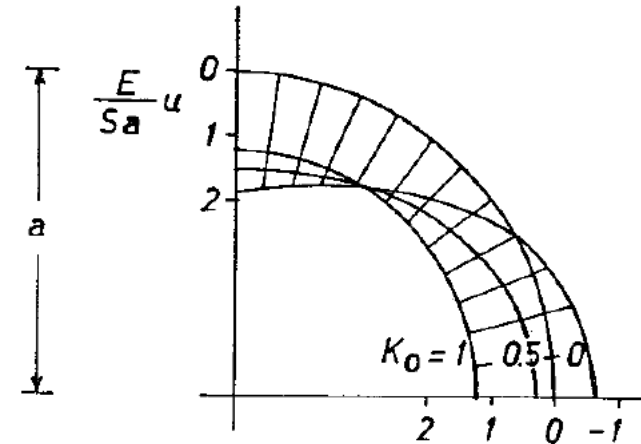
Lo stato di tensione dipende dalla distanza r ma anche dalla coordinata θ .

Le tensioni τ sono nulle per $r=a$ e lungo le direzioni orizzontale e verticale

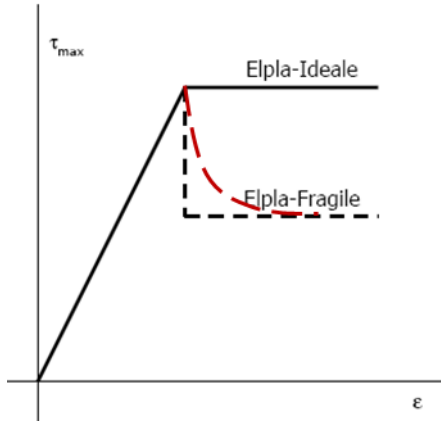
RETICOLO DELLE ISOSTATICHE e SOLLECITAZIONI PRINCIPALI MAGGIORE e MINORE



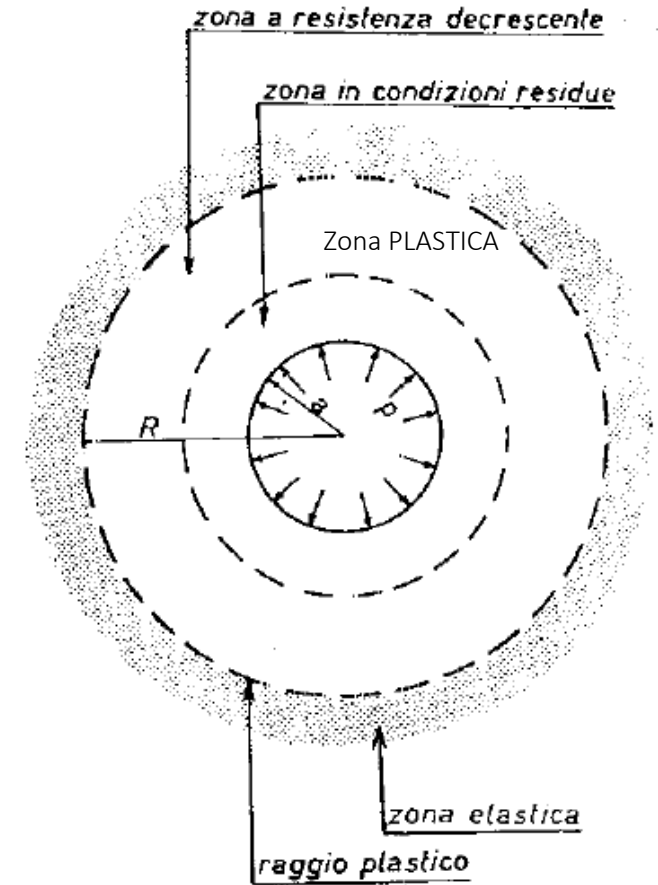
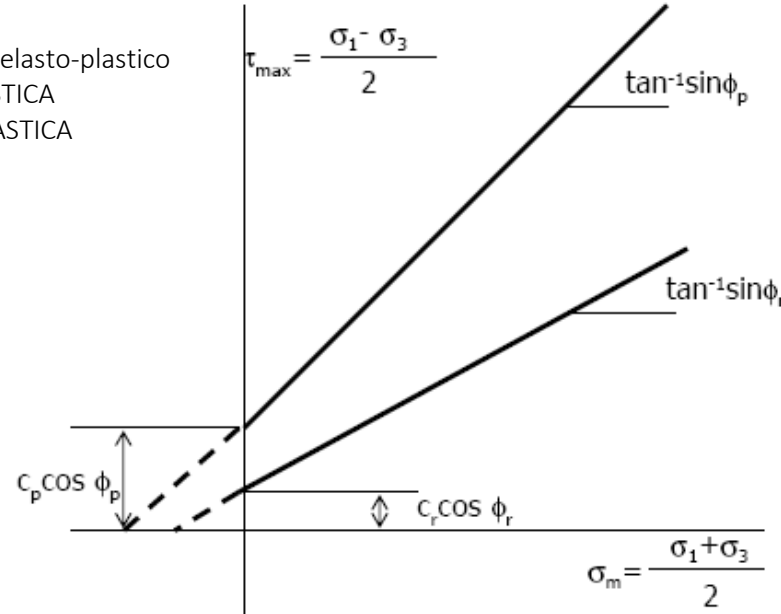
PROFILI di SPOSTAMENTO AL VARIARE delle CONDIZIONI INIZIALI di TENSIONE



Condizione di plasticità (idealmente plastica o fragile)



Stati al confine elasto-plastico
nella zona ELASTICA
ed in quella PLASTICA



Se si considera una roccia a comportamento fragile si forma una fascia di plasticizzazione al contorno della galleria che rimane in condizione «residue» ed una zona esterna che rimane in campo elastico. In questo caso ($\nu = 0$) si possono impiegare metodi analitici per il calcolo dello stato tensio-deformativo.

Se si considera un comportamento di softening la zona plasticizzata è costituita da una fascia esterna in cui la roccia presenta caratteristiche intermedie tra quelle di picco e quelle residue. Per il calcolo dello stato di tensione e deformazione al contorno dello scavo è necessario ricorrere a metodi di calcolo numerici.

ZONA PLASTICA

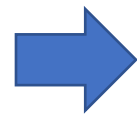
$$\sigma_r = (p_i + c_r \cot g \phi_r) \left(\frac{r}{a} \right)^{N_r - 1} - c_r \cot g \phi_r$$

$$\sigma_\theta = N_r (p_i + c_r \cot g \phi_r) \left(\frac{r}{a} \right)^{N_r - 1} - c_r \cot g \phi_r$$

ZONA ELASTICA

$$\sigma_r = p_o - (p_o - \sigma_R) \frac{R_p^2}{r^2}$$

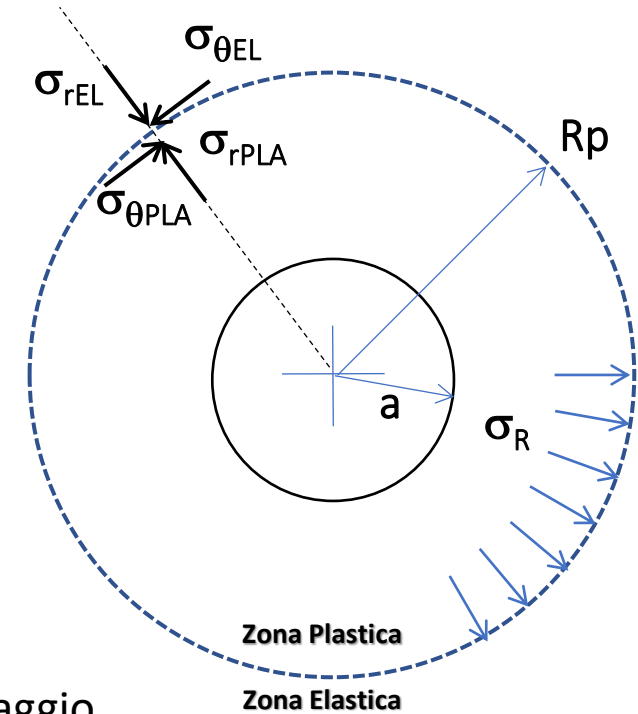
$$\sigma_\theta = p_o + (p_o - \sigma_R) \frac{R_p^2}{r^2}$$



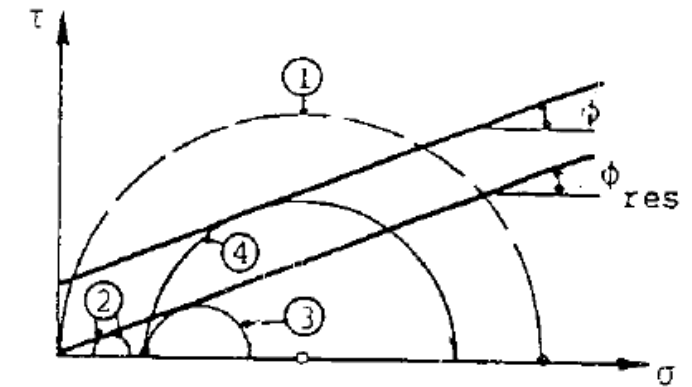
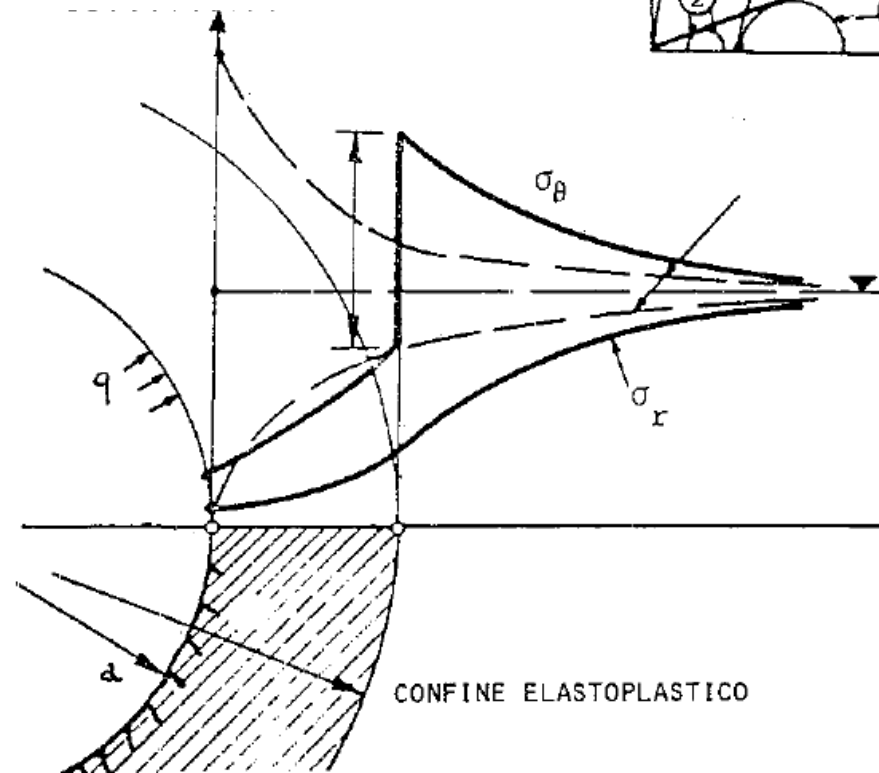
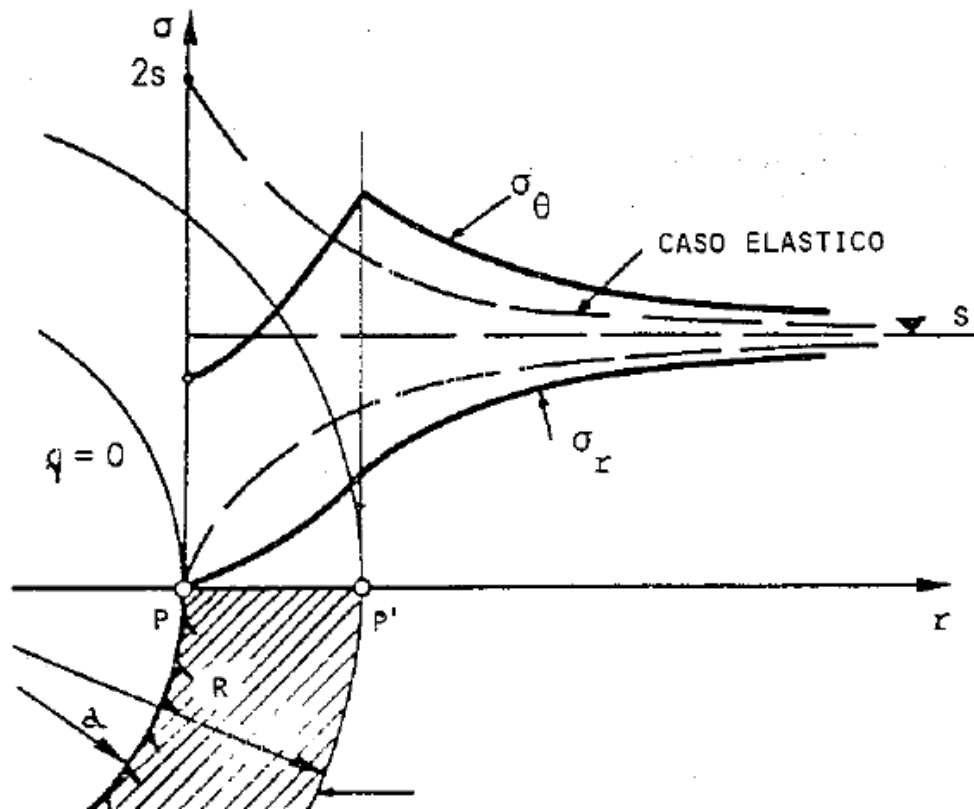
Galleria fittizia con raggio pari al Raggio plastico e pressione interna pari a σ_R

$$\sigma_R = p_o (1 - \sin \phi_p) - c_p \cos \phi_p$$

$$R_p = a \left[\frac{(p_o + c_r \cot g \phi_r) - (p_o + c_p \cot g \phi_p) \sin \phi_p}{p_i + c_r \cot g \phi_r} \right] \left(\frac{1}{N_r - 1} \right)$$



Componenti di tensione al contorno della galleria in
 Campo elastico (linea tratteggiata)
 Campo elasto-plastico (perfetta plasticità)
 Campo elasto-plastico fragile



ZONA PLASTICA

$$u_r = \frac{1+\nu}{E} \cdot \left\{ \begin{array}{l} \frac{R_{pl}}{r^k} \cdot (p_0 + c_p \cdot \cot g\varphi_p) \cdot \sin \varphi_p + (1-2\nu) \cdot (p_0 + c_r \cdot \cot g\varphi_r) \cdot \left(\frac{R_{pl}}{r^k} - r \right) - \\ - \frac{(p_i + c_r \cdot \cot g\varphi_r) \cdot [1 + N_r \cdot k - \nu \cdot (k+1) \cdot (1 + N_r)]}{(N_r + k) \cdot a^{N_r - 1}} \cdot \left[\frac{R_{pl}^{(N_r+k)}}{r^k} - r^{N_r} \right] \end{array} \right\}$$

$$N_r = \frac{1 + \sin \varphi_r}{1 - \sin \varphi_r}$$

$$k = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi} = 1$$

K: FATTORE di DILATANZA ($1 \div N\phi$)
 ψ: ANGOLO di DILATANZA ($\leq \phi$)

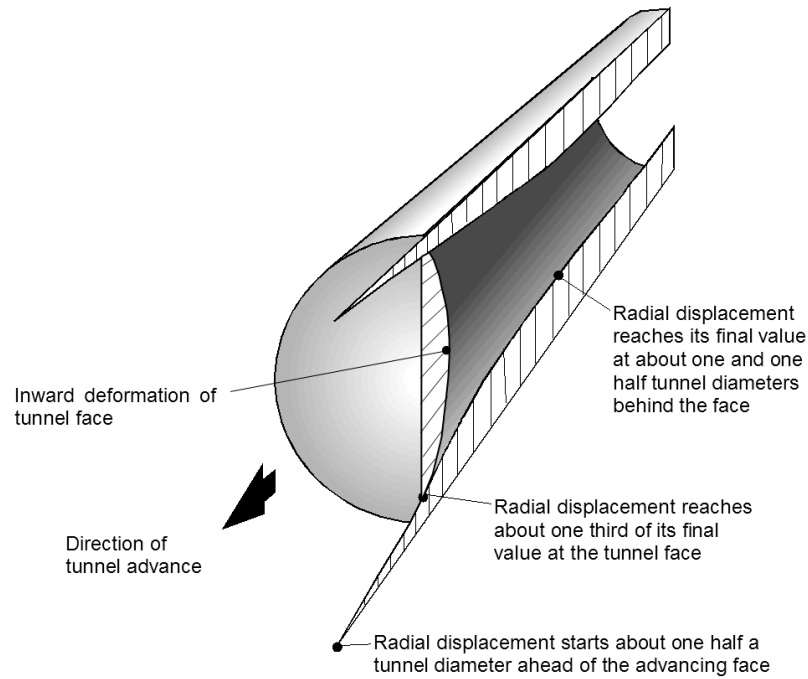
ZONA ELASTICA

$$u_r = \frac{1+\nu}{E} \cdot (p_0 - \sigma_R) \cdot \frac{R_{pl}^2}{r}$$

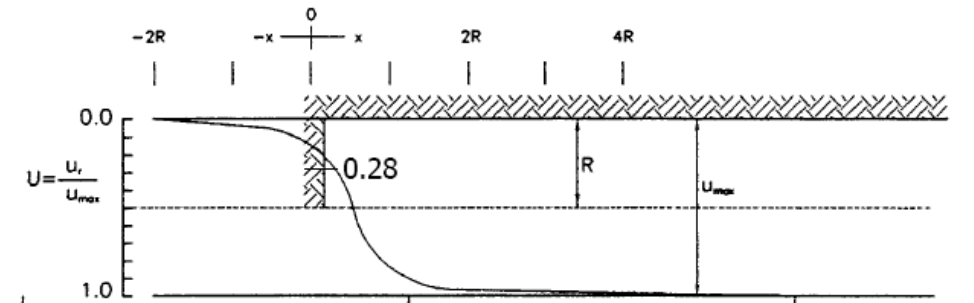
PROFILO LONGITUDINALE di SPOSTAMENTO

Nella zona in prossimità del fronte, ove vengono installati i sistemi di sostegno/rinforzo, le condizioni tensio-deformative hanno un carattere prettamente 3D in quanto sono fortemente influenzate dalla presenza dell'ammasso roccioso ancora da scavare (nucleo di avanzamento) che produce un effetto di contenimento.

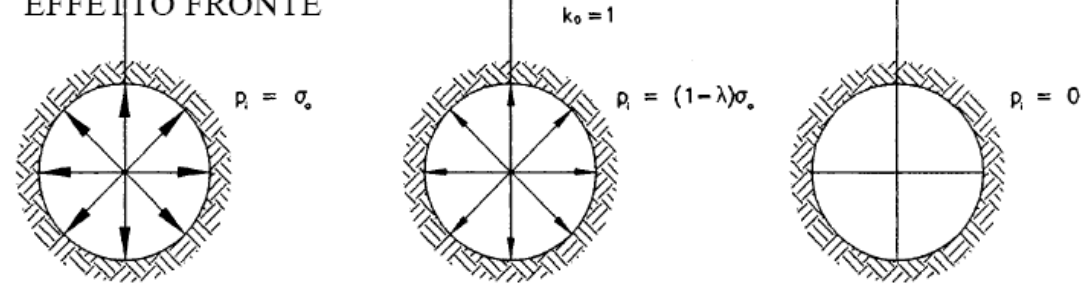
Anche gli spostamenti di CONVERGENZA RADIALE misurabili lungo le pareti di scavo iniziano nell'ammasso roccioso ancora presente e vedono un incremento sino ad un valore stabile (a meno di fenomeni di instabilità generali del cavo) lontano dal fronte di scavo



TRIDIMENSIONALITA' DEL PROBLEMA



EFFETTO FRONTE



PROFILO LONGITUDINALE di SPOSTAMENTO

L'andamento dello SPOSTAMENTO RADIALE ($K_0=1$) in funzione della distanza dal fronte è stato espresso da Panet & Guenot (1982) mediante una relazione che interpola i risultati di modelli numerici agli elementi finiti

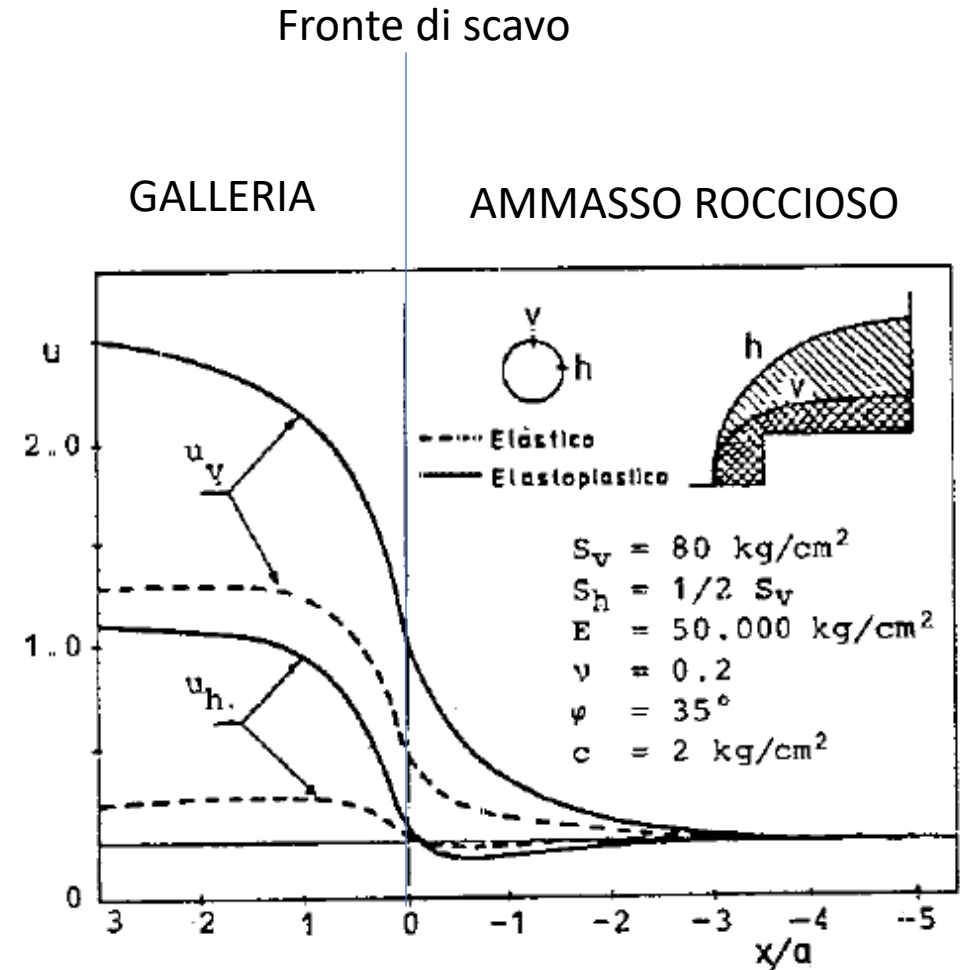
$$u_r = \lambda(x) \cdot u_r(\infty) = \lambda(x) \cdot \left[\frac{a \cdot p_o}{2G} \right] \quad \text{MEZZO ILE} \quad \text{(elastico lineare ideale)}$$

$$\lambda(x) = 0.28 + 0.72 \left\{ 1 - \left[\frac{0.84 \cdot a}{0.84 \cdot a + x} \right]^2 \right\}$$

$$u_r = u_r(0) + \lambda(x) \cdot (u_r(\infty) - u_r(0))$$

MEZZO ELPLA
(elastico plastico ideale)

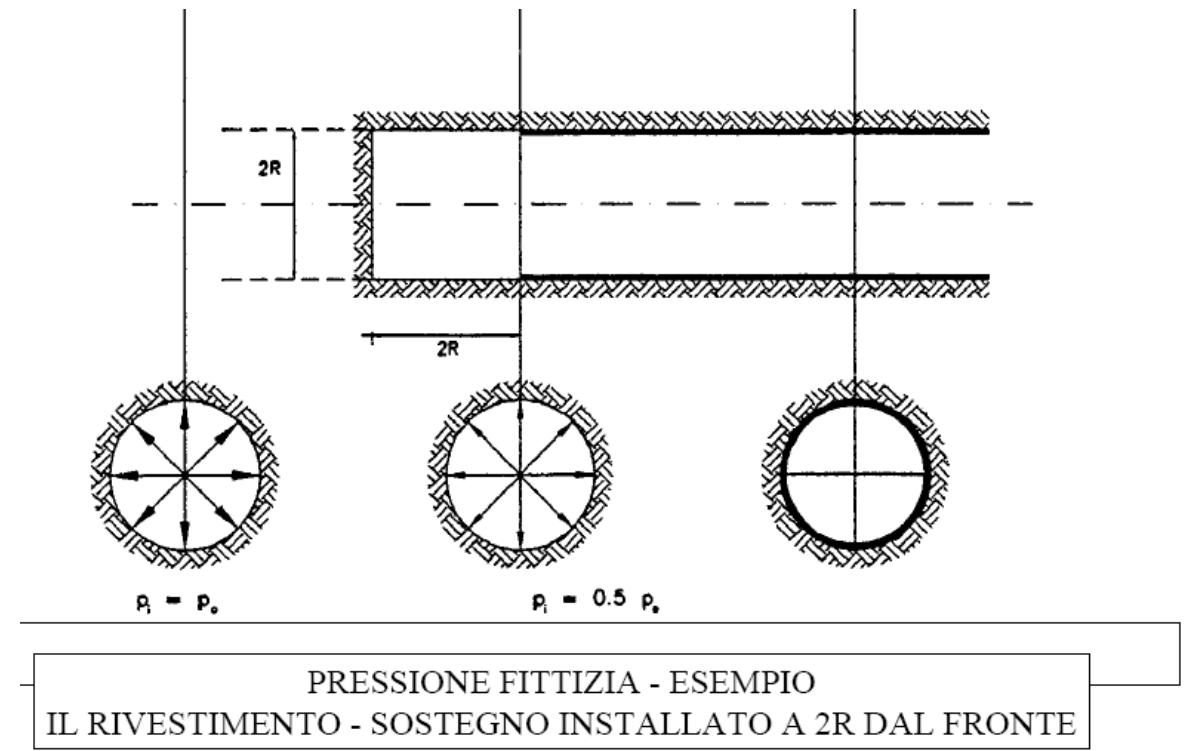
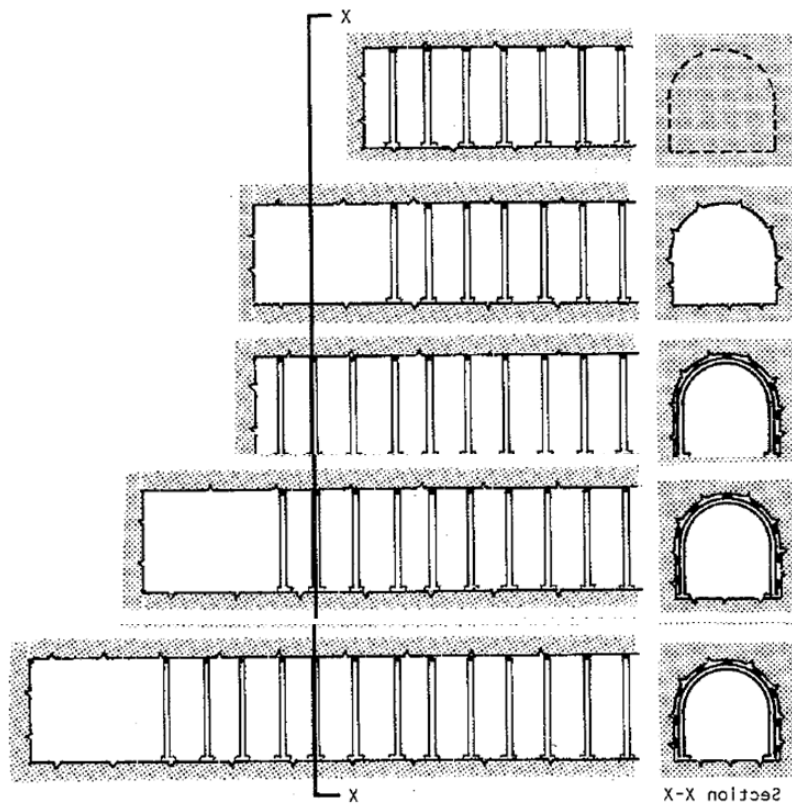
$$\lambda(x) = 1 - \left[\frac{1}{1 + \frac{x}{0.84 \cdot R_{pl}}} \right]^2$$



METODO CURVA CARATTERISTICA per DIMENSIONAMENTO SOSTEGNI

L'effetto 3D del fronte può essere analizzato per SIMULARE LO SCAVO E L'AVANZAMENTO DEL FRONTE considerando un modello bidimensionale della galleria ed applicando una PRESSIONE FITTIZIA sul perimetro dello scavo, gradualmente decrescente da un valore pari allo stato tensionale originario ad un valore che è funzione della distanza tra lo stesso fronte e la sezione in esame.

In particolare questo metodo può essere applicato per il dimensionamento del sostegno o del rivestimento di una galleria, attraverso la valutazione delle deformazioni del contorno dello scavo in funzione della pressione di stabilizzazione applicata.



METODO CURVA CARATTERISTICA per DIMENSIONAMENTO SOSTEGNI

CURVA CARATTERISTICA della GALLERIA (Ground Reaction Curve, GRC)

Esprime la relazione tra la pressione (fittizia) applicata alla parete della galleria e lo spostamento radiale delle pareti (CONVERGENZA).
La curva caratteristica della galleria può essere determinata analiticamente considerando una galleria circolare in ammasso roccioso considerato come un mezzo continuo equivalente, omogeneo, isotropo, con comportamento EL-PLA e stato tensionale iniziale isotropo.

CAMPO ELASTICO

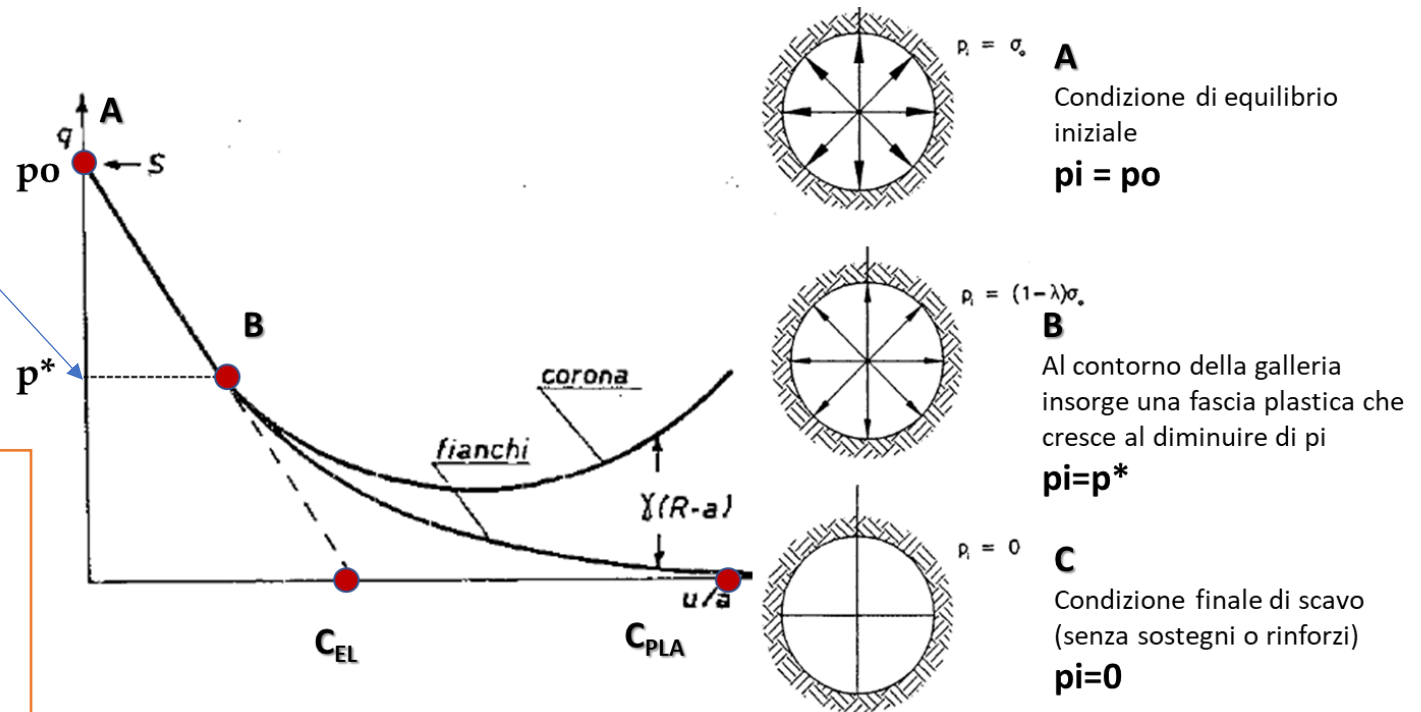
$$u_r = \frac{1+\nu}{E} \cdot (p_o - p_i) \cdot \frac{a^2}{r}$$

$$p_i^* = \frac{2(p_o - c_p \sqrt{N_p})}{1 + N_p}$$

CAMPO PLASTICO

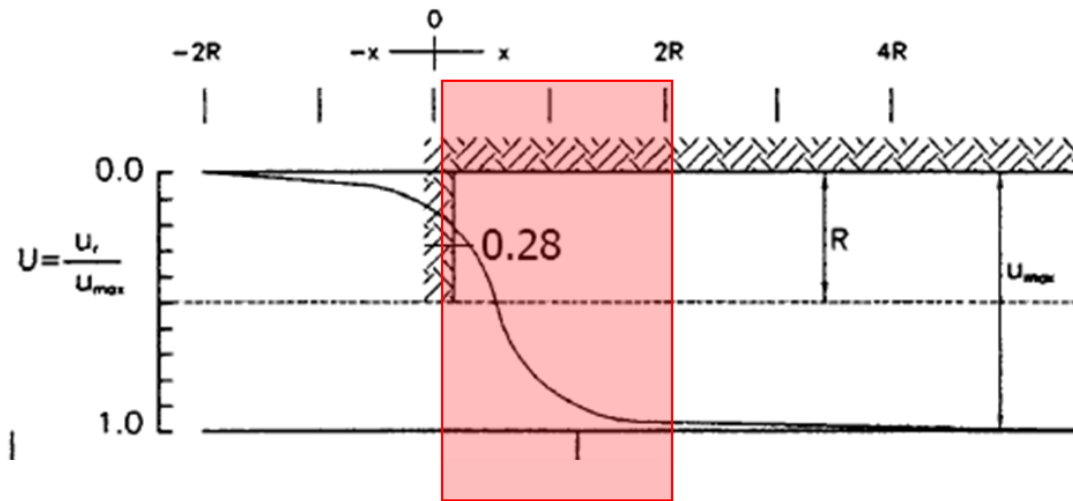
$$u_r = \frac{1+\nu}{E} \cdot \left\{ \begin{aligned} & \frac{R_{pl}}{r^k} \cdot (p_o + c_p \cdot \cot g \phi_p) \cdot \sin \phi_p + (1-2\nu) \cdot (p_o + c_r \cdot \cot g \phi_r) \cdot \left(\frac{R_{pl}}{r^k} - r \right) - \\ & - \frac{(p_i + c_r \cdot \cot g \phi_r) \cdot [1 + N_r \cdot k - \nu \cdot (k+1) \cdot (1 + N_r)]}{(N_r + k) \cdot a^{N_r-1}} \cdot \left[\frac{R_{pl}}{r^k} - r^{N_r} \right] \end{aligned} \right\}$$

$$Rp = a \left[\frac{(p_o + c_r \cot g \phi_r) - (p_o + c_p \cot g \phi_p) \operatorname{sen} \phi_p}{p_i + c_r \cot g \phi_r} \right] \left(\frac{1}{N_r - 1} \right)$$

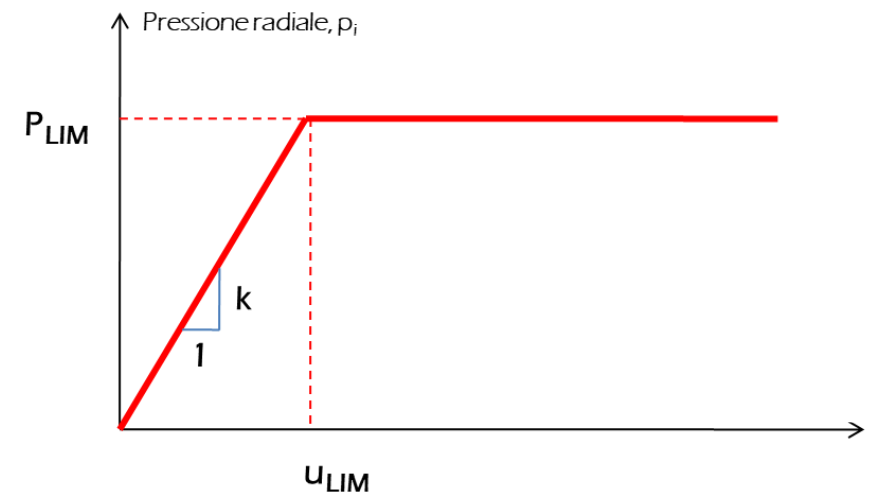
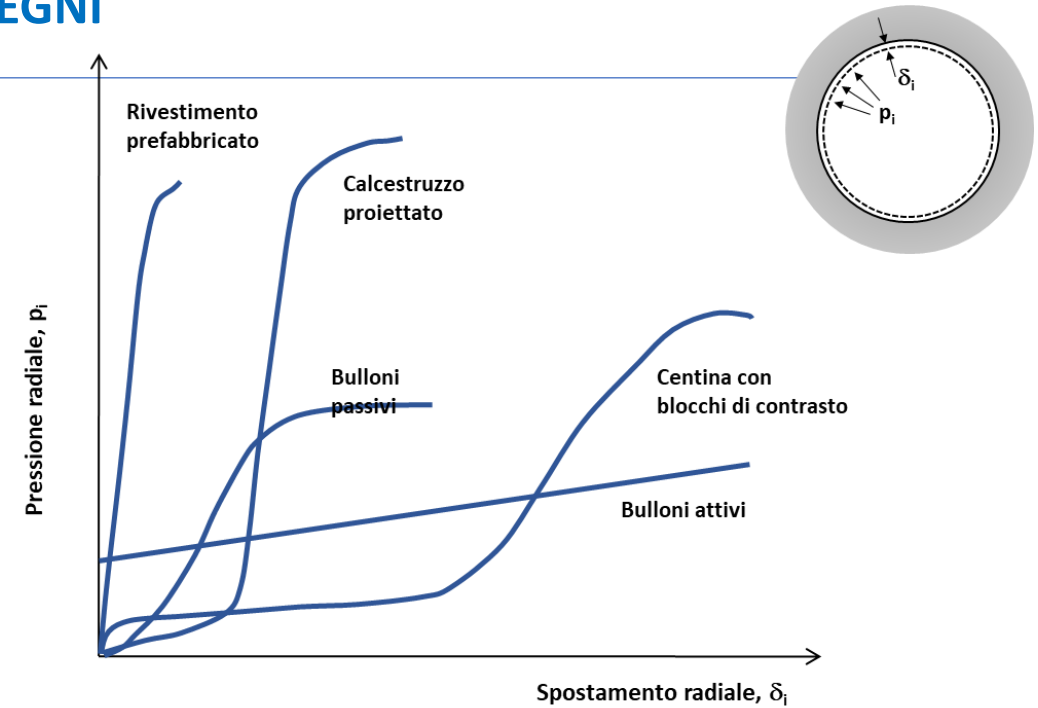


METODO CURVA CARATTERISTICA per DIMENSIONAMENTO SOSTEGNI

Gli elementi di sostegno e di rinforzo vengono installati in prossimità del fronte di scavo, laddove una quota degli spostamenti radiali si è già manifestata. Una volta installate, tali opere si deformano solidalmente all'ammasso roccioso e cominciano a prendere carico con l'avanzare degli scavi e sino al raggiungimento di una stazionarietà statica. Anche per i sistemi di consolidamento possono essere ricostruite le curve caratteristiche che esprimono la relazione teorica tra lo stato di deformazione e il corrispondente stato di tensione indotto.

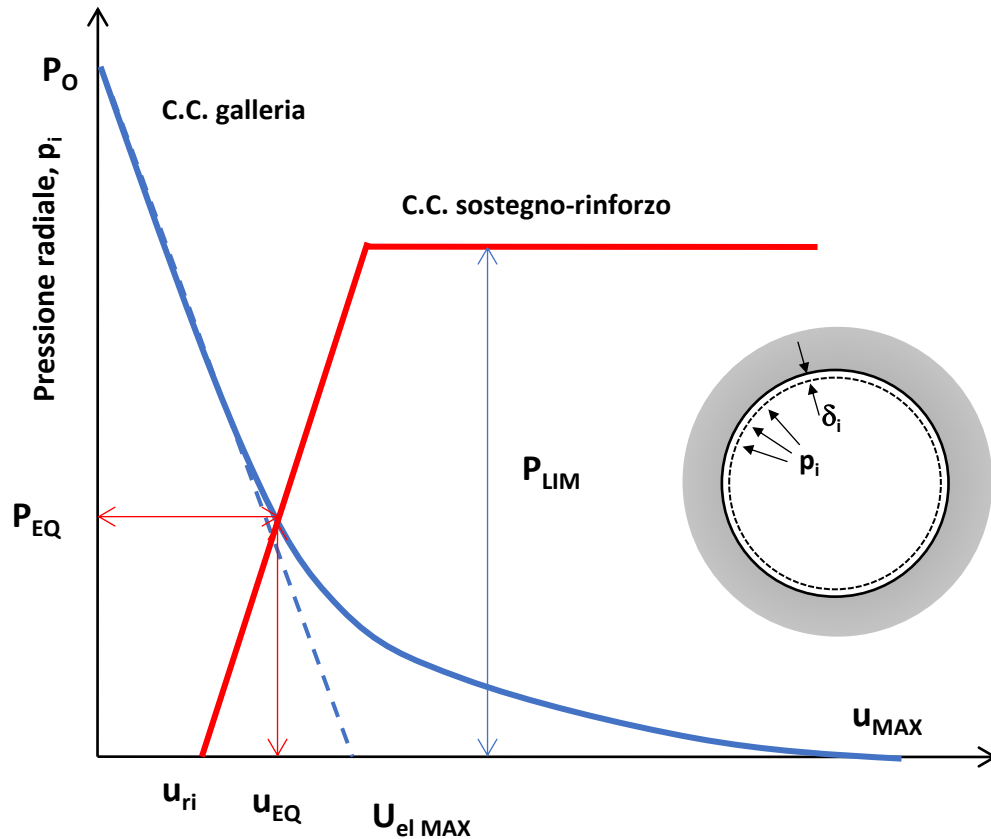


Zona di posa in opera dei sistemi di sostegno - rinforzo



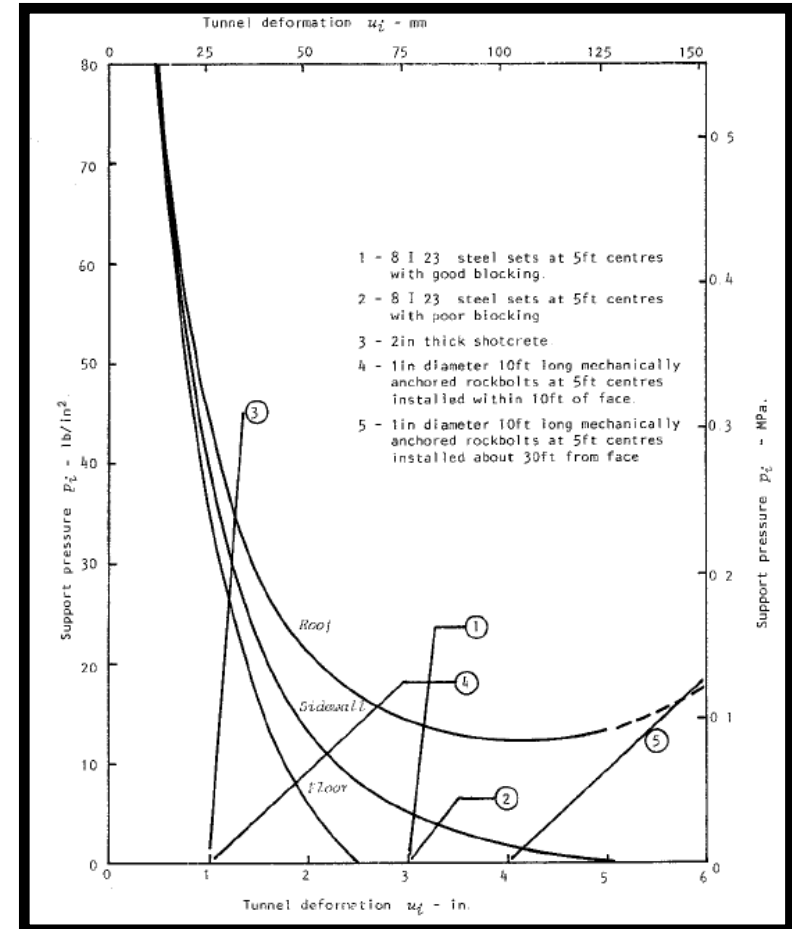
METODO CURVA CARATTERISTICA per DIMENSIONAMENTO SOSTEGNI

Tramite il confronto tra la curva caratteristica della galleria e dell'elemento analizzato (noto lo spostamento iniziale u_{ri}) è possibile determinare il valore corrispondente della pressione d'equilibrio P_{eq} e dello spostamento complessivo del sistema roccia-sostegno.



u_{ri} è la somma di più contributi

- Tempo e/o posizione di installazione ($\approx 30\% u_{elMAX}$ se al fronte)
- Mancato contatto iniziale tra roccia e supporto (centine)

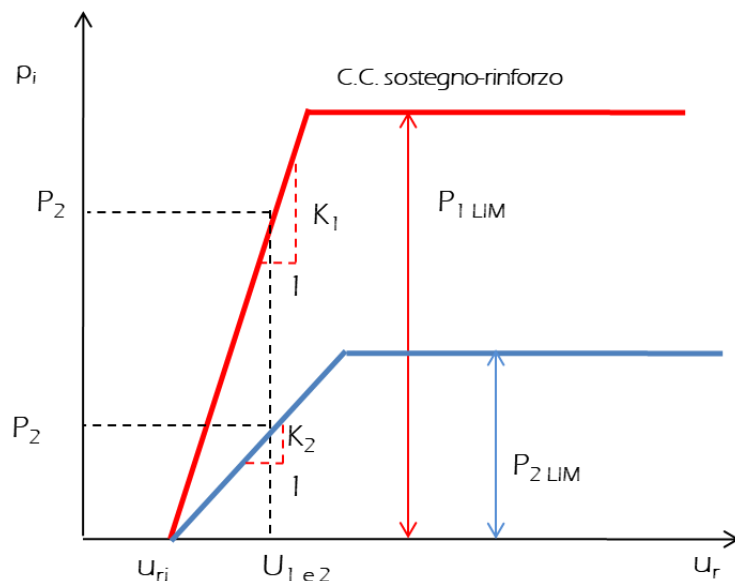


METODO CURVA CARATTERISTICA per DIMENSIONAMENTO SOSTEGNI

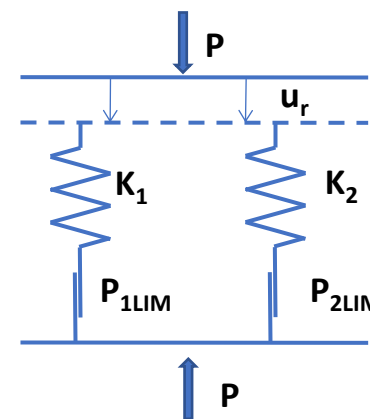
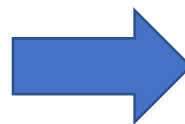
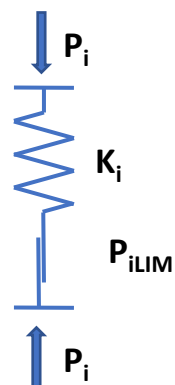
SISTEMI ACCOPPIATI di elementi si SOSTEGNO - RINFORZO

Gli elementi di sostegno e/o rinforzo possono essere installati “contemporaneamente” alla medesima distanza dal fronte, ovvero, possono essere posati in opera a distanze crescenti dal fronte.

Molla avente rigidezza k , posta in serie ad un elemento cedevole, che provoca uno spostamento indefinito al raggiungimento della pressione limite.



$$P_i = K_i u$$



$$K_{EQ} = \sum K_i$$
$$p_i = K_i (u_r - u_i)$$

I sistemi accoppiati lavorano agendo in “parallelo”: gli elementi che si trovano alla medesima distanza dal fronte, sono soggetti al MEDESIMO SPOSTAMENTO radiale e la pressione rilasciata dall’ammasso roccioso viene ridistribuita su ciascun elemento PROPORZIONALMENTE alla RIGIDEZZA caratteristica.

METODO CURVA CARATTERISTICA per DIMENSIONAMENTO SOSTEGNI

SISTEMI ACCOPPIATI di elementi si SOSTEGNO - RINFORZO

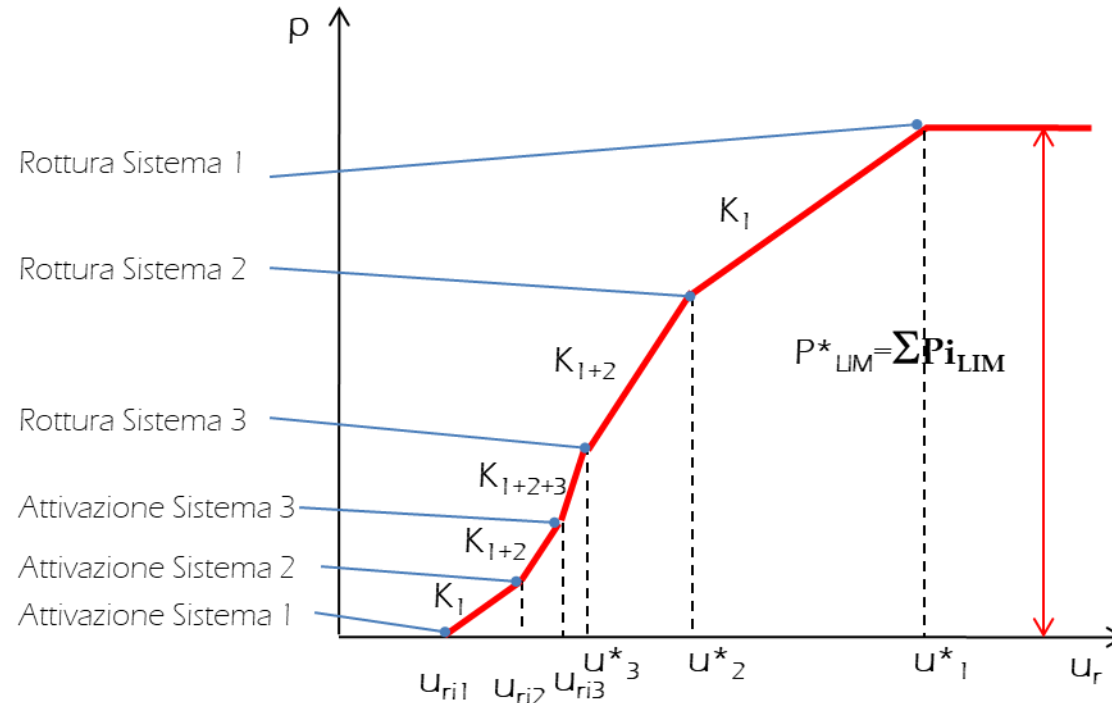
La curva caratteristica è costituita da una linea spezzata caratterizzata da una rigidezza che varia in relazione agli elementi di sostegno e/o rinforzo attivi.

Gli elementi posati in prossimità del fronte saranno caratterizzati da uno spostamento iniziale u_{ri} di attivazione minore rispetto a quello degli elementi attivati a distanze maggiori.

I primi tratti avranno una rigidezza via via crescente (entrano in carico i sostegni – rinforzo attivati più vicino al fronte) sino al raggiungimento della completa attivazione.

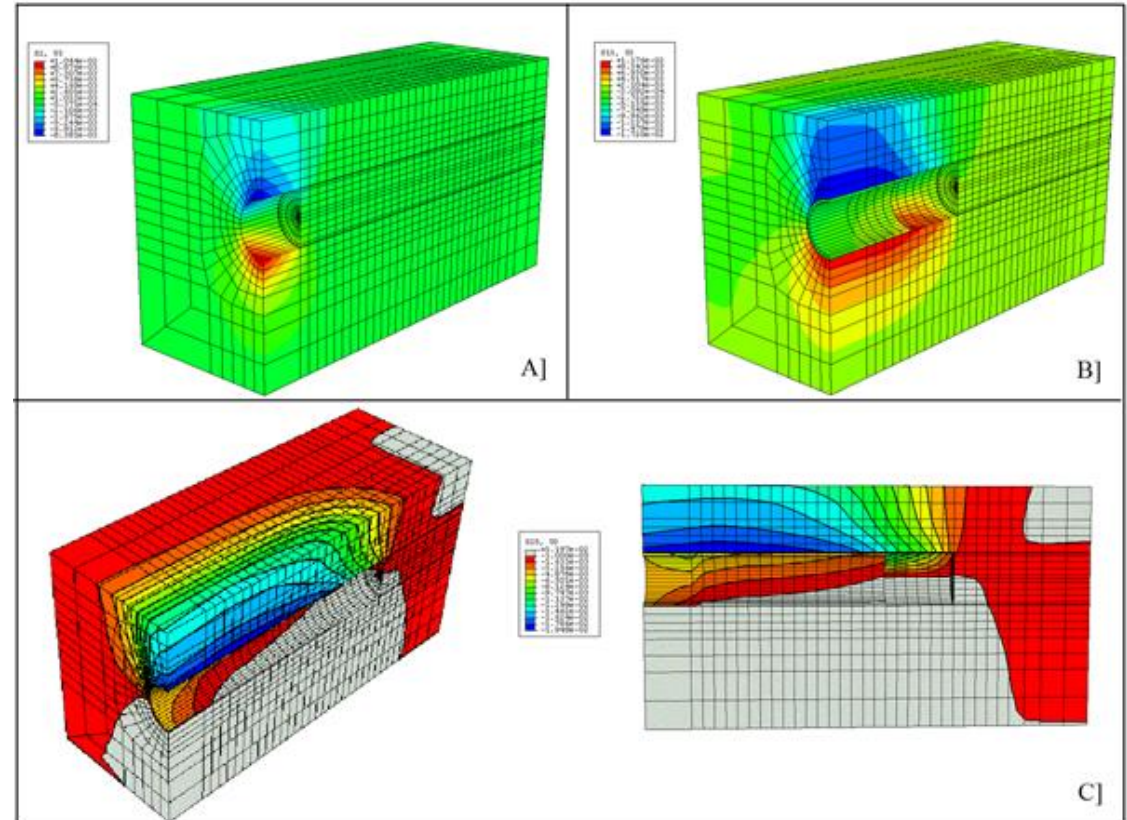
Dopodiché una rigidezza via via decrescente in ragione delle pressioni limite raggiunte dai singoli elementi installati.

IPOTIZZIAMO LA PRESENZA di 3 sistemi .



I modelli numerici consentono di eseguire analisi progettuali superando le ipotesi limitative necessarie per l'applicazione dei metodi analitici:

- complessità geometriche e geologico-geotecniche
- comportamenti meccanici
- stati tensionali pre-esistenti
- simulazioni fasi di scavo e posa dei consolidamenti (anche al fronte o infilaggi)



SCELTA DEL MODELLO

• Le **discontinuità** possono essere considerate in modo implicito oppure in modo esplicito.

• La scelta del tipo di approccio è governata dalle caratteristiche fisiche e geometriche delle discontinuità in relazione alla **scala del problema**.

• Il **MODELLO CONTINUO** è applicato, ad es., ad ammassi rocciosi costituiti da rocce tenere; o quando non sia evidente la presenza di macrostrutture che ne governano la risposta deformativa.

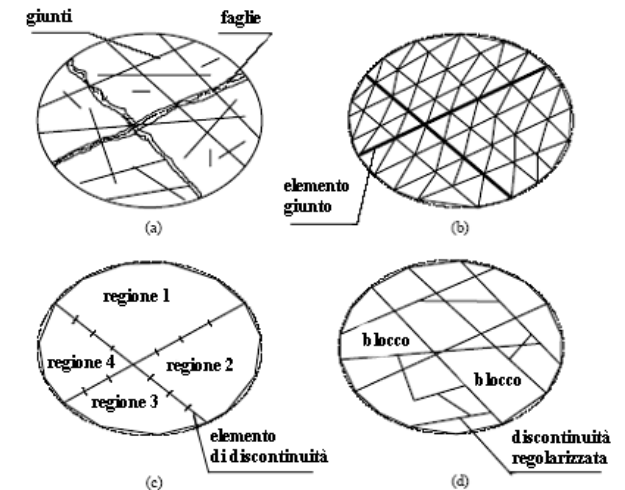
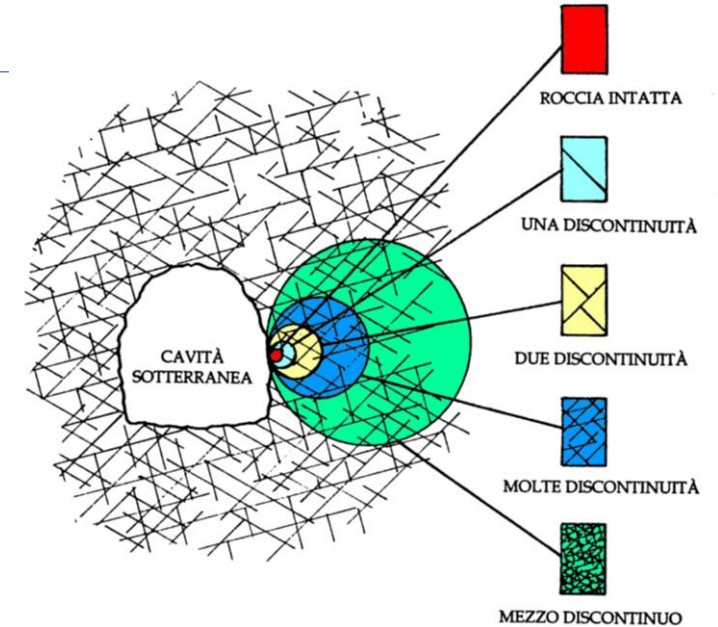
• Il **MODELLO CONTINUO-EQUIVALENTE** si utilizza quando la risposta deformativa dipende dalle caratteristiche globali del sistema roccia intatta – discontinuità.

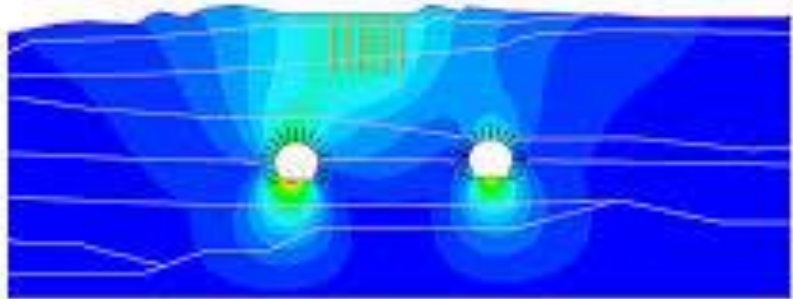
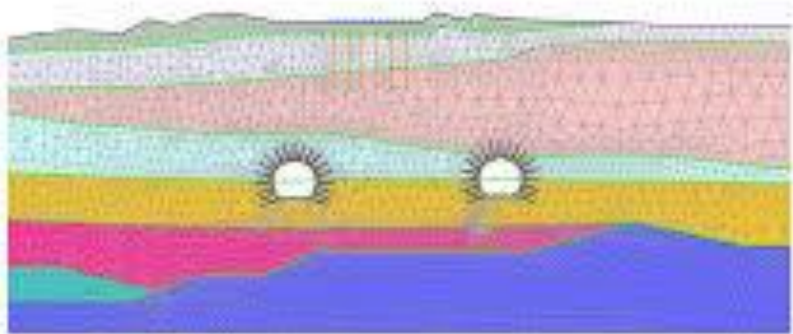
• Il **MODELLO DISCONTINUO** dev'essere utilizzato il comportamento tensio-deformativo è governato principalmente dai sistemi di discontinuità.

L'approccio continuo e quello discontinuo sviluppati principalmente nei seguenti metodi numerici :

1. Metodi del continuo: differenze finite (FDM), elementi finiti (FEM), elementi di contorno (BEM).
2. Metodi del discontinuo: elementi distinti (DEM), Teoria dei Blocchi (tB), "discrete fracture network" (DFN).
3. Metodi ibridi continuo-discontinuo (FEM/DEM)

Sia per il continuo sia per il discontinuo, esistono soluzioni analitiche e metodi di modellazione numerica





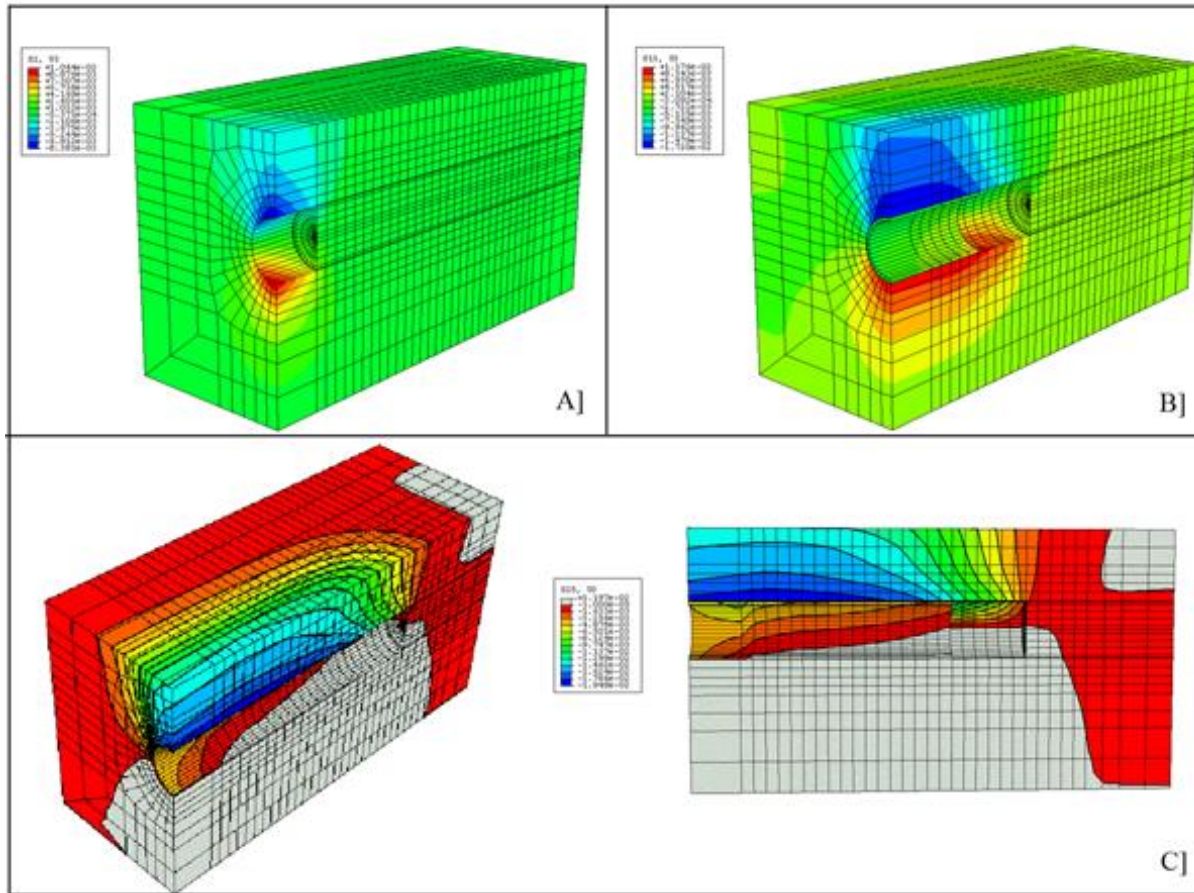
COMPLESSITA' GEOLOGICO-GEOTECNICA

COMPLESSITA' nel COMPORTAMENTO MECCANICO dei MATERIALI

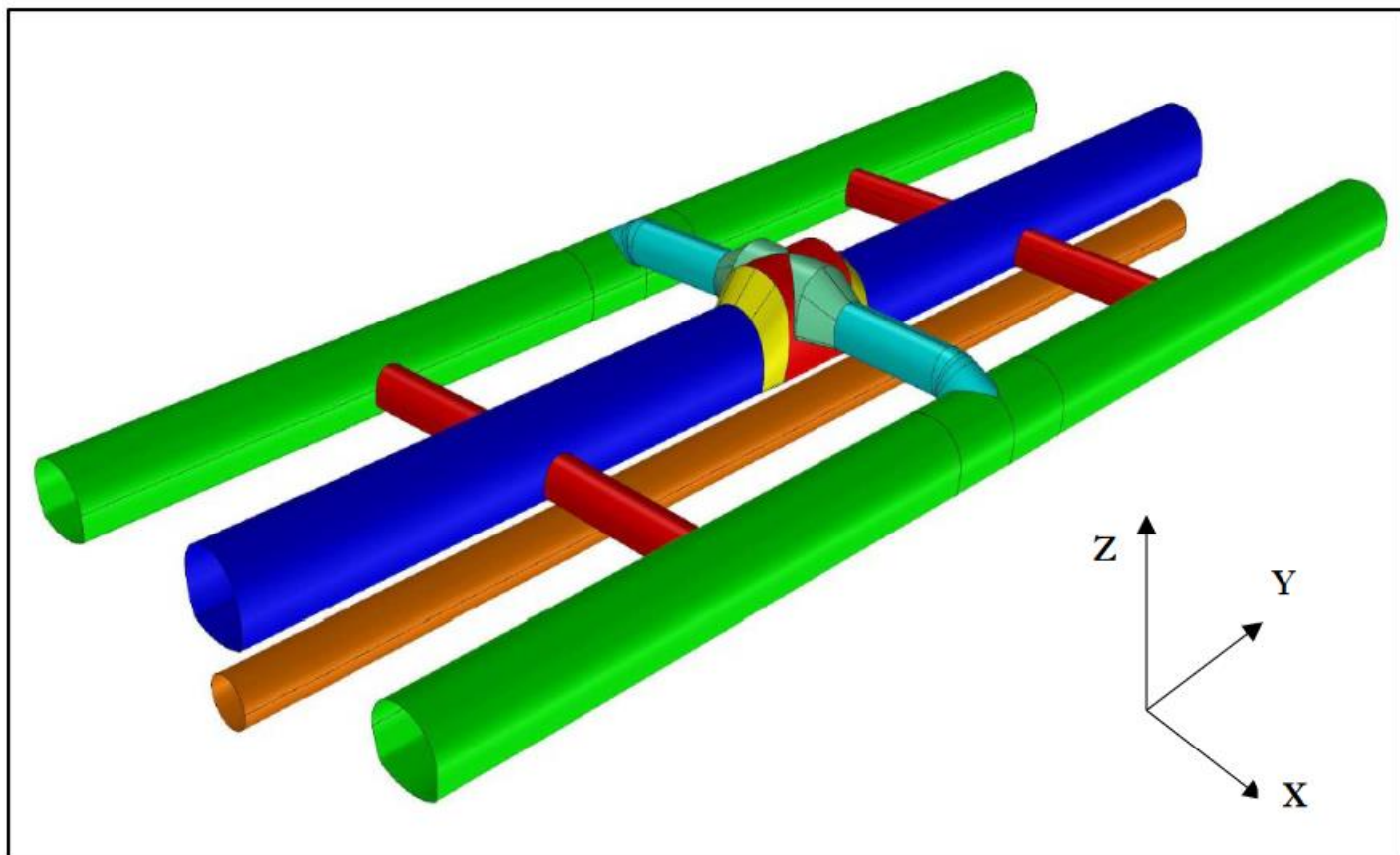
GEOMETRIA SCAVI

INTERFERENZA TRA SCAVI VICINI

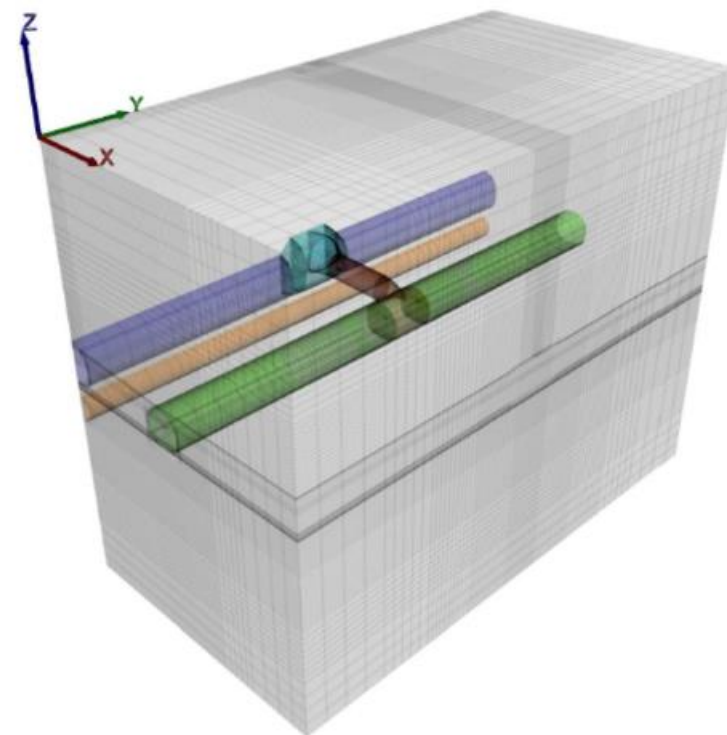
Hanno alcune limitazioni riguardo lo stato tensionale in prossimità del fronte di scavo (3D) simile ai modelli analitici. Si seguono delle procedure di detensionamento progressivo analoghe a quelle viste per curva caratteristica

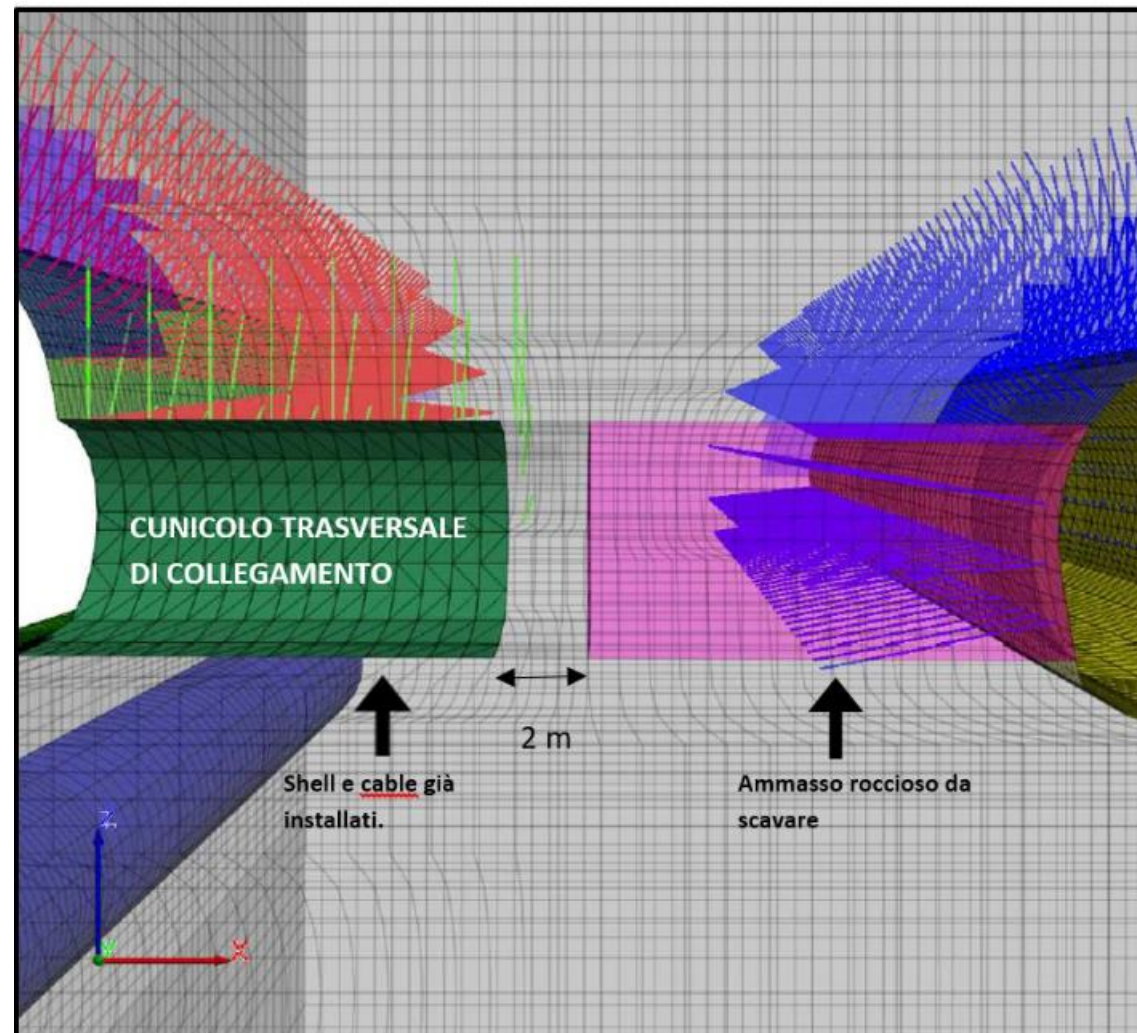
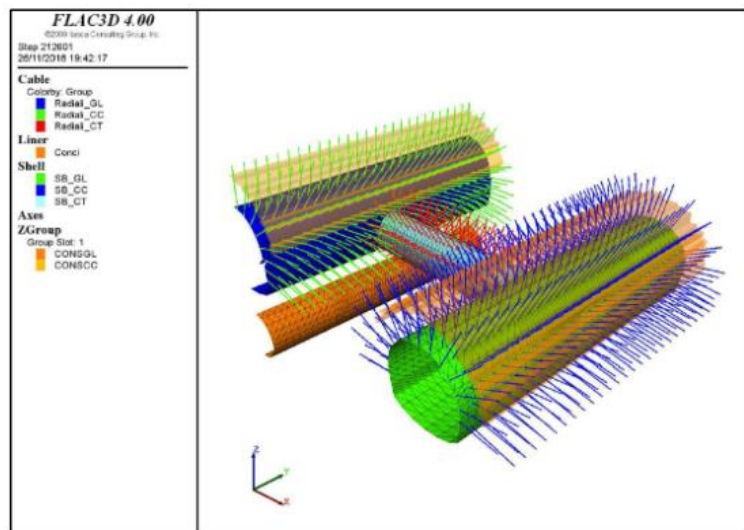
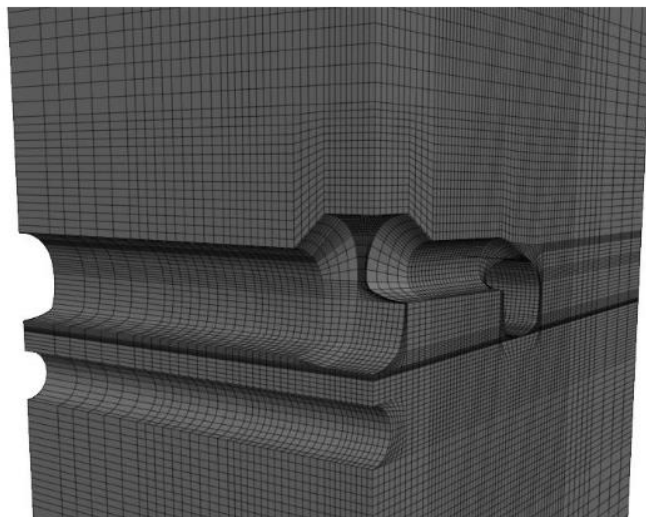


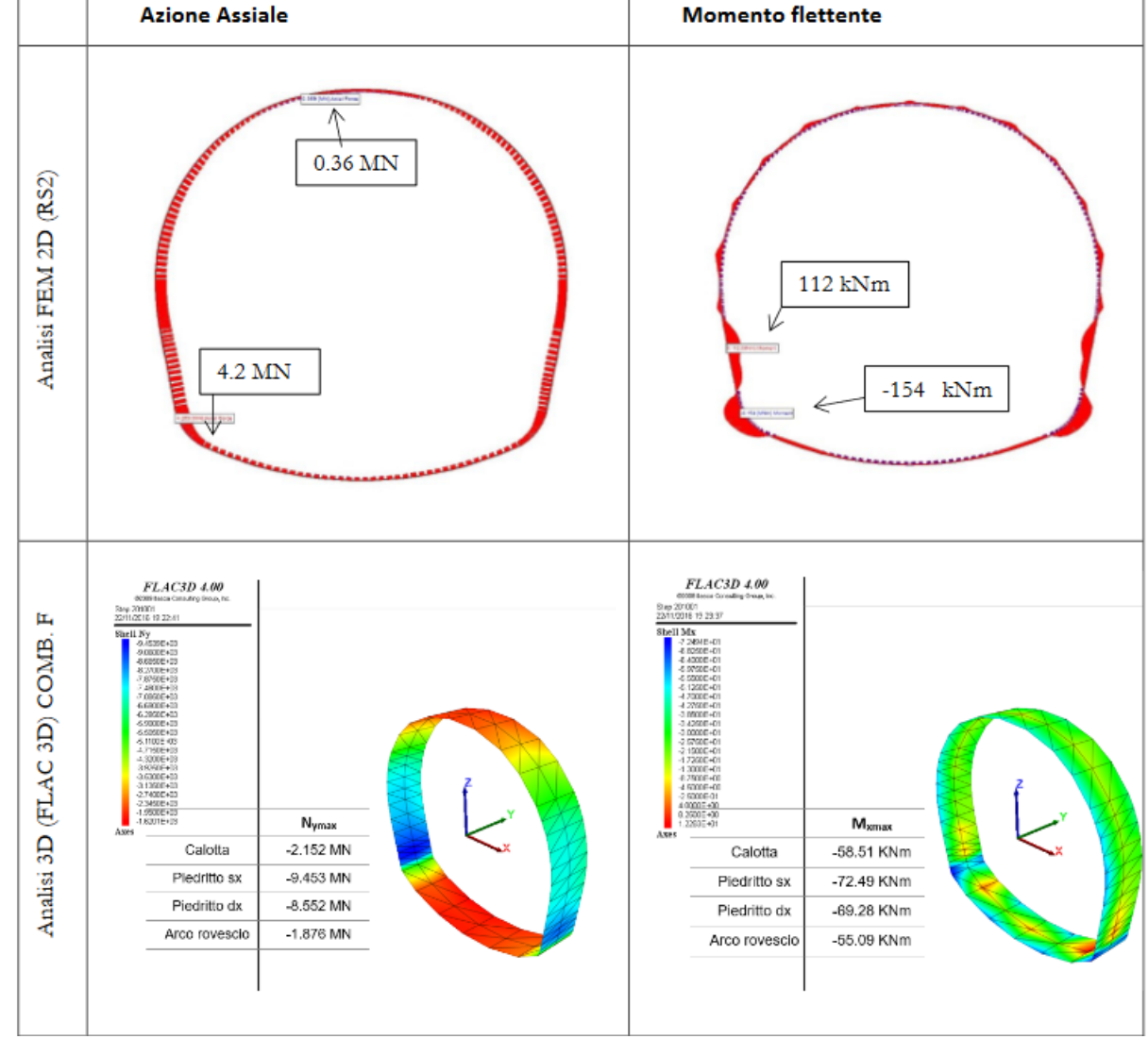
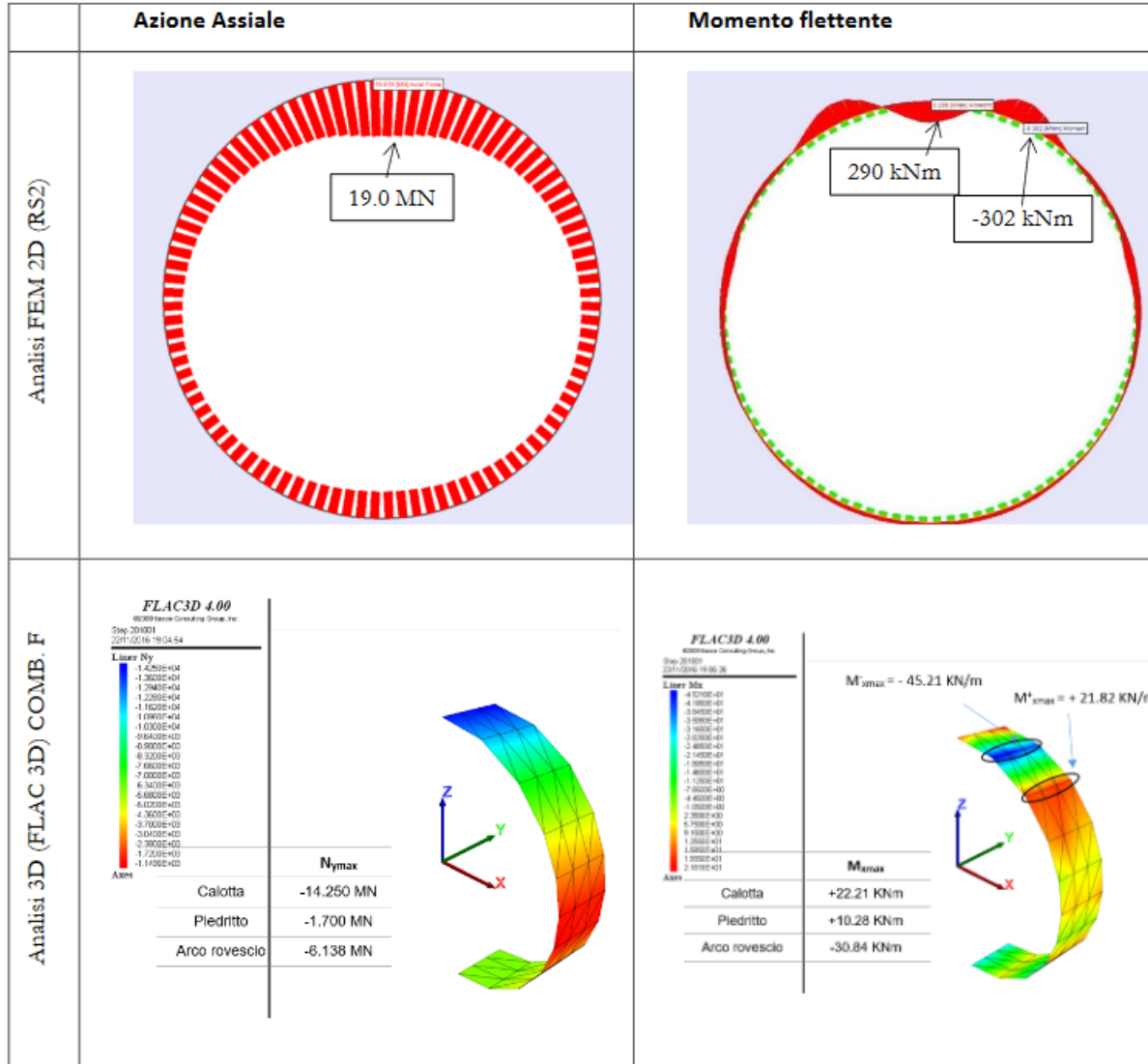
SIMULAZIONE «Step by step»
dell'avanzamento degli scavi e
installazione dei sistemi di sostegno e
rinforzo (anche VTR al fronte o infilaggi
in avanzamento)



GEOMETRIE ESTREMAMENTE
COMPLESSE







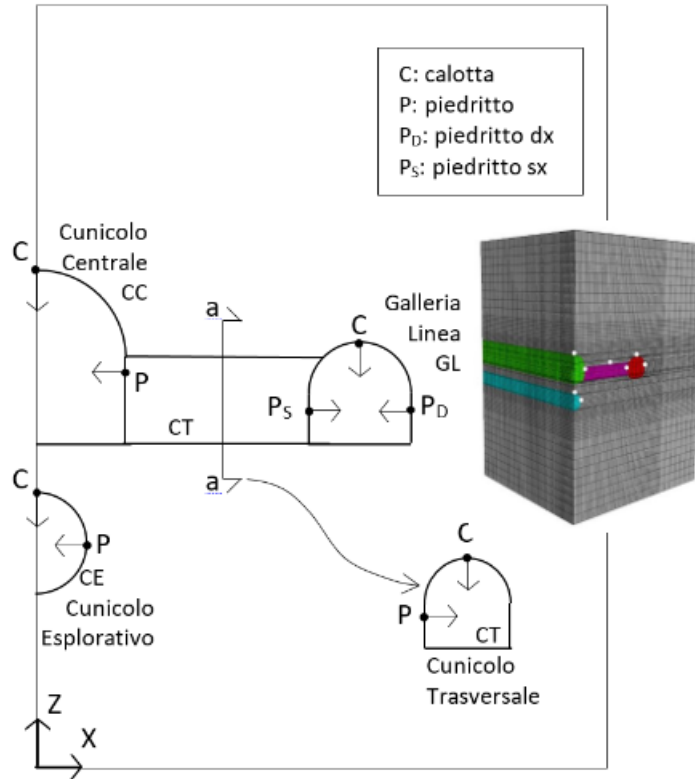


Figura 42. Schema rappresentativo dei punti analizzati per la ricostruzione delle curve di convergenza.

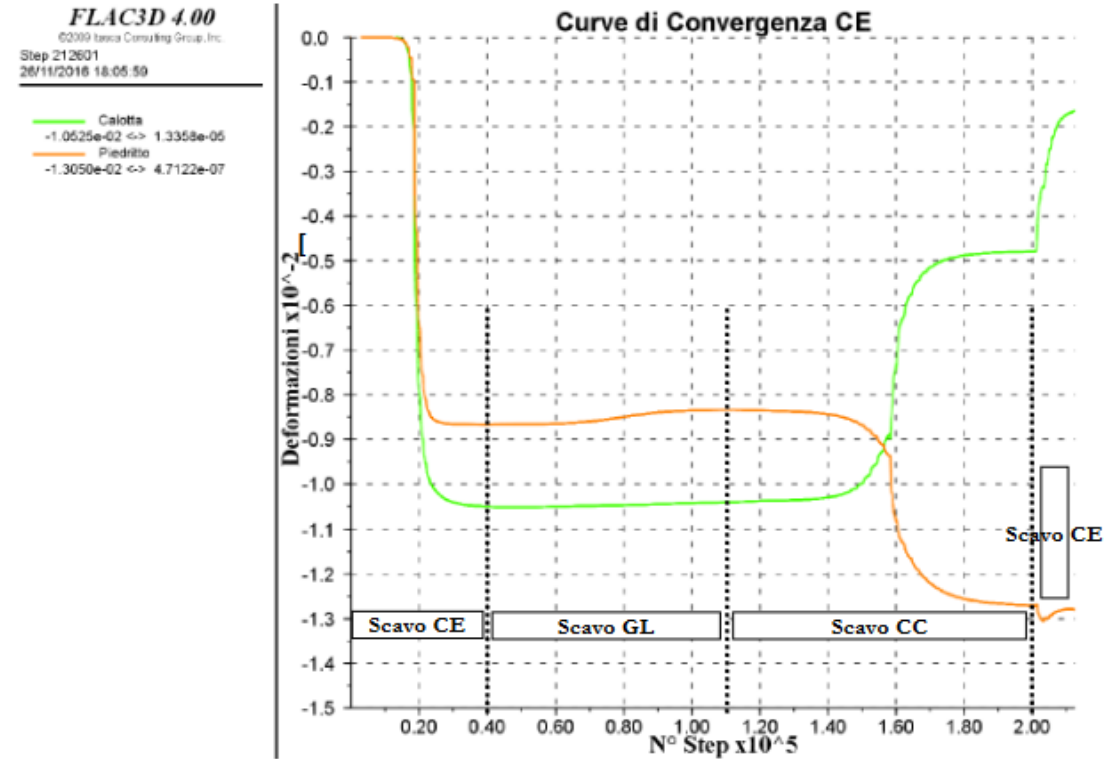


Figura 43. Andamento degli spostamenti di convergenza del Cunicolo Esplorativo nelle varie fasi di scavo.

La normativa vigente (EC7, NTC 2018) prevede che nei casi in cui, a causa della particolare complessità della situazione geotecnica e dell'importanza e impegno dell'opera, dopo estese ed approfondite indagini permangono documentate ragioni di incertezza risolvibili solo in fase costruttiva, la progettazione può essere basata sul METODO OSSERVAZIONALE.

FASE di PROGETTAZIONE

- Stabilire i **limiti di accettabilità** dei valori di alcune grandezza rappresentative del comportamento del complesso manufatto-terreno
- Dimostrare che la **soluzione prescelta è accettabile** in rapporto a tali limiti
- Prevedere **soluzioni alternative**, congruenti al progetto
- Istituire un adeguato **sistema di monitoraggio** in corso d'opera, con relativi piani di controllo, tale da consentire l'adozione di una delle soluzioni alternative previste, qualora i limiti indicati siano raggiunti.



Installazione di un'appropriata strumentazione e misura di grandezze fisiche significative (spostamenti, tensioni, forze e pressioni interstiziali) prima, durante e/o dopo la costruzione del manufatto.

Ha lo scopo di:

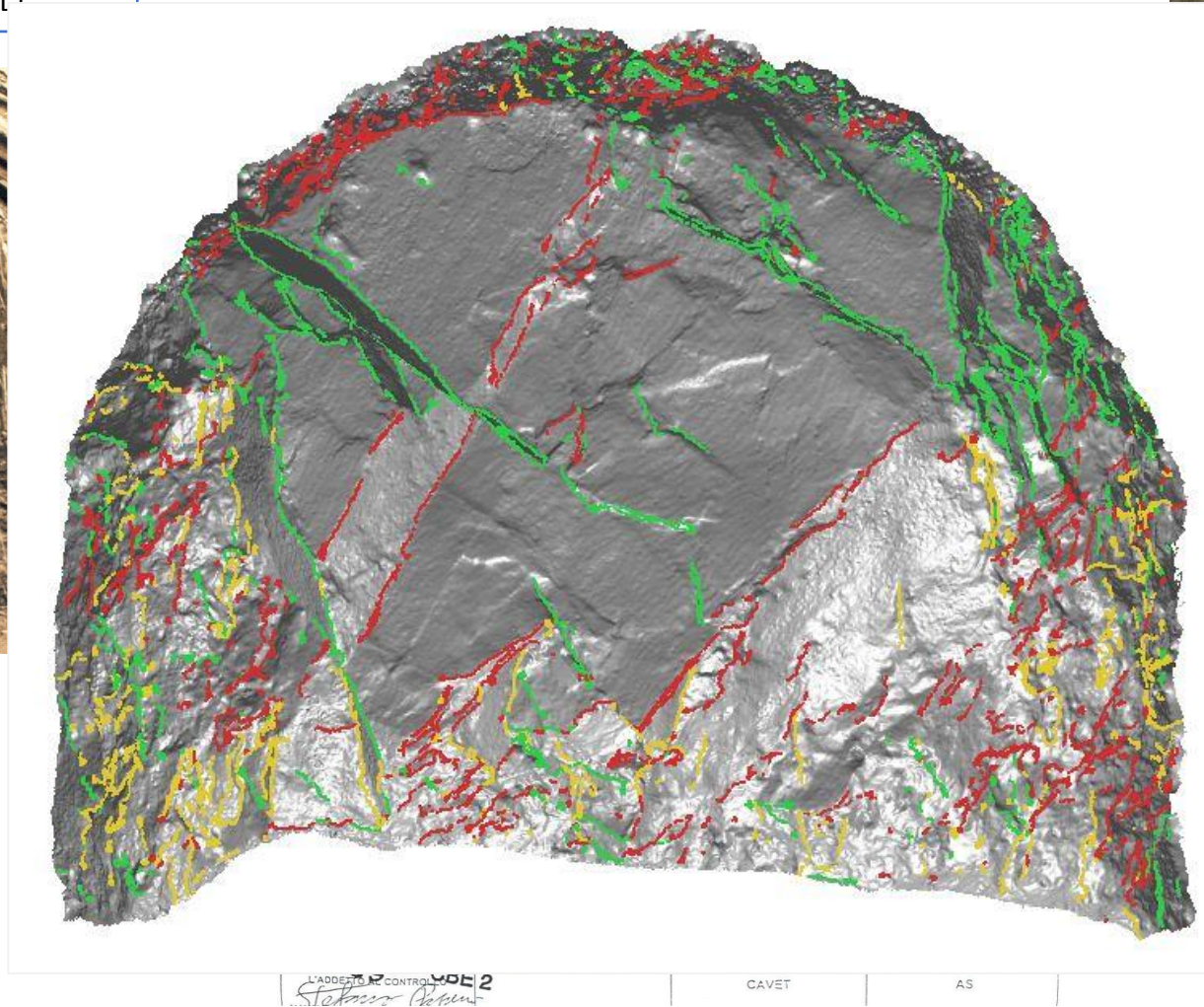
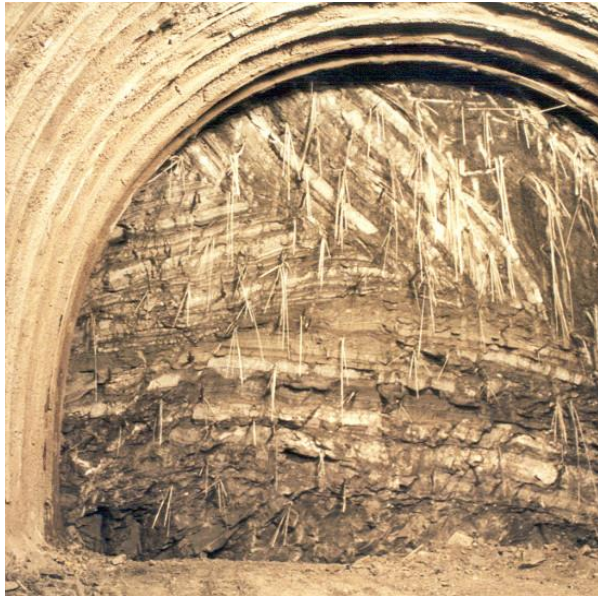
FASE di MONITORAGGIO

- **verificare** la corrispondenza tra le ipotesi progettuali e i comportamenti osservati e controllare la funzionalità dei manufatti nel tempo.
- **confermare** la validità della soluzione progettuale adottata o, in caso contrario, di individuare la più idonea tra le soluzioni previste in progetto.

Nel caso di progettazione basata sul “M.O.”, le analisi devono permettere la valutazione quantitativa del comportamento dell’opera nelle diverse fasi di scavo e costruzione, in modo da poter formulare previsione sui valori delle grandezze rappresentative del comportamento della cavità:

1. Rilievi Geo-strutturali del Fronte di scavo per valutare la variazione delle condizioni dell’ammasso roccioso scavato
2. Misure topografiche di SPOSTAMENTO: convergenza radiale delle pareti di scavo
Estrusione del fronte
Cedimenti indotti in superficie (nel caso di gallerie superficiali)
3. Misura degli spostamenti profondi (deformazioni radiali dell’ammasso a tergo del cavo, nel nucleo in avanzamento, inclinometri, ecc)
4. Misura dello stato tenso-deformativo del rivestimento di prima fase
5. Pressioni neutre a tergo del rivestimento definitivo
6. Misura dello stato tenso-deformativo del rivestimento definitivo
7. Misure di temperatura, Vibrazioni, presenza di gas, ecc.

RILIEVO GEOLOGICO STRUTTURALE



L'ADDEBITTO CONTROLLO VDE 2
Stokor Point

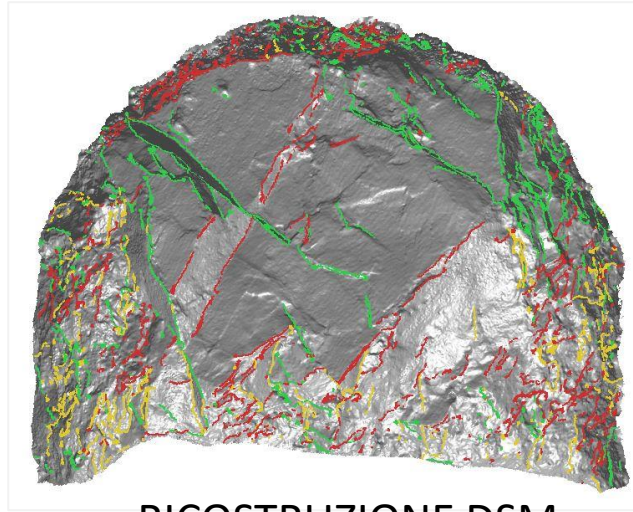
CAVET

AS

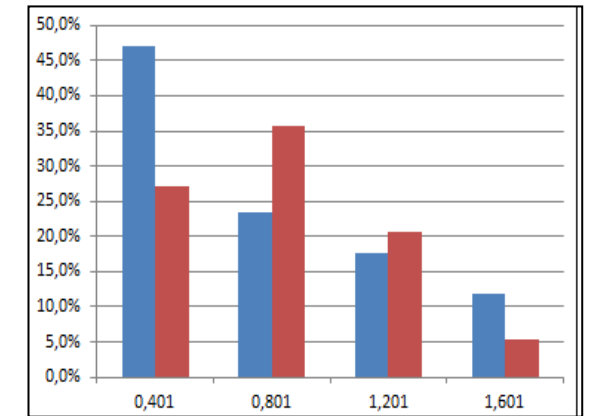
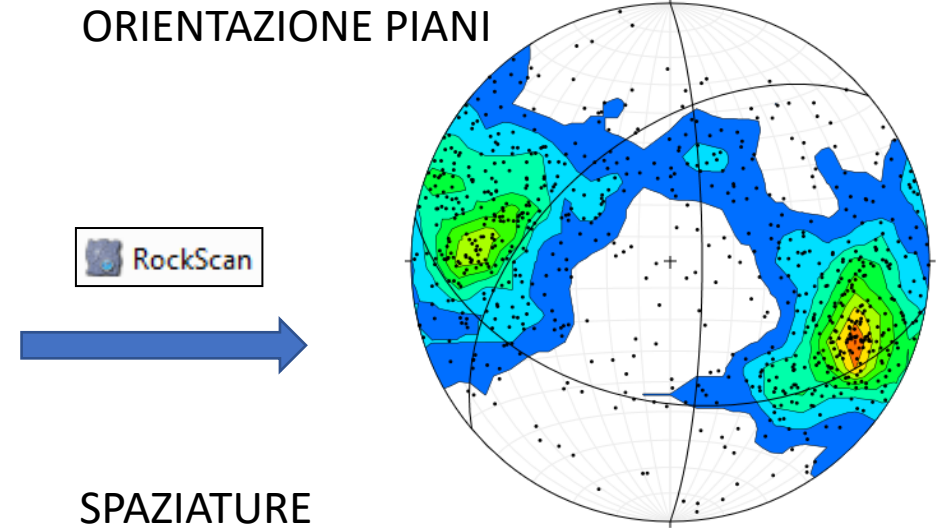
RILIEVO GEOLOGICO STRUTTURALE – APPLICAZIONE dei RILIEVI NON-CONTATTO



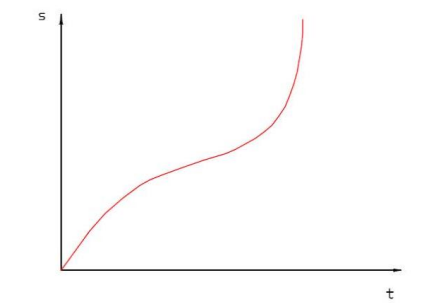
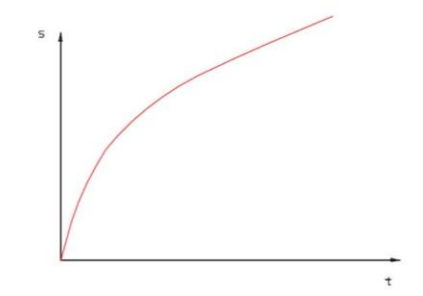
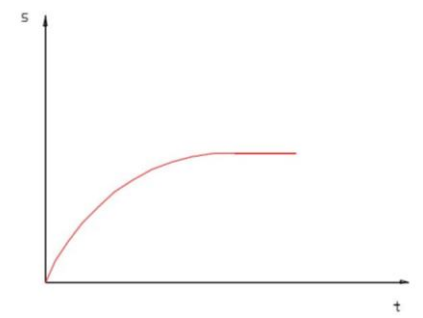
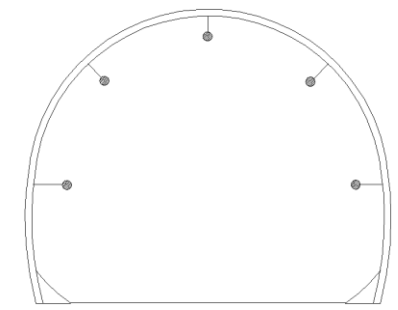
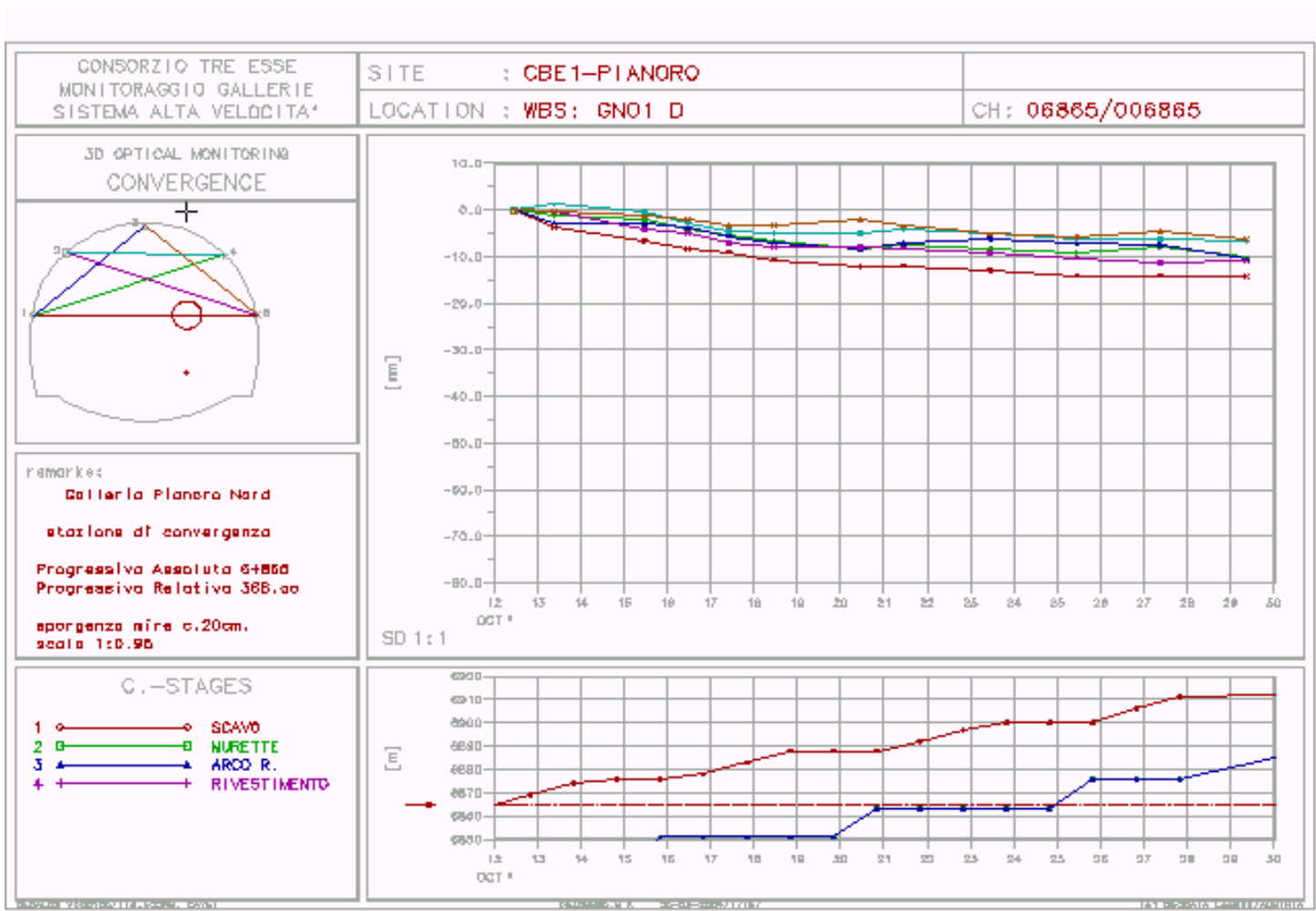
Immagini digitali



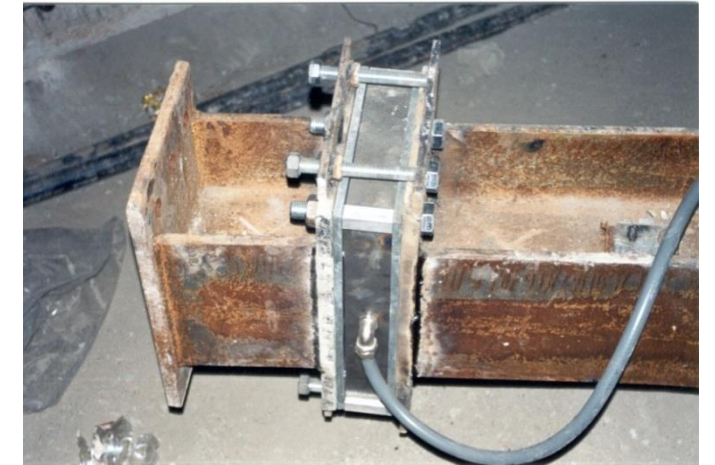
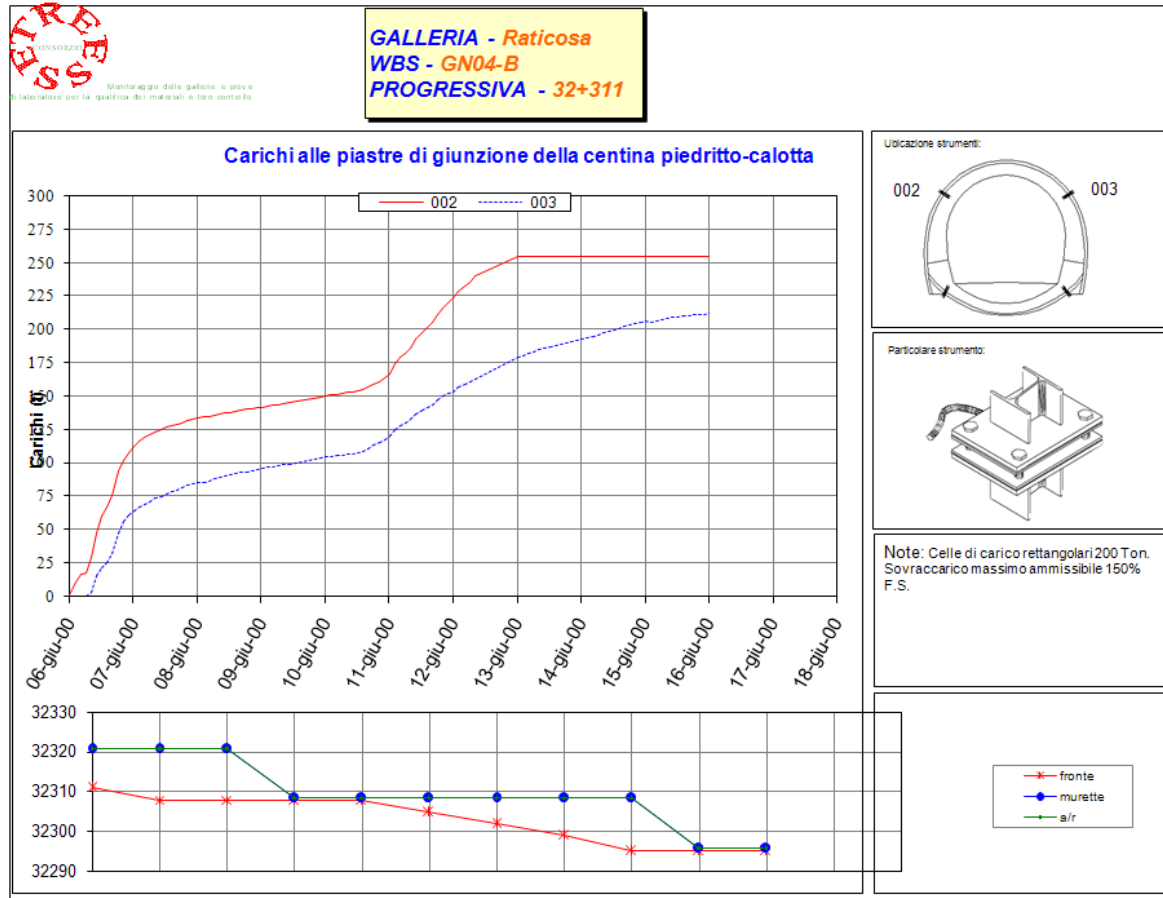
RICOSTRUZIONE DSM



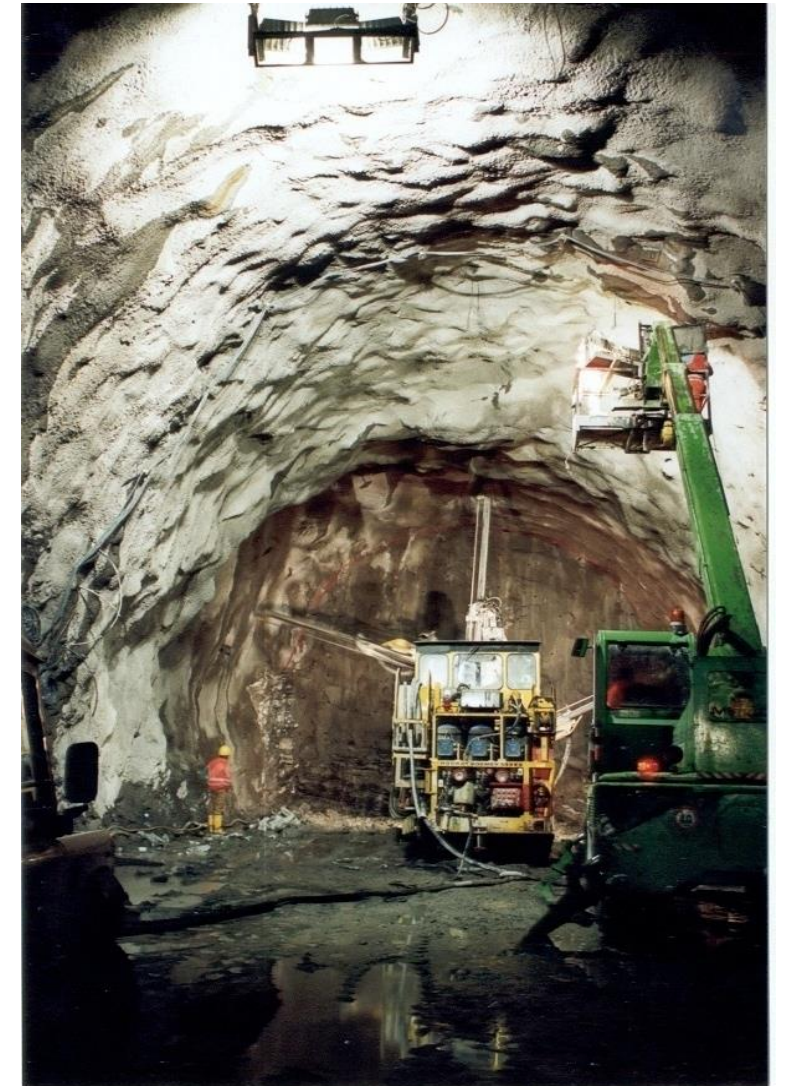
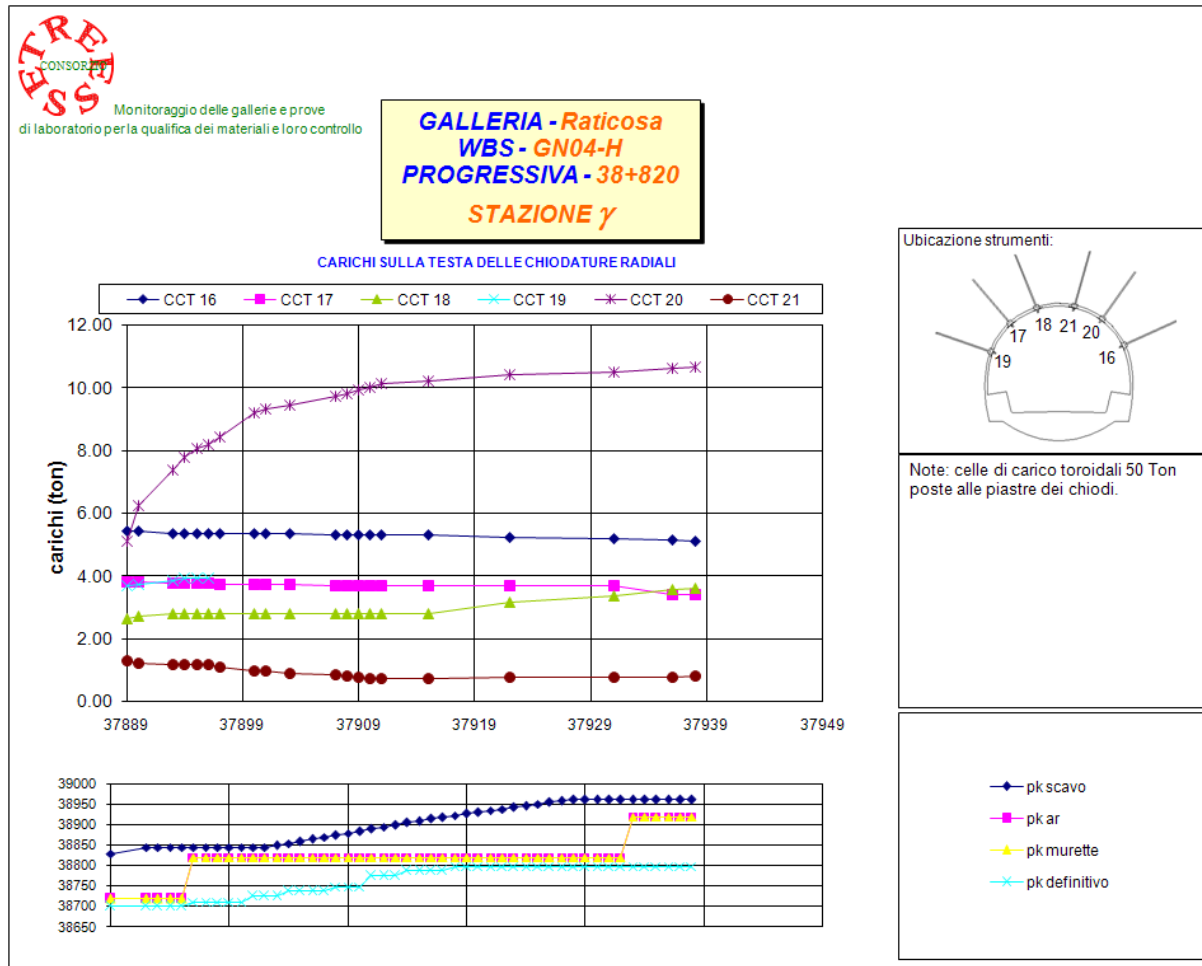
MISURE di CONVERGENZA con BASI OTTICHE



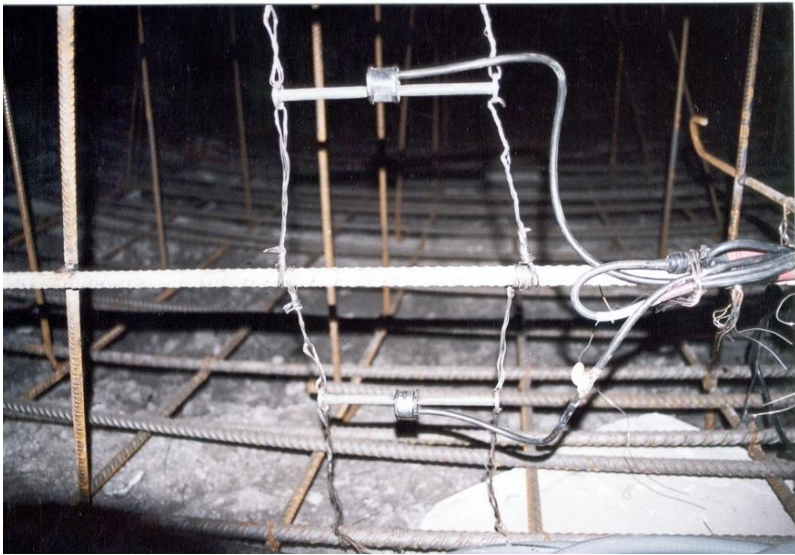
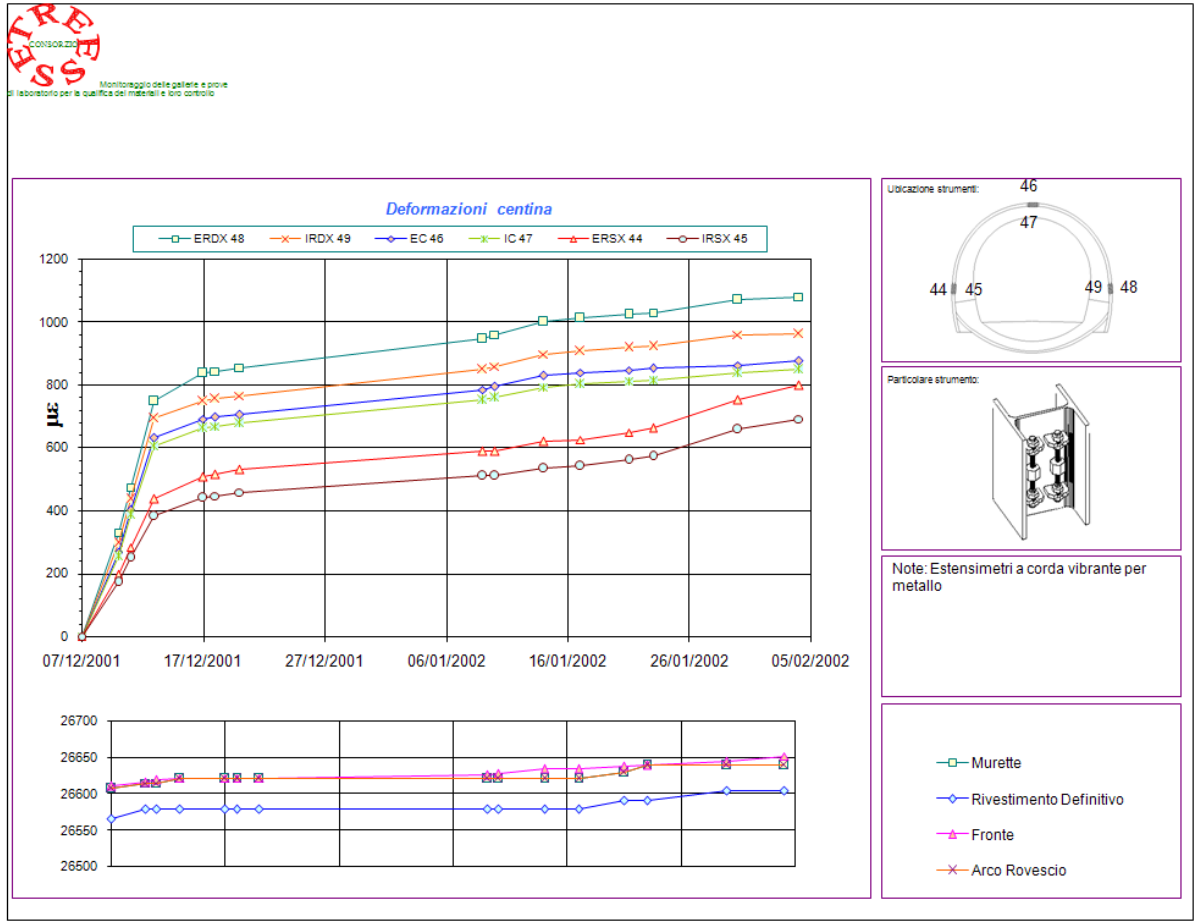
CELLE di CARICO su CENTINE



CELLE di CARICO CHIODI



ESTENSIMETRI a CORDA VIBRANTE CENTINE o RIVESTIMENTI DEFINITIVI





SCUOLA di DOTTORATO
GAETA 2 – 4 Settembre 2024



CONSOLIDAMENTO di TERRENI e ROCCE



GRAZIE

M.Rita Migliazza



Politecnico
di Torino

