

Scuola di dottorato GNIG in Ingegneria Geotecnica 2024

Gaeta, 4-6 settembre 2024

# Dimensionamento di interventi di consolidamento in scavi sotterranei

Prof. Andrea Segalini

Dipartimento di Ingegneria e Architettura

Università di Parma

Lo scavo di una galleria provoca variazioni nell'equilibrio statico dell'ammasso roccioso che potrebbero generare zone di rottura e/o plasticizzazione non accettabili per mantenere condizioni di sicurezza in fase di scavo e/o di esercizio della galleria.

Spesso le operazioni di scavo sono accompagnate da interventi di sostegno o rinforzo eseguiti per migliorare le condizioni di stabilità del cavo e per favorire la capacità di autoportanza della roccia nelle zone al contorno dello scavo.



### ELEMENTI di RINFORZO

elementi utilizzati per mobilitare e preservare la resistenza propria della massa rocciosa in modo che si autosostenga

### ELEMENTI di SOSTEGNO

la massa rocciosa è sostenuta da elementi strutturali che portano, interamente o in parte, il peso dei blocchi isolati o da discontinuità o di porzioni di roccia rilasciate.

### ELEMENTI PROVVISORI

installati per garantire le condizioni di sicurezza nelle fasi di lavoro



### ELEMENTI PERMANENTI

Installati quando gli scavi devono rimanere aperti per lunghi periodi di tempo o in via definitiva














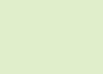
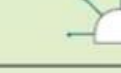







### ELEMENTI ATTIVI

se agiscono con un carico predeterminato sulla superficie della roccia fin dalla loro installazione



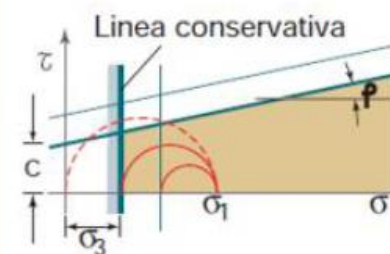
### ELEMENTI PASSIVI

agiscono sulla roccia solo quando la massa rocciosa si deforma.

Azione sulla cavità	Strumenti di stabilizzazione		Interventi agenti su		Acqua in pressione		
			$c, \varphi$	$\sigma_3$			
Precontenimento	Consolidamento del terreno a monte del fronte	Iniezioni tradizionali (●)			●	●	●
		Congelamento (●)			●	●	●
		Jet-grouting sub-orizzontale (●)			●	●	●
		Pretaglio meccanico (●)			●	●	●
		Drenaggi (●)			●	●	●
Contenimento	Consolidam. radiale	Rinforzo del terreno al contorno della cavità e del nucleo mediante elementi strutturali di vetroresina (●)			●	●	●
		Spritz-beton (●)			●	●	●
		Bullonatura ad aderenza continua (●)			●	●	●
		Bullonatura ad ancoraggio punt. (●)			●	●	●
Presost.	Infilaggi	Arco rovescio (●)			●	●	●
		Scudi aperti o lance			●	●	●



Legenda:  
 (●) = Strumento strutturale  
 $\sigma_3$  = Pressione di contenimento  
 $c$  = Coesione del terreno  
 $\varphi$  = Angolo d'attrito del terreno



## TIPOLOGIE DI INTERVENTO

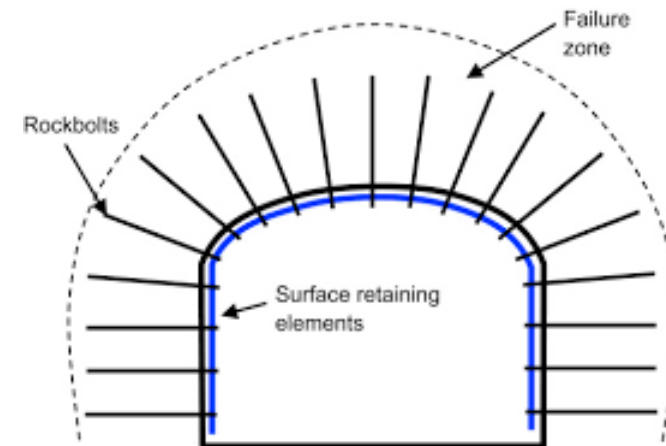
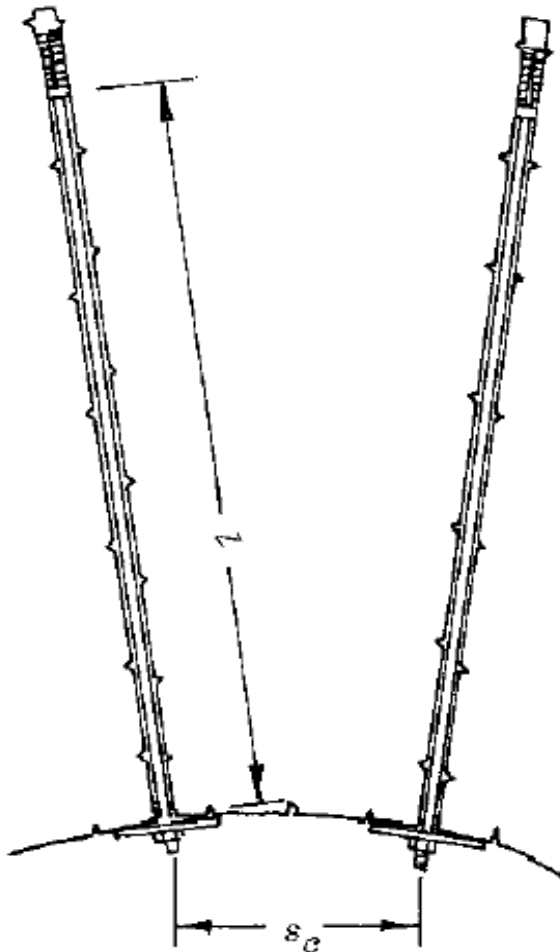
- Interventi di **precontenimento**, se agiscono a monte del fronte di avanzamento, e realizzano o facilitano la formazione di un effetto arco artificiale in avanzamento, con funzione strutturale e protettiva;
- Interventi di **contenimento**, se agiscono a valle del fronte di scavo ed hanno la funzione di contrastare i fenomeni deformativi che si sviluppano dopo il passaggio del fronte;
- Interventi di **presostegno**, se agiscono a monte del fronte di scavo ma, a differenza degli interventi di precontenimento, non contribuiscono alla formazione dell'effetto arco in avanzamento.

## Bulloni o Tiranti

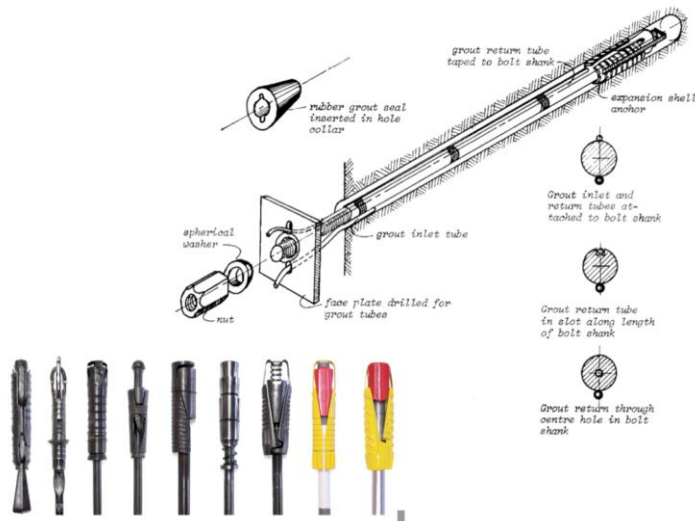
Sono elementi puntuali che vengono introdotti in fori precostituiti nell'ammasso roccioso ed ad esso solidalmente ancorati in maniera puntuale o per l'intera lunghezza.

Vengono classicamente posizionati nella zona di calotta e nelle parti sommitali dei fianchi.

L'ancoraggio, che può essere di tipo meccanico o realizzato con malte cementizie e/o resine, può riguardare l'intera lunghezza della barra (che in tal modo lavora con sollecitazioni composte di taglio-trazione) o solo la parte terminata (trazione)

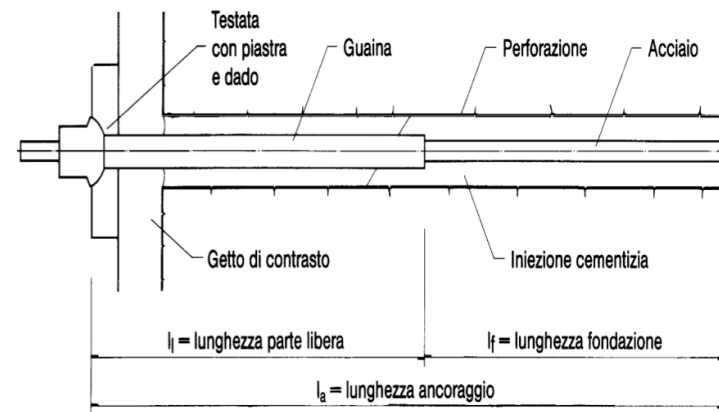


## Bulloni o Tiranti



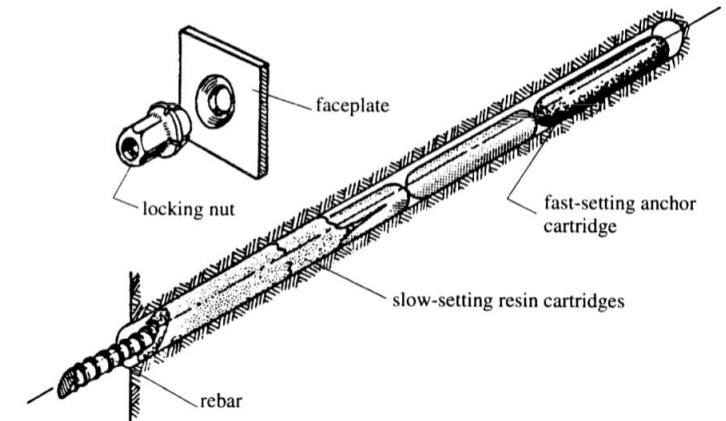
Bullone con ancoraggio meccanico

- 1) Perforazione;
- 2) Infilaggio della barra;
- 3) Tesaggio della barra;
- 4) Conchiglia di espansione aderisce al foro (resistenza meccanica);
- 5) Cementazione per evitare erosione;



Bulloni ad ancoraggio puntuale con miscele cementizie

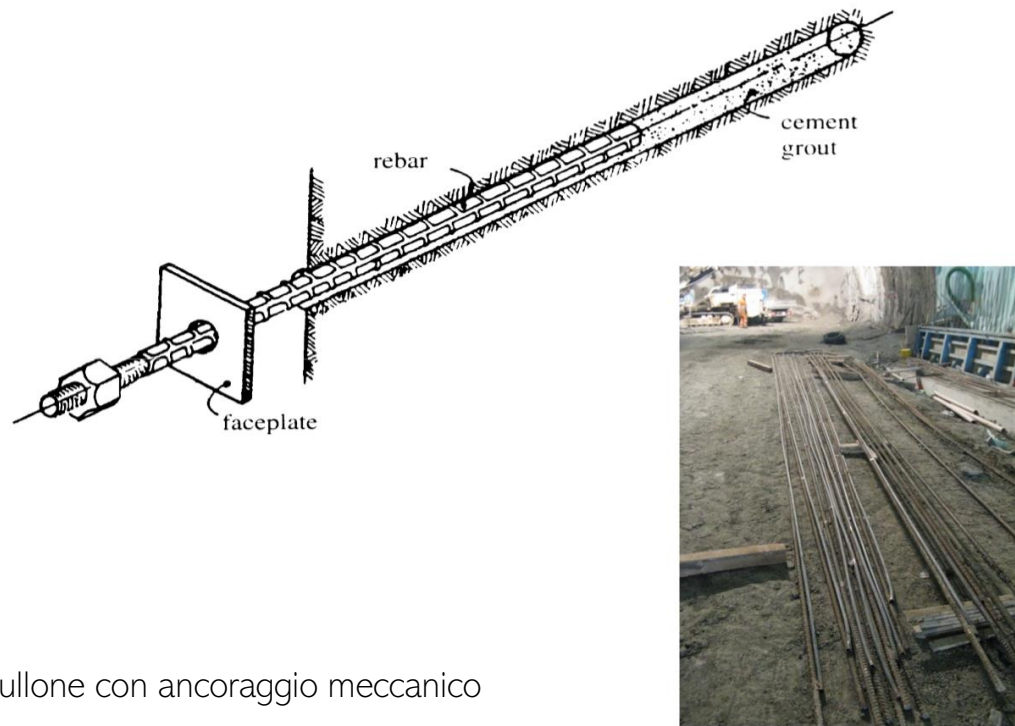
- 1) Perforazione;
- 2) Infilaggio della barra;
- 3) Iniezione miscele cementizie;
- 3) Tesaggio della barra a seguito della presa del cemento;



Bulloni ad ancoraggio puntuale con resine

- 1) Perforazione;
- 2) Infilaggio cartucce resina;
- 3) Inserimento barra appuntita;
- 4) Apertura cartucce, attivazione reagenti e presa resina
- 5) Tesaggio della barra.

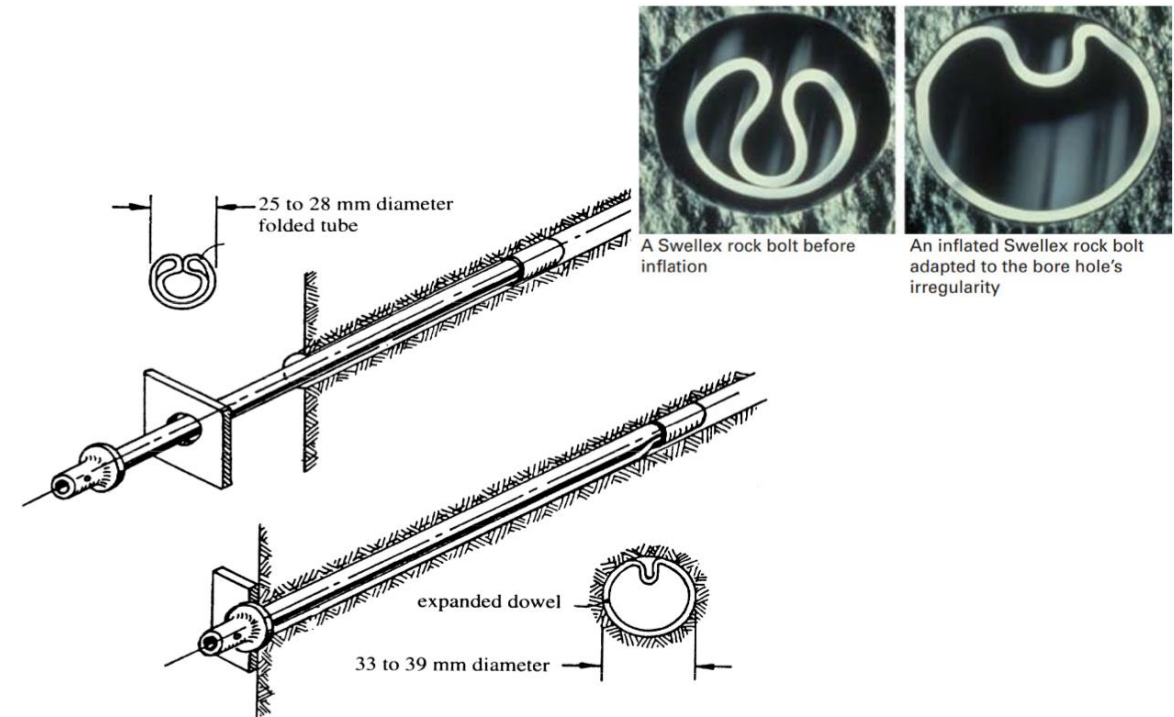
## Chiodi cementati



## Bullone con ancoraggio meccanico

- 1) Perforazione;
- 2) Riempimento foro con cemento;
- 3) Inserimento chiodi.

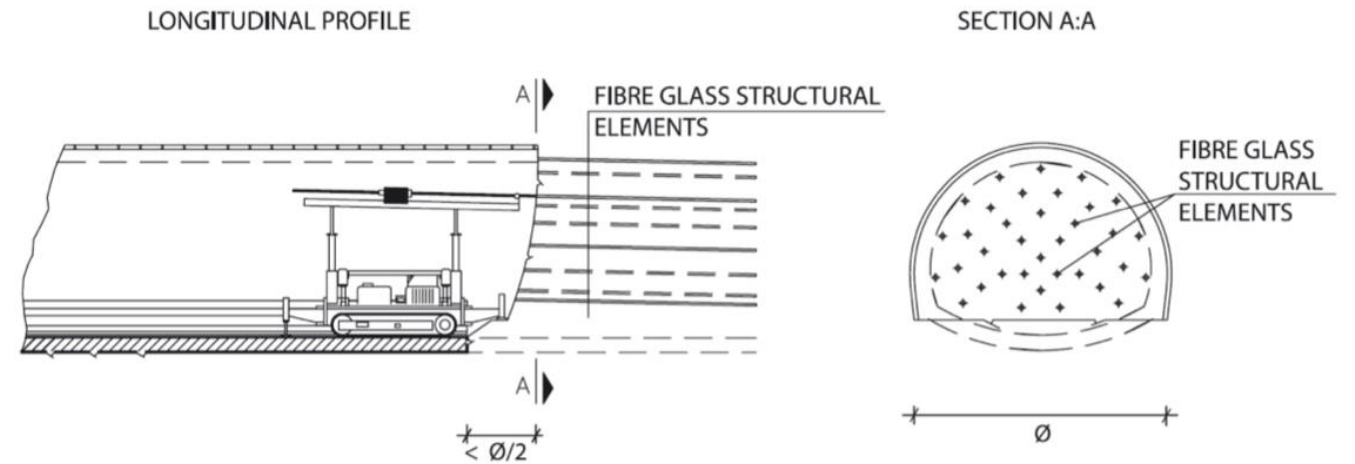
## Chiodi ad attrito swellex



## Chiodi ad attrito swellex

- 1) Perforazione;
- 2) Inserimento chiodi
- 3) Pompaggio acqua ad alta pressione
- 4) Aumento diametro e adesione chiodo alla roccia.

## Barre in vetroresina VTR



### Barre VTR

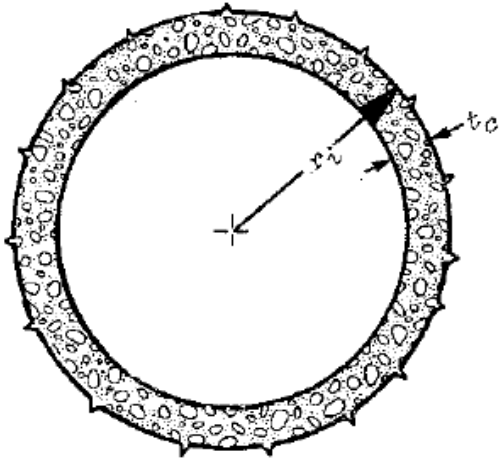
- 1) Perforazione;
- 2) Inserimento barra in VTR;;
- 3) Cementazioen attraverso il foro centrale.

Buona Resistenza a Trazione

Scarsa Resistenza a Taglio

Facilmente scavabili.





## Anello di calcestruzzo

Se rappresenta un sostegno provvisorio è realizzato con **cls proiettato** (spritz-beton o shotcrete), eventualmente rinforzato con fibre d'acciaio (o metalliche) o, eventualmente con rete elettrosaldata. Ha spessori da 5-35 cm.

Se rappresenta un sostegno definitivo, è **gettato in opera** o costituito da **elementi prefabbricati** (nel caso di gallerie circolari realizzate con fresa) e realizzato con cls eventualmente armato. **Nel caso di getti in opera** Ha spessori che raggiungono anche 50-60 cm **ed anche oltre**.

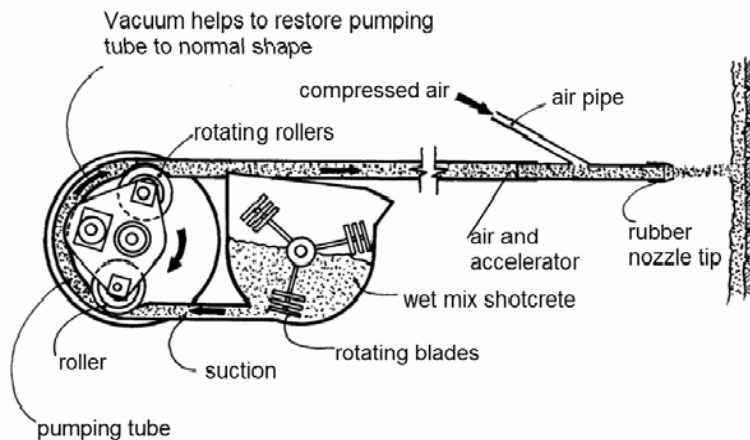
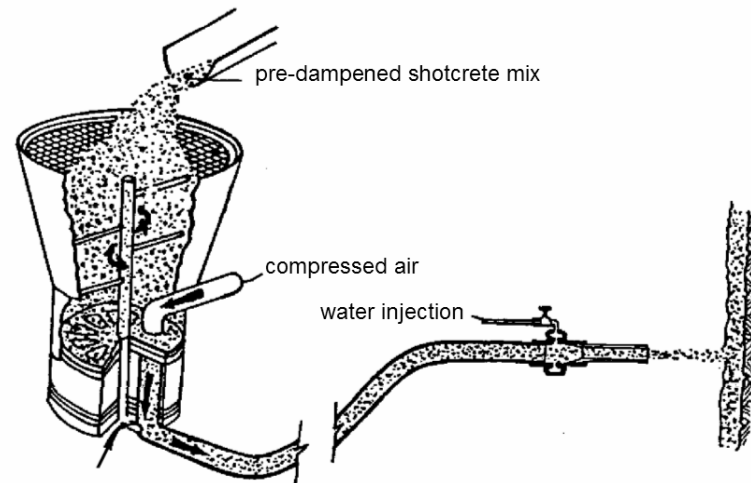


## Calcestruzzo proiettato (spritz beton)

La tecnologia del calcestruzzo proiettato o calcestruzzo spruzzato consiste nello spruzzo, mediante una lancia ad aria compressa, di una miscela cementizia additivata con prodotti acceleranti di presa. Questi ultimi consentono l'aggrappo istantaneo del conglomerato nel momento in cui raggiunge la superficie di applicazione garantendo una massa compatta e omogenea.

È costituito da una miscela di cemento, sabbia, aggregati fini applicato con pompe a pressione direttamente sulle parete rocciosa, preventivamente attrezzata con la posa di reti a maglia larga opportunamente fissate che servono per aggrappare la miscela.

Può essere rinforzato con fibre metalliche o di vetroresina che ne aumentano la resistenza e ne diminuiscono la fessurazione



## Rivestimento Definitivo



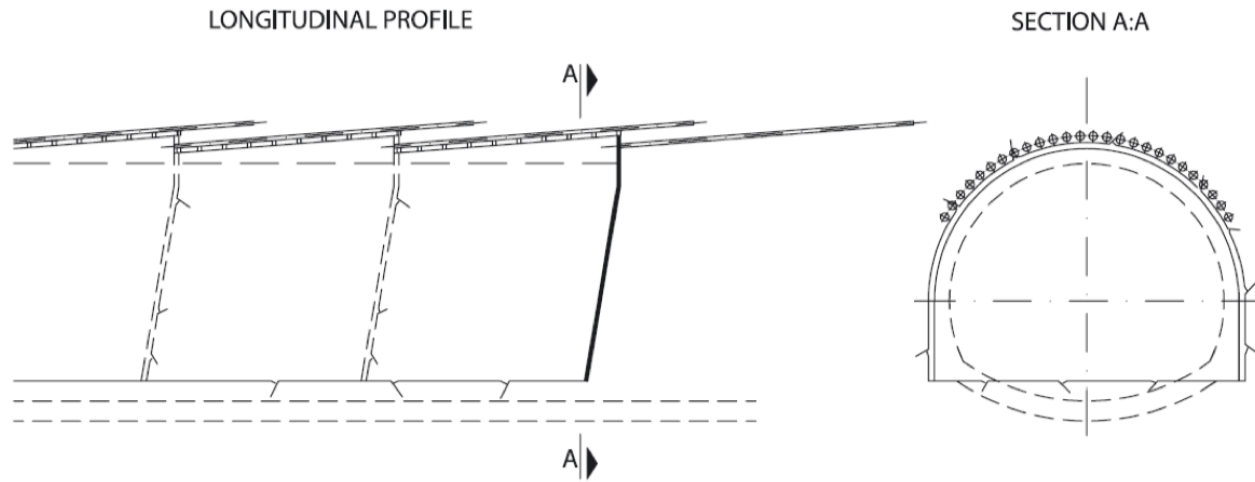
## Rivestimento Definitivo



## Rivestimento Definitivo - Impermeabilizzazione



## Elementi di pre-sostegno - Infilaggi in avanzamento

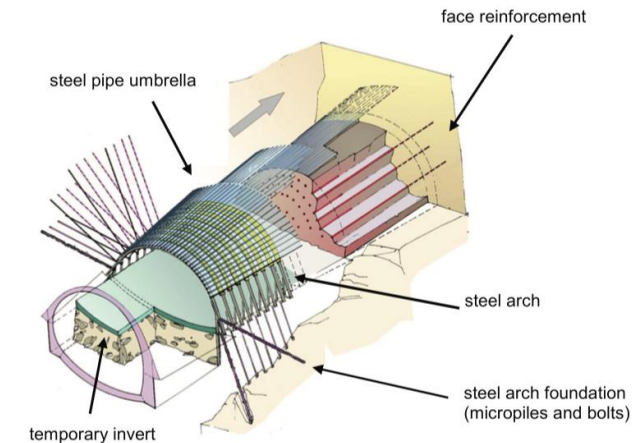
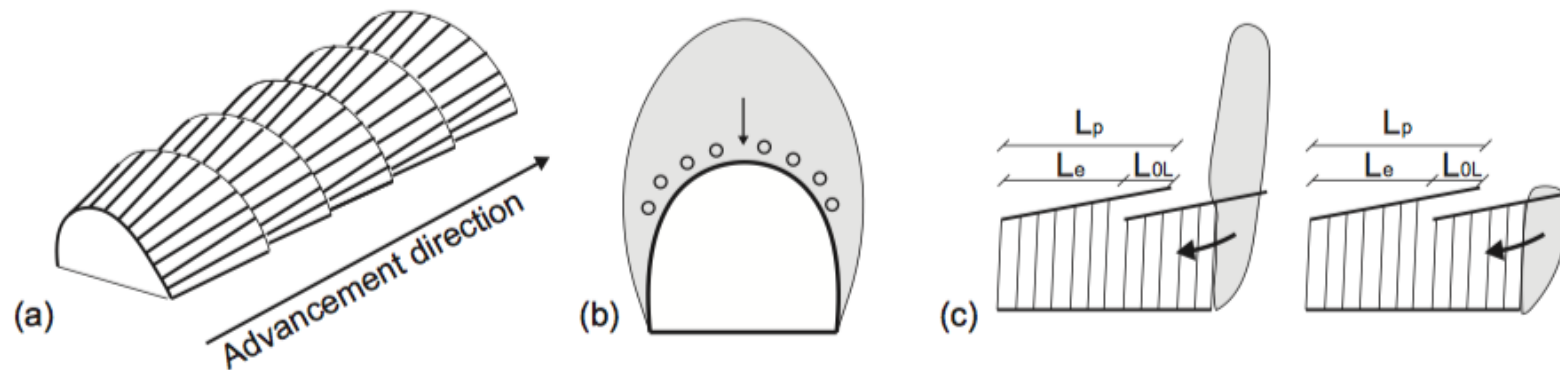


Ombrello protettivo costituito da tubi in acciaio installati lungo lo sviluppo perimetrale della galleria e cementati

Sezione troncoconica

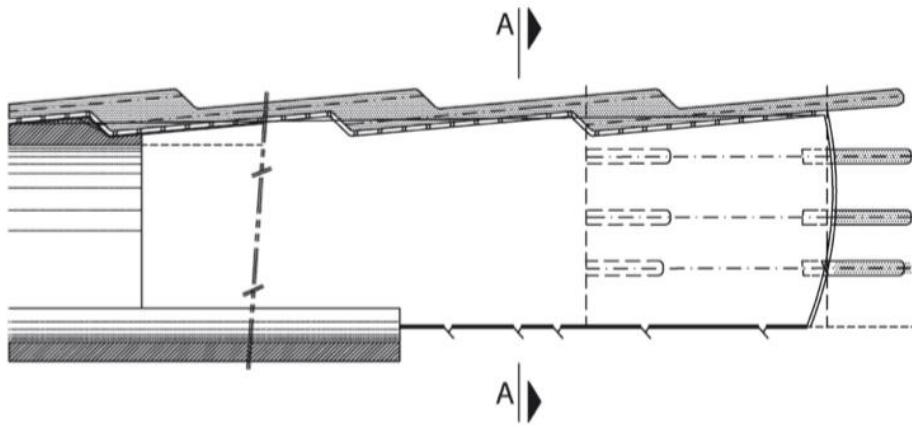
Zona sovrapposizione  $LOL > 0.4D$

Ogni tubo agisce come se fosse una trave

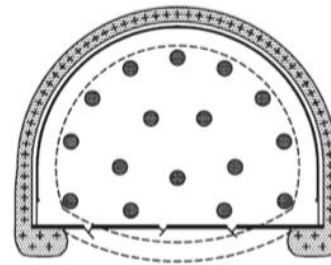


## Elementi di pre-sostegno – ombrello di jet-grouting

LONGITUDINAL PROFILE



SECTION A:A



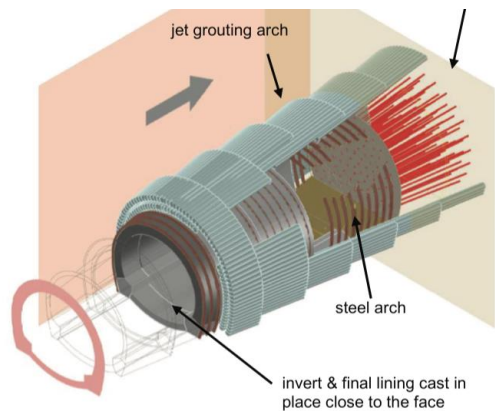
Struttura di colonne di jet-grouting sub-orizzontali.

L'arco sostiene il terreno durante lo scavo riducendo la preconvergenza.

Nelle gallerie poco profonde, l'arco può essere ottenuto con uno schema di colonne sub-verticali.

Spesso, l'arco di jet grouting è combinato con colonne sub-orizzontali o con tubi o barre in fibra di vetro installati sul fronte della galleria per stabilizzarlo.

Le colonne di jet grouting possono essere rinforzate con elementi strutturali come tubi o barre di acciaio.



## Centine metalliche

Sono elementi strutturali costituiti da profilati in acciaio semplici od accoppiati a seconda delle necessità di carico e deformazione. Assumono la forma della galleria e vengono posizionati ad interasse variabili (0.5-2 m) a seconda delle necessità. Hanno la funzione di sostenere le pareti dello scavo, contrastando le pressioni esercitate dal terreno circostante. Questo è particolarmente importante in terreni instabili o in presenza di acqua, dove il rischio di crollo è maggiore.

Le centine vengono assemblate in loco, pezzo per pezzo, e posizionate lungo l'asse dello scavo. Ogni centina è costituita da elementi modulari che possono essere rapidamente montati e smontati.

Sono utilizzate come supporto temporaneo fino a quando non viene realizzato il rivestimento definitivo del tunnel, che può essere in calcestruzzo spruzzato, conci prefabbricati o altro materiale resistente.



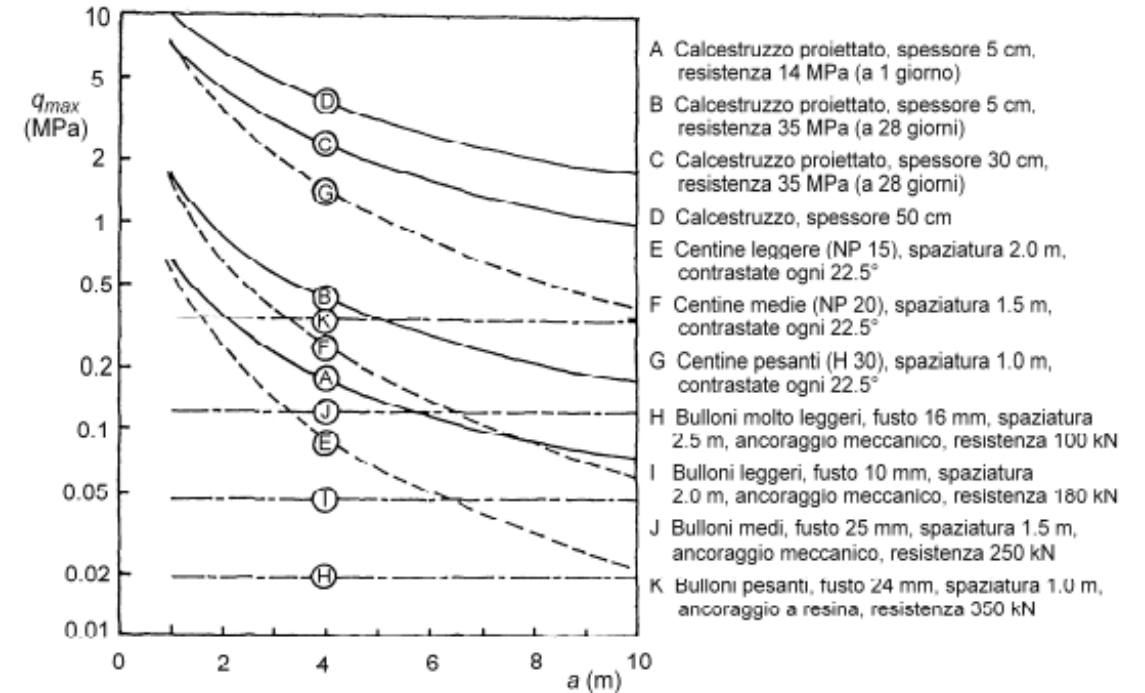
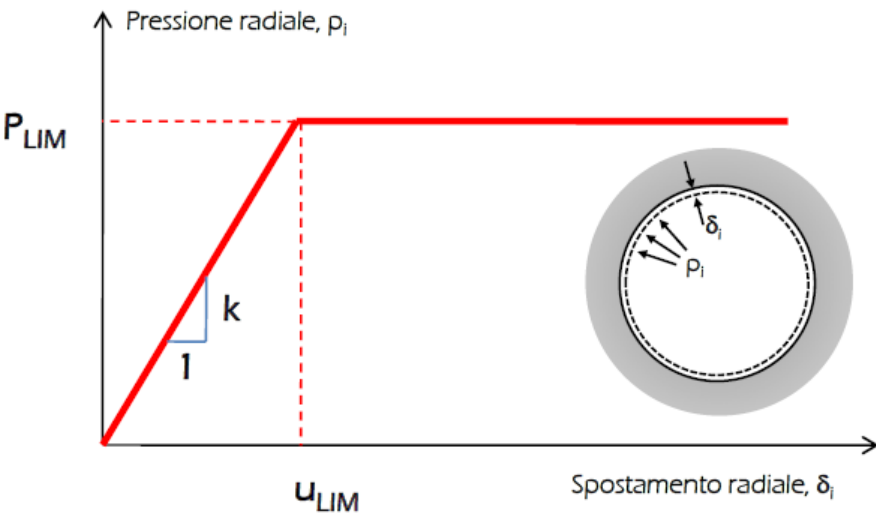


## Curva caratteristica del rivestimento

Le linee caratteristiche del rivestimento sono generalmente schematizzate come due rette.

Il primo segmento ha una pendenza pari alla **rigidezza del rivestimento  $k$** , fino a raggiungere la **pressione massima  $P_{lim}$**  corrispondente al **limite di spostamento radiale  $u_{lim}$** .

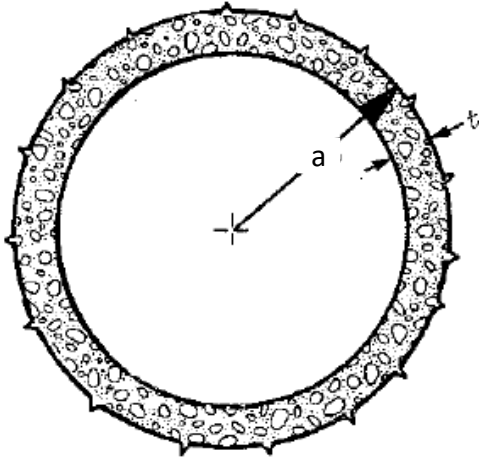
Il supporto è considerato con un comportamento plastico ideale.



$P_{lim}$ ,  $u_{lim}$  e  $k$  dipendono dalle dimensioni e dalla tipologia del supporto.

È importante conoscere le proprietà meccaniche e di deformazione e lo schema di installazione di ciascun supporto per definire la capacità di confinamento.

## Curva caratteristica del rivestimento – ANELLO CONTINUO DI CALCESTRUZZO



$$k_s = \frac{E_c}{1 + \nu_c} \frac{t}{a} \frac{1 - t/2a}{1 - \nu_c - t/a(1 - t/2a)}$$

Nell'ipotesi di «rivestimento sottile»  $k_s = E_c \frac{t}{a}$

### rivestimento in calcestruzzo

$$t = 0.50 \text{ m}$$

$$E_c = 25 \text{ GPa}$$

$$a = 5 \text{ m}$$

$$k_s = 2500 \text{ MPa}$$

### rivestimento in calcestruzzo proiettato

$$t = 0.25 \text{ m,}$$

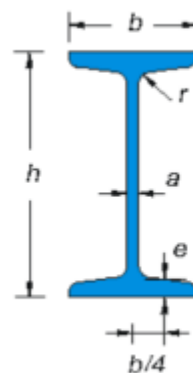
$$E_c = 5 \text{ GPa,}$$

$$a = 5 \text{ m}$$

$$k_s = 250 \text{ MPa}$$

## Curva caratteristica del rivestimento – CENTINE

Tipicamente profilati a **I** ad ala normale (IPE o IPN) o ad ala larga (HE ed analoghi); spesso si adottano due centine accoppiate collegate tra loro con piastre per aumentare la resistenza a momenti torcenti fuori dal piano della sezione



h mm	b mm	a mm	e mm	r mm	Peso kg/m	Sezione cm <sup>2</sup>	Mome
							Jx cm <sup>4</sup>
80	42	3,9	5,9	3,9	5,94	7,57	77,7
100	50	4,5	6,8	4,5	8,34	10,6	170
120	58	5,1	7,7	5,1	11,1	14,2	328
140	66	5,7	8,6	5,7	14,3	18,3	573
160	74	6,3	9,5	6,3	17,9	22,8	935
180	82	6,9	10,4	6,9	21,9	27,9	1.450

$$k_s = \frac{E_s A_s}{s_l a}$$

Rigidezza equivalente per unità di lunghezza nella direzione dell'asse galleria  
( $s_l$  = passo di installazione,  $A_s$  = area della sezione della centina,  $a$  = diametro della galleria)

2 IPN180 accoppiate,

$$s_l = 1.5 \text{ m}$$

$$a = 5 \text{ m}$$

$$E_s = 210 \text{ Gpa}$$

$$A_s = 27.9 \text{ cm}^2$$

$$k_s = 156 \text{ MPa}$$

## Curva caratteristica del rivestimento – BULLONI AD ANCORAGGIO PUNTUALE

- Relazione tra carico  $Q$  e spostamento  $u$ 

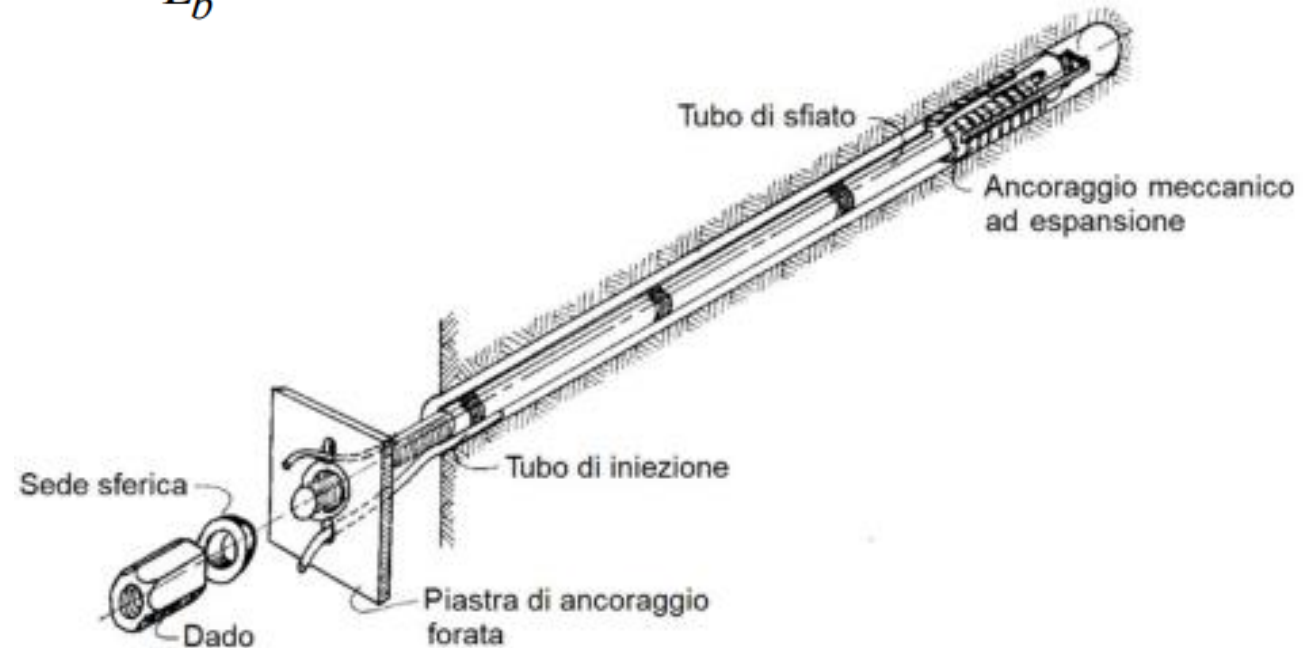
$$Q = \frac{E_s A_b \Delta L_b}{L_b} = \frac{E_s A_b}{L_b} (u - u_b)$$

$A_b$  = sezione del bullone,  $L_b$  = lunghezza libera del bullone,  
 $u$  = spostamento della testa,  $u_b$  = spostamento del punto di ancoraggio

- Pressione ripartita  $q$ 

$$q = \frac{Q}{s_c s_l}$$

$s_c$  = spaziatura lungo il perimetro della galleria,  
 $s_l$  = spaziatura nella direzione dell'asse della galleria



## Curva caratteristica del rivestimento – BULLONI AD ANCORAGGIO PUNTUALE

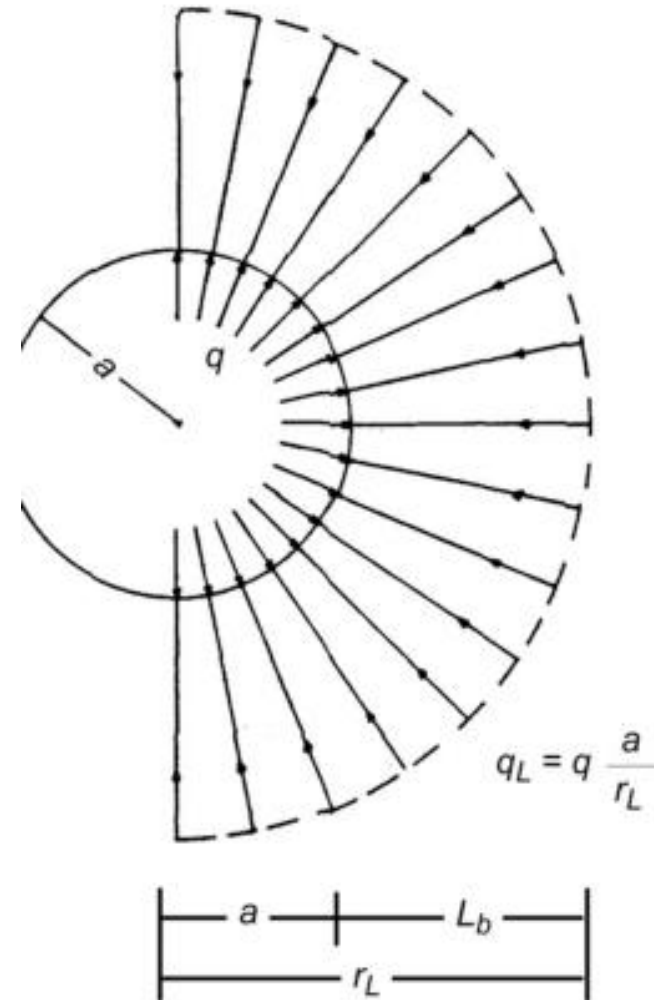
- Rigidezza equivalente del sistema

$$k_s = \frac{E_s A_b}{L_b} \frac{1}{s_c s_l} \chi a \quad \text{con} \quad \chi = 1 - u_b / u$$

Il concetto di curva caratteristica si può applicare se:

- $u_b$  è trascurabile (bulloni «lunghi»)
- reazione di ancoraggio trascurabile (bulloni «lunghi»)

$$q_L = q \frac{a}{a + L_b} = q \frac{a}{r_L}$$



## Curva caratteristica del rivestimento

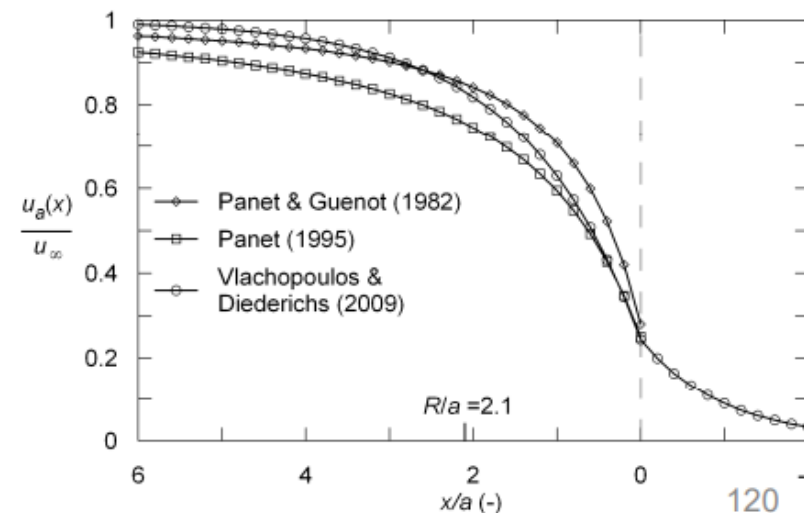
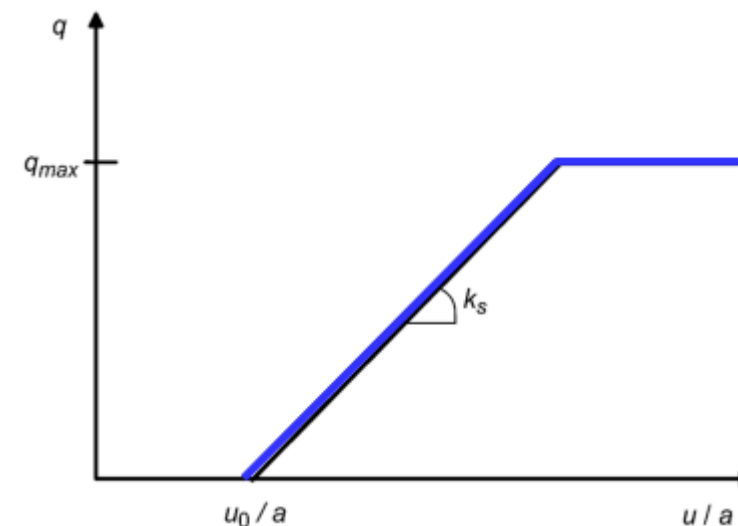
La curva caratteristica del rivestimento deve tener conto sia dell'eventuale lasco tra rivestimento e mezzo, sia della convergenza già avvenuta al momento della messa in carico

Calcolo della convergenza  $u_0$  al momento della messa in opera del rivestimento

$$q = k_s \left( \frac{u}{a} - \frac{u_0}{a} \right)$$

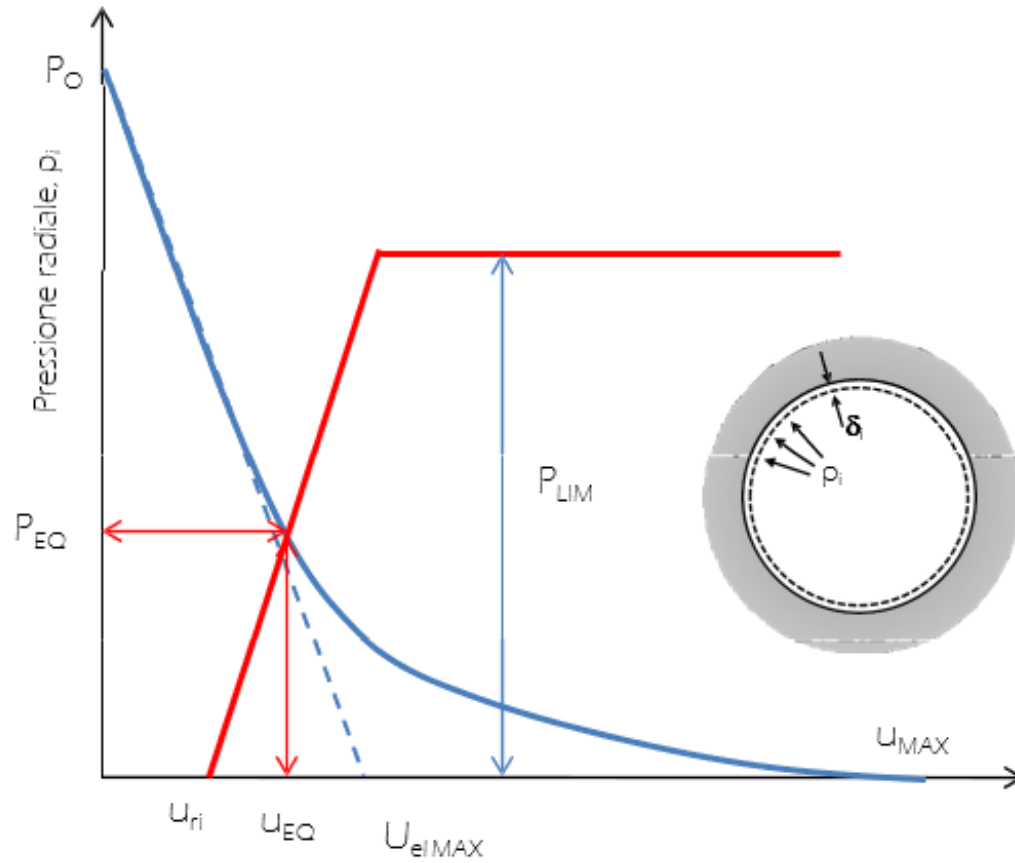
Si può calcolare conoscendo la distanza  $x$  di installazione del rivestimento dal fronte attraverso:

- Panet & Guenot (1982)
- Vlachopoulos & Diederichs (2009)
- ...



## Curva caratteristica del rivestimento

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 ( $\approx 30\%$   $u_{eiMAX}$  se al fronte)
- Mancato contatto iniziale tra roccia e supporto (centine)

FATTORE di SICUREZZA

$$FS = \frac{P_{LIM}}{P_{EQ}}$$

Elementi PROVISORI

1,5 – 2

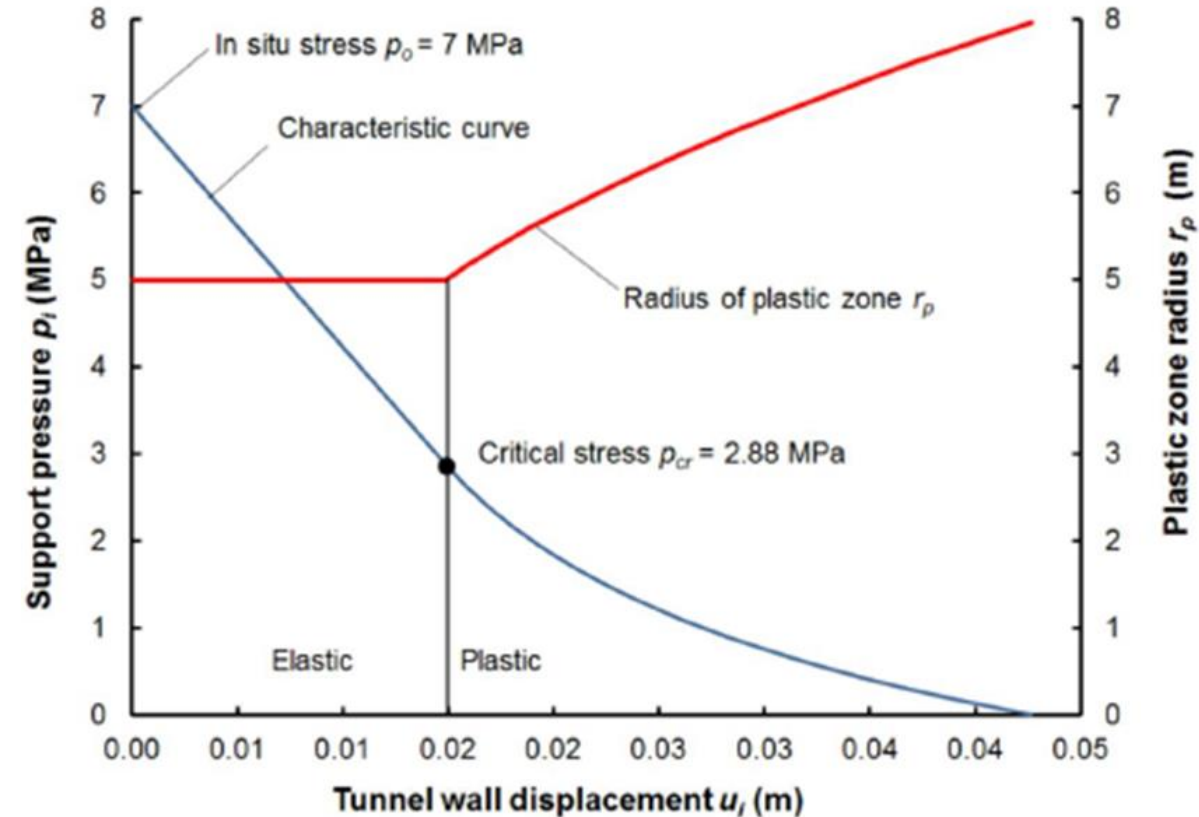
Elementi DEFINITIVI

3

## Ground reaction curve, GRC

Il grafico spostamento - pressione è generalmente noto come rock mass characteristic line (o Ground reaction curve, GRC).

Attraverso questo metodo è possibile studiare il comportamento tridimensionale dell'ammasso roccioso utilizzando un approccio bidimensionale. Ciò può essere fatto applicando una pressione fittizia sul bordo dello scavo, diminuendo da  $p_0$  a un valore che dipende dalla distanza tra il fronte della galleria e la sezione considerata.





## Ground reaction curve, GRC

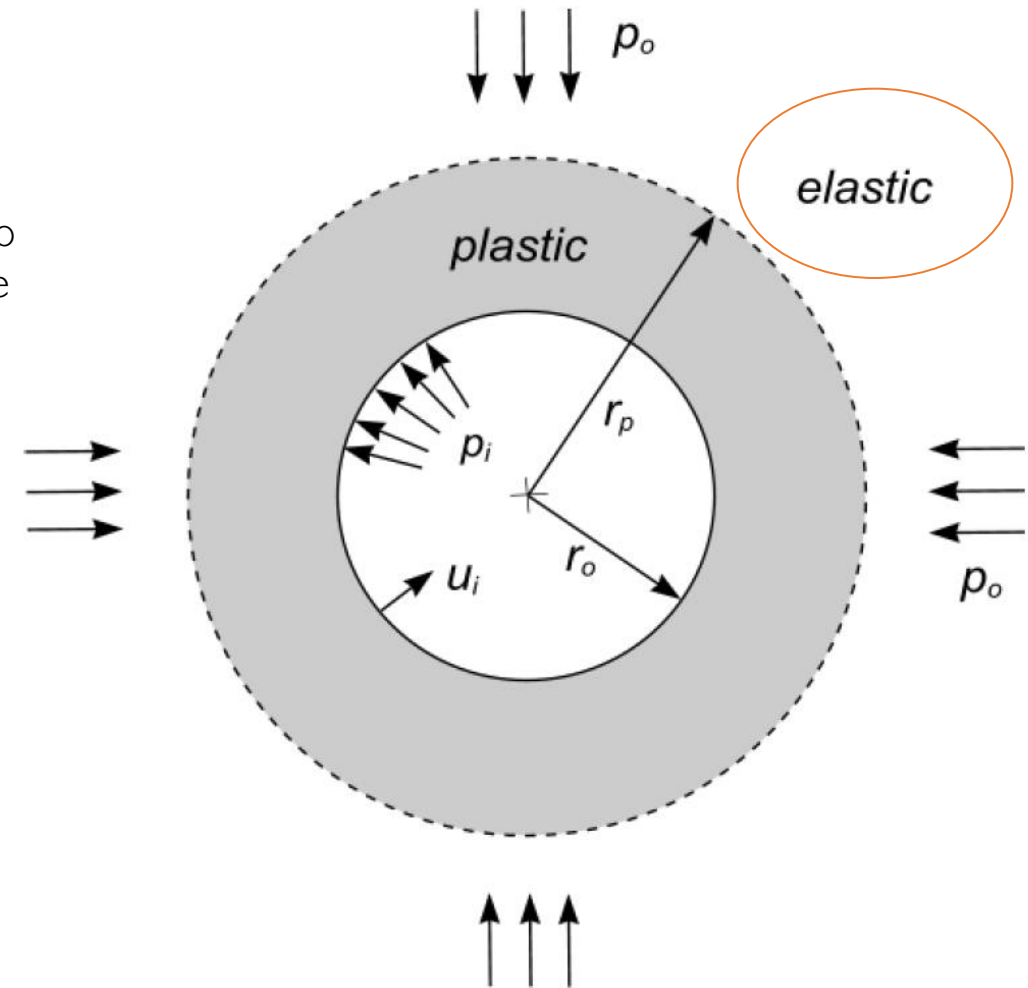
Supponiamo che una galleria circolare di raggio  $r_o$  sia soggetta a sollecitazioni idrostatiche  $p_o$  e a una pressione uniforme  $p_i$  data dall'elemento di supporto.

Il cedimento dell'ammasso roccioso che circonda la galleria si verifica quando la pressione interna  $p_i$  è inferiore a una pressione di supporto critica  $p_{cr}$ , che è definita da:

$$p_{cr} = \frac{2p_o - \sigma_{cm}}{1+k}$$

Se la pressione  $p_i$  è maggiore della pressione critica  $p_{cr}$ , non si verifica alcun cedimento plastico, il comportamento dell'ammasso roccioso che circonda la galleria è elastico e lo spostamento elastico radiale verso l'interno  $u_i$  e della parete della galleria è dato da:

$$u_{ie} = \frac{r_o(1+\nu)}{E_m}(p_o - p_i)$$



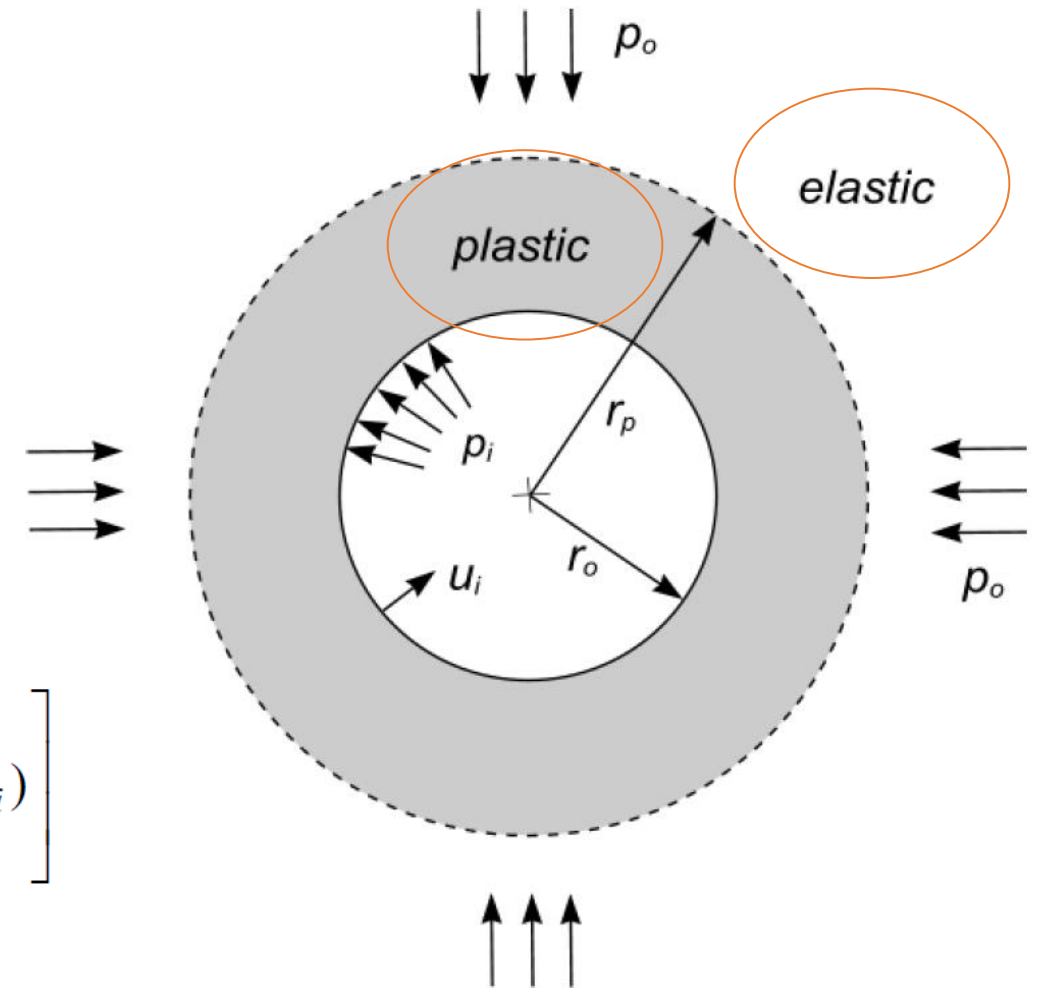
## Ground reaction curve, GRC

Quando la pressione interna  $p_i$  è inferiore alla pressione critica  $p_{cr}$ , si verifica un cedimento e il raggio della zona plastica attorno allo scavo è dato da  $r_p$

$$r_p = r_o \left[ \frac{2(p_o(k-1) + \sigma_{cm})}{(1+k)((k-1)p_i + \sigma_{cm})} \right]^{\frac{1}{(k-1)}}$$

In caso di cedimento plastico, lo spostamento radiale delle pareti della galleria è:

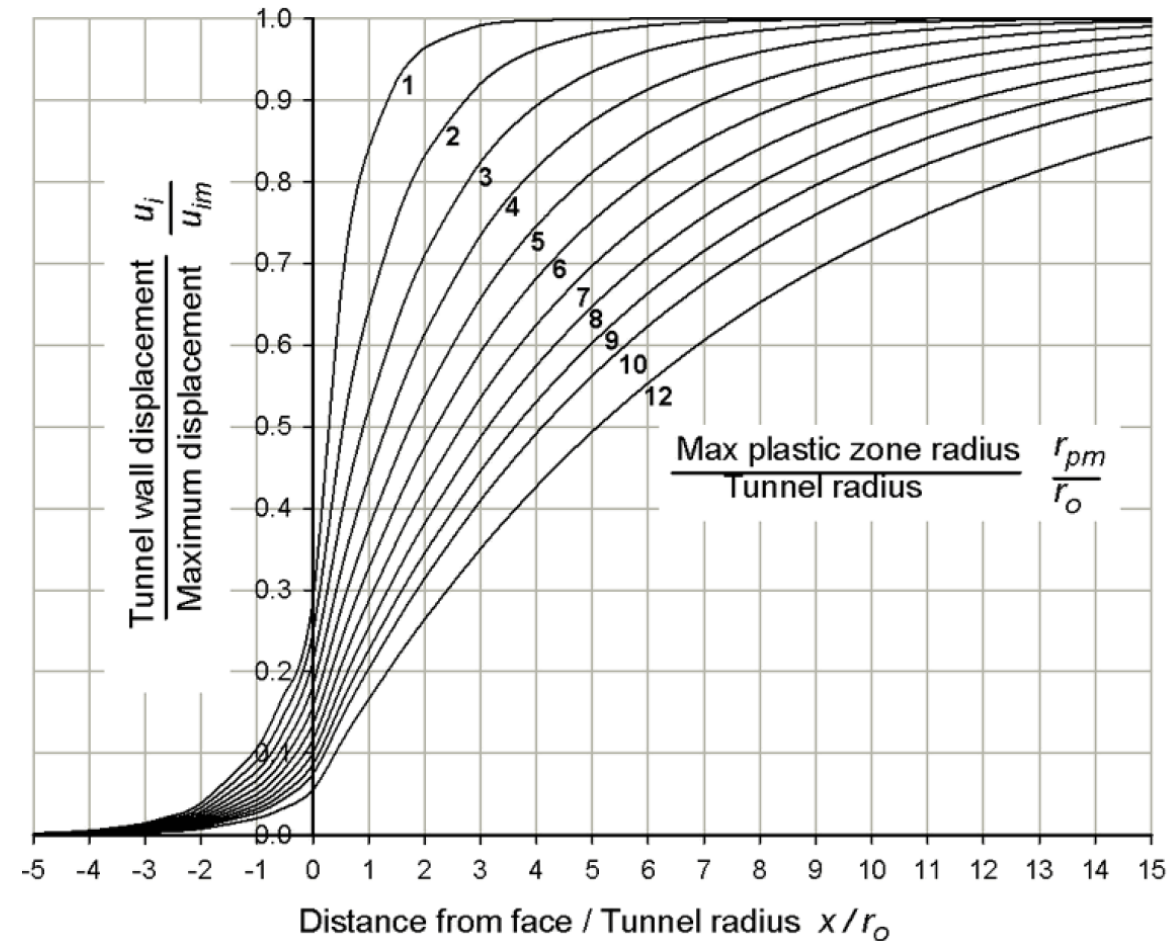
$$u_{ip} = \frac{r_o(1+\nu)}{E} \left[ 2(1-\nu)(p_o - p_{cr}) \left( \frac{r_p}{r_o} \right)^2 - (1-2\nu)(p_o - p_i) \right]$$



## Longitudinal Displacement Profile, LDP

Il profilo degli spostamenti longitudinali (LDP) rappresenta l'evoluzione degli spostamenti radiali che lo scavo di una galleria induce in corrispondenza di una sezione della stessa, senza alcun supporto, man mano che lo scavo avanza. Il risultato finale è una diagramma che in ascissa presenta la distanza della sezione studiata dal fronte, sia collocando tale sezione avanti rispetto al fronte, che nella direzione in cui lo scavo è già avvenuto. In ordinata si trovano i valori di spostamento radiale che si osservano sulla parete di scavo.

Una delle formulazioni oggi adottate è quella proposta da Vlachopoulos e Diederichs (2009), nella quale gli autori relazionano l'andamento degli spostamenti radiali con il valore della zona plastica che si sviluppa



## Longitudinal Displacement Profile, LDP

Procedura di calcolo:

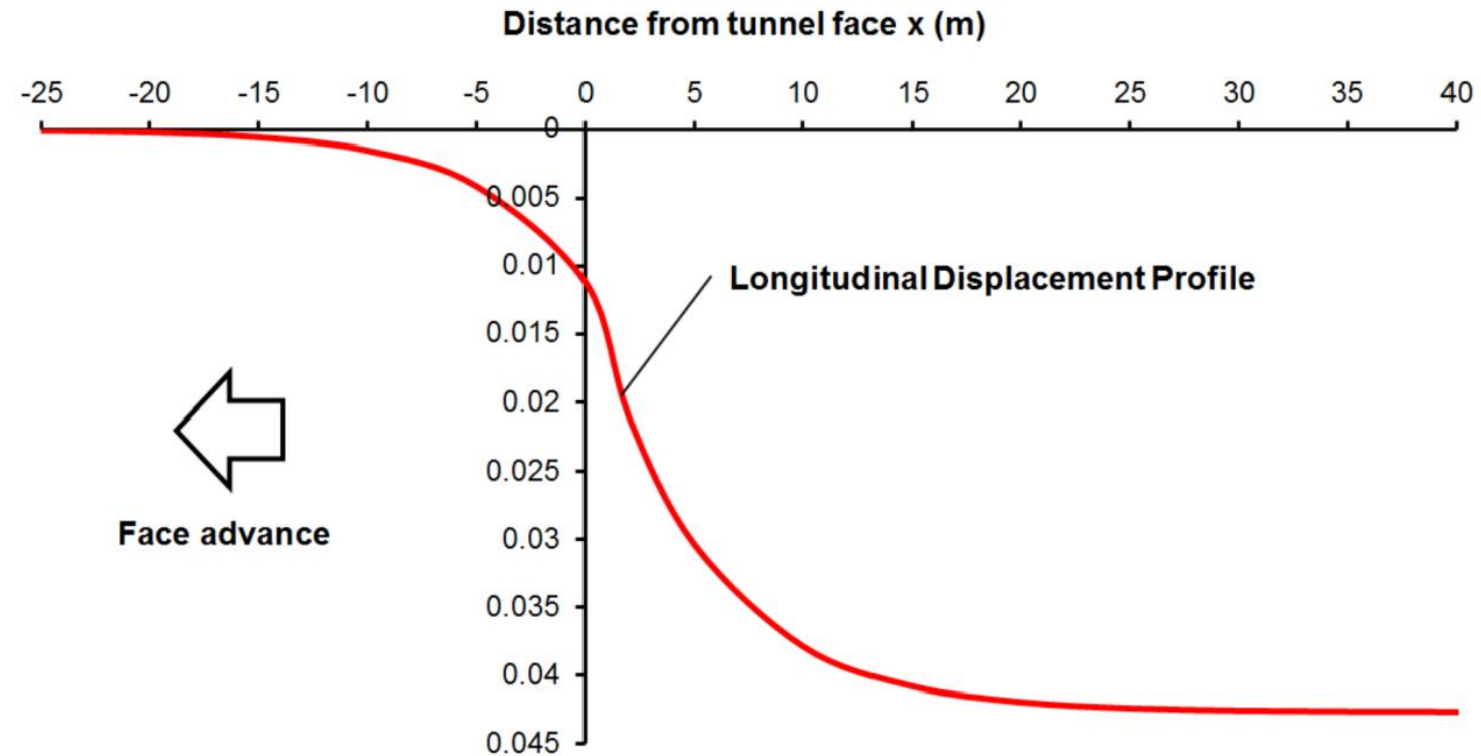
Il rapporto tra il raggio massimo della zona plastica  $r_{pm}$  e il raggio del tunnel  $r_o$ , è calcolato impostando  $p_i = 0$ :

$$\frac{r_{pm}}{r_o} = \left[ \frac{2(p_o(k-1) + \sigma_{cm})}{(1+k)\sigma_{cm}} \right]^{\frac{1}{(k-1)}}$$

Lo spostamento al fronte del tunnel è calcolato dalla seguente equazione derivata da Vlachopoulos e Diederichs

$$u_{if} = \left( \frac{u_{im}}{3} \right) e^{-0.15(r_{pm}/r_o)}$$

dove  $u_{im}$  è il massimo spostamento che si verifica in corrispondenza del valore critico  $r_{pm}$ .



$x < 0$

SPOSTAMENTO

$x > 0$

$$u_i = \frac{u_{if}}{u_{im}} \cdot e^{x/r_o}$$

$$u_i = 1 - \left( 1 - \frac{u_{if}}{u_{im}} \right) \cdot e^{(-3x/r_o) / (2r_{pm}/r_o)}$$

# ESEMPIO

## Valutazione della GRC

Valori di input derivati da prove di laboratorio e prove in situ

INPUT									
sigci	10 N/mm2		mi	10		GSI	25		
mu	0.3		r0	3 m		p0	2 N/mm2		
pi	0 N/mm2		pi/p0	0					
OUTPUT									
mb	0.687		s	0		a	0.525		
k	2.44		phi	24.717 °		coh	0.219 N/mm2		
sigcm	0.694 N/mm2		E	749.89 N/mm2		pcr	0.962 N/mm2		
rp	6.433 m		ui	0.0306 m		ui	30.60 mm		
sigcm/p0	0.3468		rp/r0	2.144		ui/r0	0.0102		

calculation									
sig3	1.00E-10	3.57E-01	0.71	1.07	1.43	1.79	2.14	2.50	10.00
sig1	1.37809E-05	1.784	2.768	3.612	4.384	5.108	5.799	6.465	29.92
sig3sig1	1.38E-15	0.64	1.98	3.87	6.26	9.12	12.43	16.16	50.46
sig3sq	1.00E-20	0.13	0.51	1.15	2.04	3.19	4.59	6.25	17.86

## OUTPUT

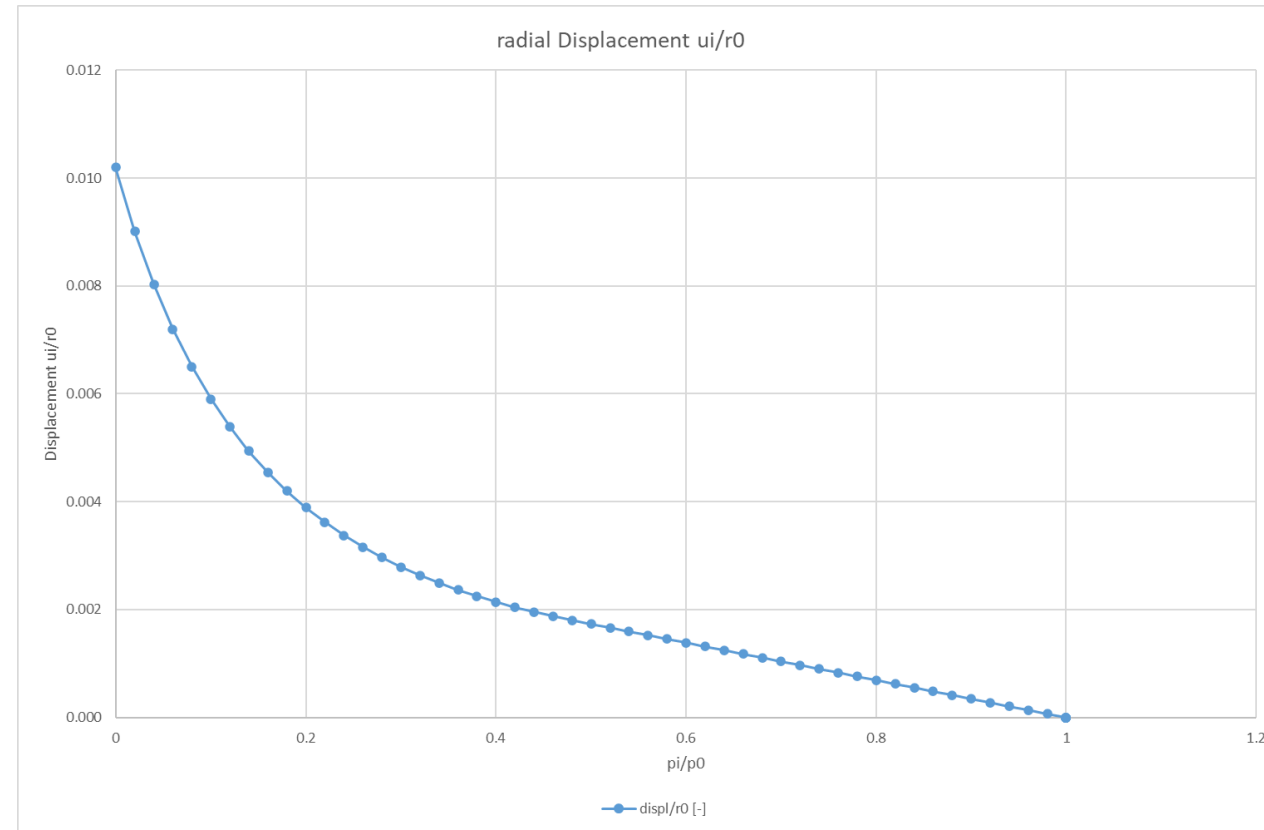
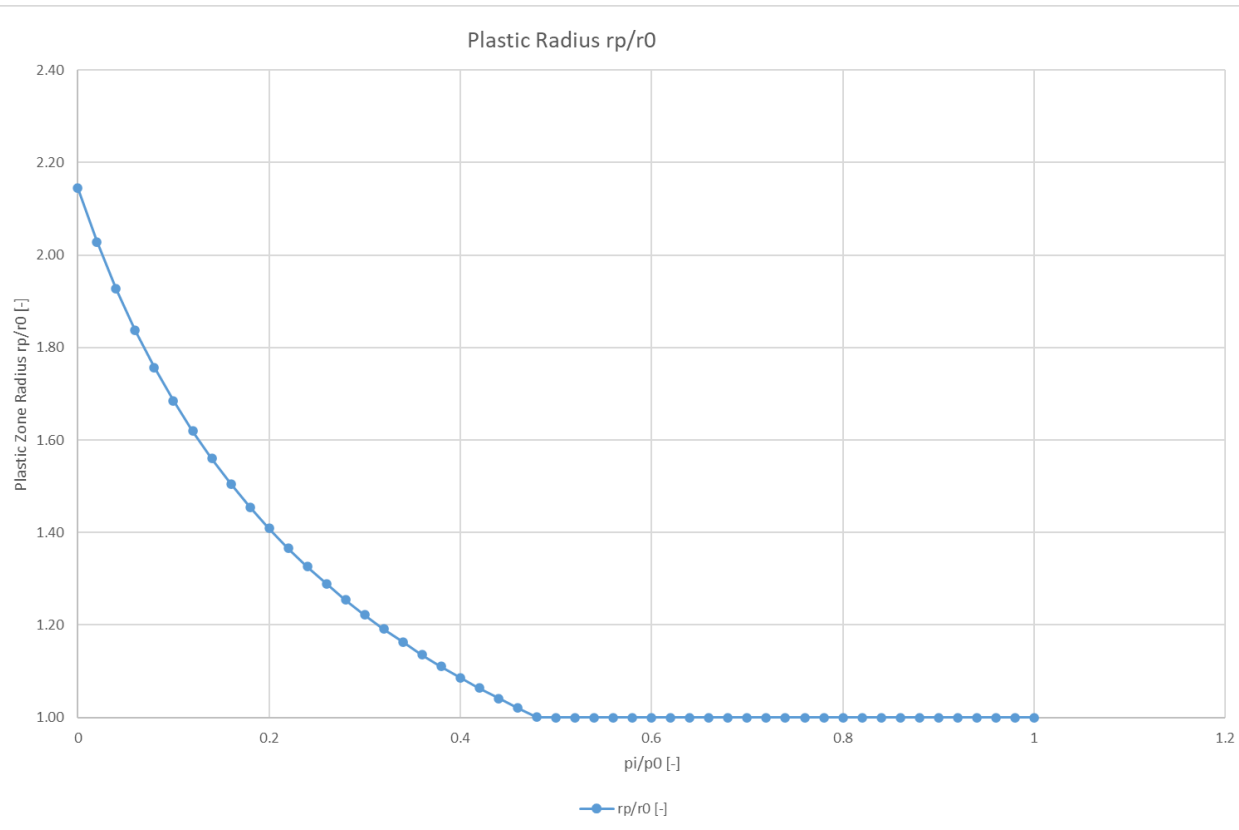
Diagram Ground Reaction Curve									
pi	pi/p0	pcr	Condition	uie	uip	displ	rp	rp/r0	displ/r0
[N/mm2]	[-]	[N/mm2]	[-]	[mm]	[mm]	[mm]	[m]	[-]	[-]
0	0	0.962	plastic	0.00	30.60	30.60	6.43	2.14	0.010
0.04	0.02	0.962	plastic	0.00	27.03	27.03	6.09	2.03	0.009
0.08	0.04	0.962	plastic	0.00	24.08	24.08	5.78	1.93	0.008
0.12	0.06	0.962	plastic	0.00	21.61	21.61	5.51	1.84	0.007
0.16	0.08	0.962	plastic	0.00	19.51	19.51	5.27	1.76	0.007
0.2	0.1	0.962	plastic	0.00	17.71	17.71	5.05	1.68	0.006
0.24	0.12	0.962	plastic	0.00	16.16	16.16	4.86	1.62	0.005
0.28	0.14	0.962	plastic	0.00	14.81	14.81	4.68	1.56	0.005
0.32	0.16	0.962	plastic	0.00	13.63	13.63	4.52	1.51	0.005
0.36	0.18	0.962	plastic	0.00	12.59	12.59	4.37	1.46	0.004
0.4	0.2	0.962	plastic	0.00	11.67	11.67	4.23	1.41	0.004
0.44	0.22	0.962	plastic	0.00	10.86	10.86	4.10	1.37	0.004
0.48	0.24	0.962	plastic	0.00	10.13	10.13	3.98	1.33	0.003
0.52	0.26	0.962	plastic	0.00	9.49	9.49	3.87	1.29	0.003
0.56	0.28	0.962	plastic	0.00	8.90	8.90	3.76	1.25	0.003
0.6	0.3	0.962	plastic	0.00	8.38	8.38	3.67	1.22	0.003
0.64	0.32	0.962	plastic	0.00	7.91	7.91	3.58	1.19	0.003
0.68	0.34	0.962	plastic	0.00	7.48	7.48	3.49	1.16	0.002
0.72	0.36	0.962	plastic	0.00	7.09	7.09	3.41	1.14	0.002
0.76	0.38	0.962	plastic	0.00	6.74	6.74	3.33	1.11	0.002
0.8	0.4	0.962	plastic	0.00	6.42	6.42	3.26	1.09	0.002
0.84	0.42	0.962	plastic	0.00	6.13	6.13	3.19	1.06	0.002
0.88	0.44	0.962	plastic	0.00	5.87	5.87	3.12	1.04	0.002
0.92	0.46	0.962	plastic	0.00	5.63	5.63	3.06	1.02	0.002
0.96	0.48	0.962	plastic	0.00	5.41	5.41	3.00	1.00	0.002
1	0.5	0.962	elastic	5.20	-	5.20	3.00	1.00	0.002
1.04	0.52	0.962	elastic	4.99	-	4.99	3.00	1.00	0.002
1.08	0.54	0.962	elastic	4.78	-	4.78	3.00	1.00	0.002
1.12	0.56	0.962	elastic	4.58	-	4.58	3.00	1.00	0.002
1.16	0.58	0.962	elastic	4.37	-	4.37	3.00	1.00	0.001
1.2	0.6	0.962	elastic	4.16	-	4.16	3.00	1.00	0.001
1.24	0.62	0.962	elastic	3.95	-	3.95	3.00	1.00	0.001
1.28	0.64	0.962	elastic	3.74	-	3.74	3.00	1.00	0.001

# ESEMPIO

## Valutazione della GRC

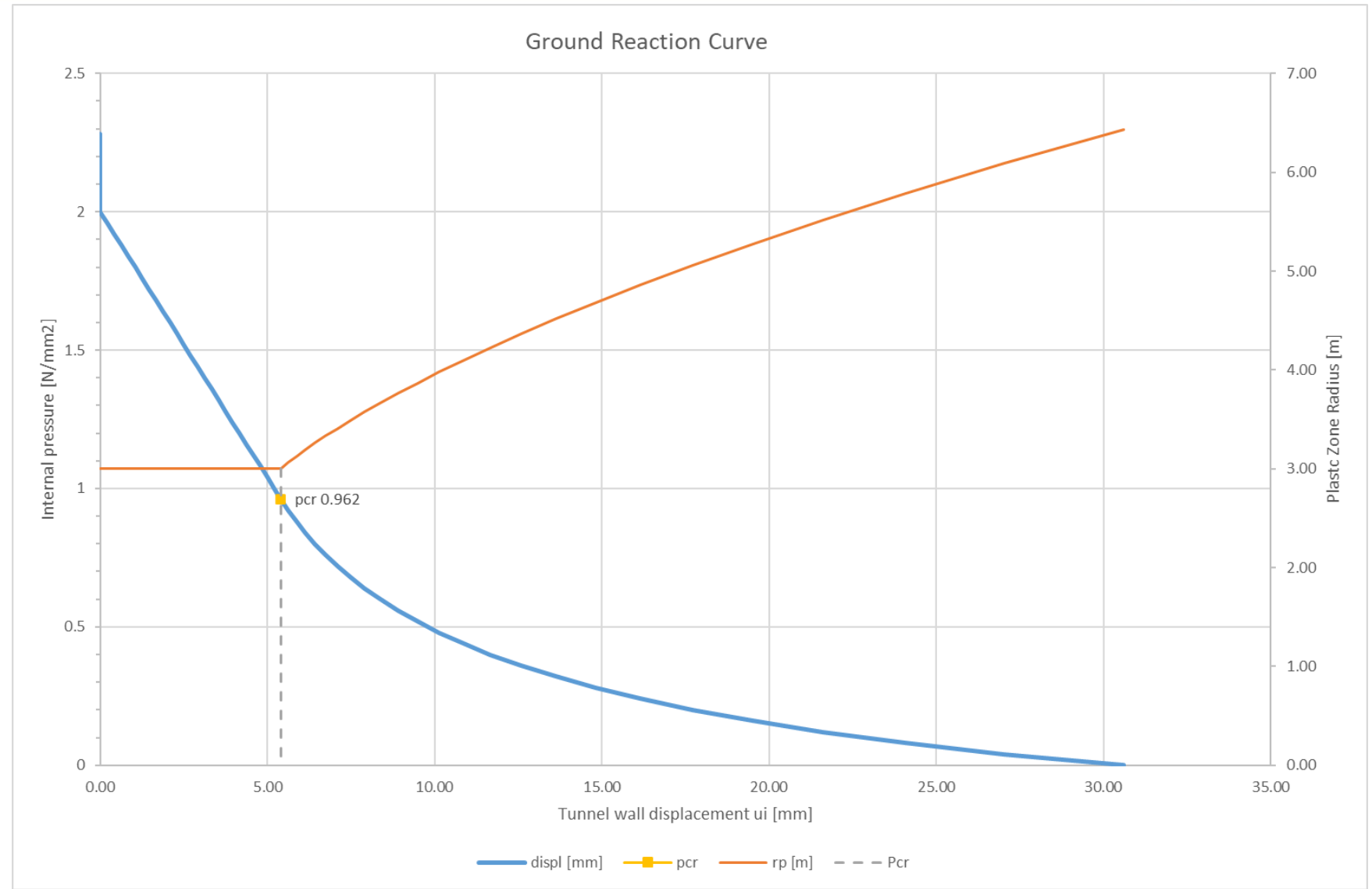
Raggio plastico

Spostamento radiale



# ESEMPIO

## Valutazione della GRC



# ESEMPIO

## Valutazione del LDP con la formulazione di Vlachopoulos-Diederichs

### OUTPUT

Valori di input ricavati sulla base del calcolo della GRC

#### Input data from GRC sheet

sigcm	0.694 N/mm <sup>2</sup>	rpm/r0	2.144	(for pi=0)
p0	2	uif	7.39 mm	(at tunnel face)
k	2.44	uim	30.60 mm	(at maximum rp)
r0 =	3 m			
<b>x&lt;0</b>				
x =	-1 m	ui	0.17 mm	
<b>x&gt;0</b>				
x =	1 m	ui =	0.399 mm	

x<0			
x	x/r0	ui/ui <sub>max</sub>	ui
[m]	[-]	[-]	[mm]
-10	-3.33	0.009	0.26
-9	-3.00	0.012	0.37
-8	-2.67	0.017	0.51
-7	-2.33	0.023	0.72
-6	-2.00	0.033	1.00
-5	-1.67	0.046	1.40
-4	-1.33	0.064	1.95
-3	-1.00	0.089	2.72
-2	-0.67	0.124	3.80
-1	-0.33	0.173	5.30
0	0.00	0.242	7.39

x>0			
x	x/r0	ui/ui <sub>max</sub>	ui
[m]	[-]	[-]	[mm]
0	0	0.242	7.39
1	0.33	0.399	12.22
2	0.67	0.524	16.04
3	1.00	0.623	19.07
4	1.33	0.702	21.47
5	1.67	0.764	23.36
6	2.00	0.813	24.87
7	2.33	0.852	26.06
8	2.67	0.883	27.00
9	3.00	0.907	27.75
10	3.33	0.926	28.34
11	3.67	0.942	28.81
12	4.00	0.954	29.18
13	4.33	0.963	29.48
14	4.67	0.971	29.71
15	5.00	0.977	29.89
16	5.33	0.982	30.04
17	5.67	0.986	30.16
18	6.00	0.989	30.25
19	6.33	0.991	30.32
20	6.67	0.993	30.38

Wall displacement at face		
x/r0	ui/ui <sub>max</sub>	ui
[-]	[-]	[mm]
0	0.242	7.393
0		30.60

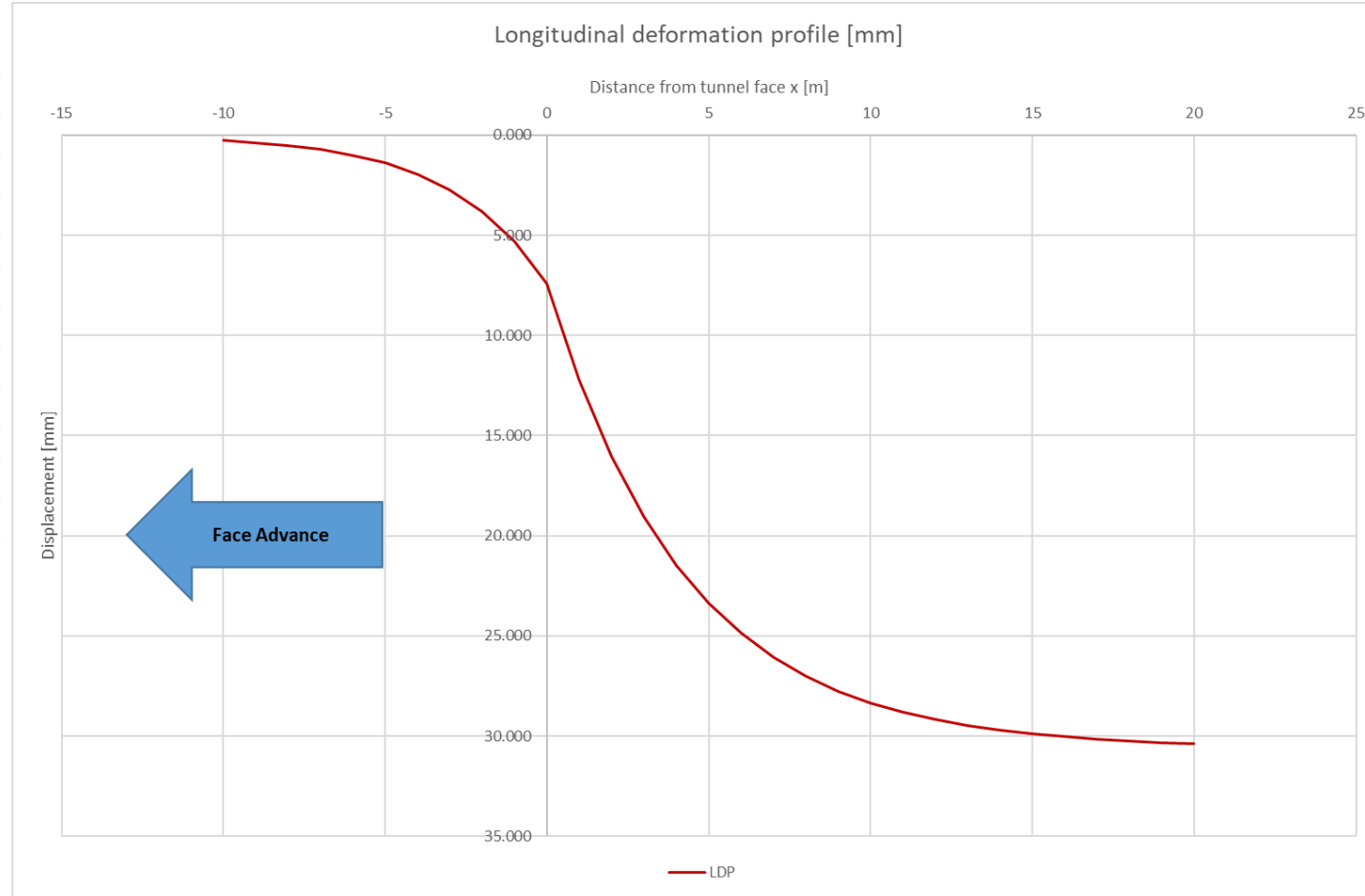
ui0 <sub>supp</sub>	0.016041 m
x =	2 m



# ESEMPIO

## Valutazione del LDP con la formulazione di Vlachopoulos-Diederichs

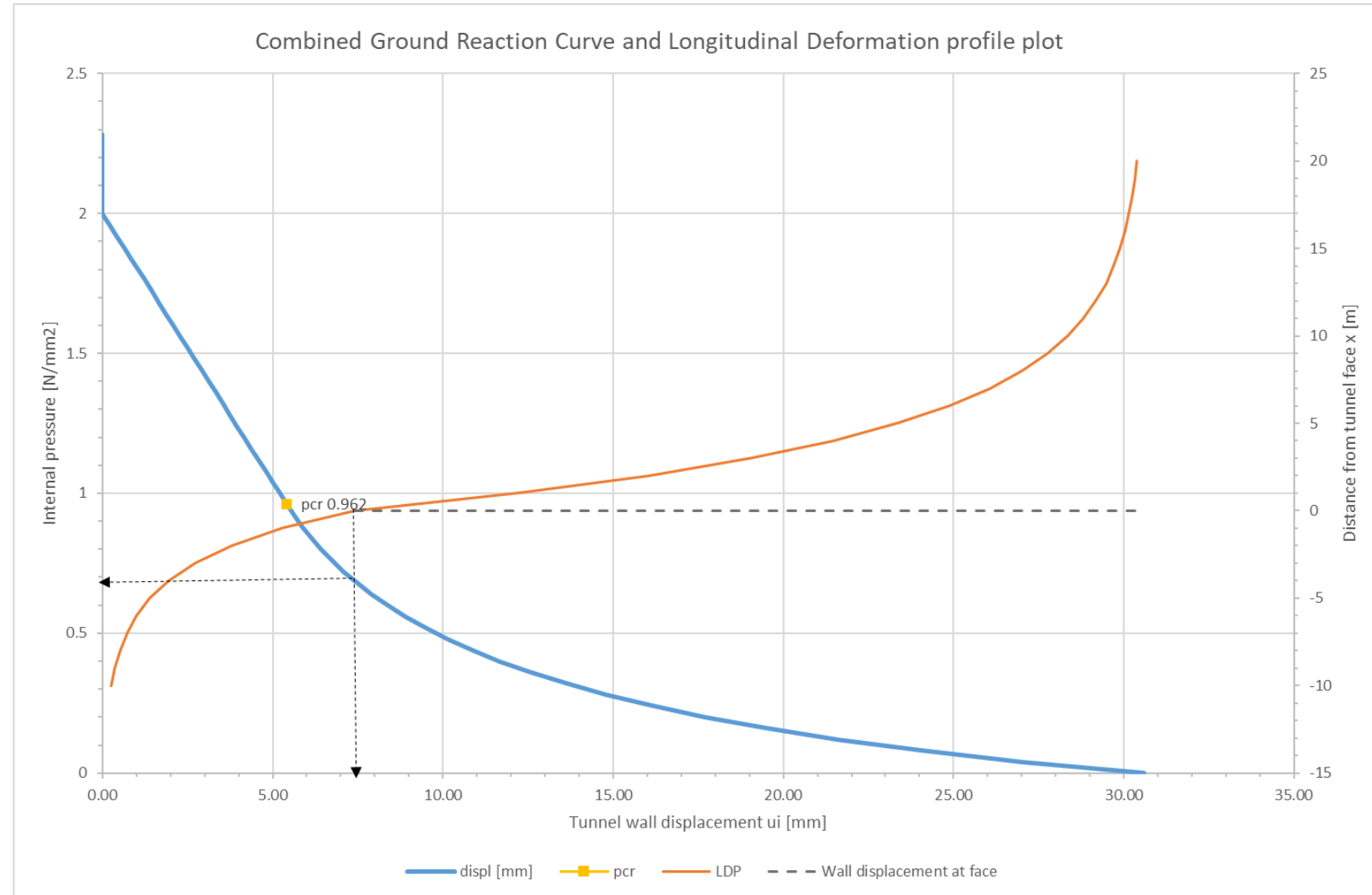
x<0			
x	x/r0	ui/uimax	ui
[m]	[-]	[-]	[mm]
-10	-3.33	0.009	0.26
-9	-3.00	0.012	0.37
-8	-2.67	0.017	0.51
-7	-2.33	0.023	0.72
-6	-2.00	0.033	1.00
-5	-1.67	0.046	1.40
-4	-1.33	0.064	1.95
-3	-1.00	0.089	2.72
-2	-0.67	0.124	3.80
-1	-0.33	0.173	5.30
0	0.00	0.242	7.39



x>0			
x	x/r0	ui/uimax	ui
[m]	[-]	[-]	[mm]
0	0	0.242	7.39
1	0.33	0.399	12.22
2	0.67	0.524	16.04
3	1.00	0.623	19.07
4	1.33	0.702	21.47
5	1.67	0.764	23.36
6	2.00	0.813	24.87
7	2.33	0.852	26.06
8	2.67	0.883	27.00
9	3.00	0.907	27.75
10	3.33	0.926	28.34
11	3.67	0.942	28.81
12	4.00	0.954	29.18
13	4.33	0.963	29.48
14	4.67	0.971	29.71
15	5.00	0.977	29.89
16	5.33	0.982	30.04
17	5.67	0.986	30.16
18	6.00	0.989	30.25
19	6.33	0.991	30.32
20	6.67	0.993	30.38

# ESEMPIO

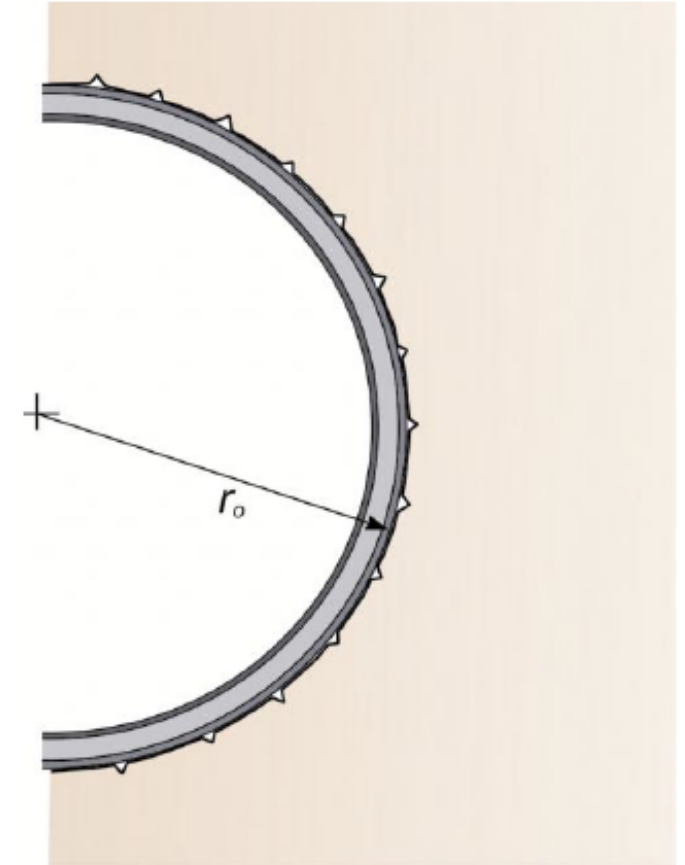
## Valutazione del LDP con la formulazione di Vlachopoulos-Diederichs



# ESEMPIO

## Dimensionamento sistemi di supporto e sostegno - CENTINE

steel ribs					
input			Output		
Cross sectional area	A=	0.0123 m <sup>2</sup>		Max pss	1.1275 N/mm <sup>2</sup>
Steel young Modulus	E <sub>ss</sub> =	207000 N/mm <sup>2</sup>		K <sub>ss</sub>	282.9 MPa/m
Yield Strength	S <sub>ys</sub> =	275 N/mm <sup>2</sup>		u <sub>ismax</sub>	0.00399 m
tunnel radius	r <sub>0</sub> =	3 m		strain %	0.133
Set spacing along tunnel	S <sub>s</sub> =	1 m		Yield u <sub>iy</sub>	0.02003 m
steel ribs support interaction curve			x	16.04078	20.02629
			y	0	1.1275
					40 mm
					1.1275 N/mm <sup>2</sup>
Approssimative Factor safety for steel set support				FS =	5.3690476
				pse =	0.21 N/mm <sup>2</sup>



$$p_{ssmax} = \frac{A_s \sigma_{ys}}{s_l r_0}$$

$$K_{ss} = \frac{E_s A_s}{s_l r_0^2}$$

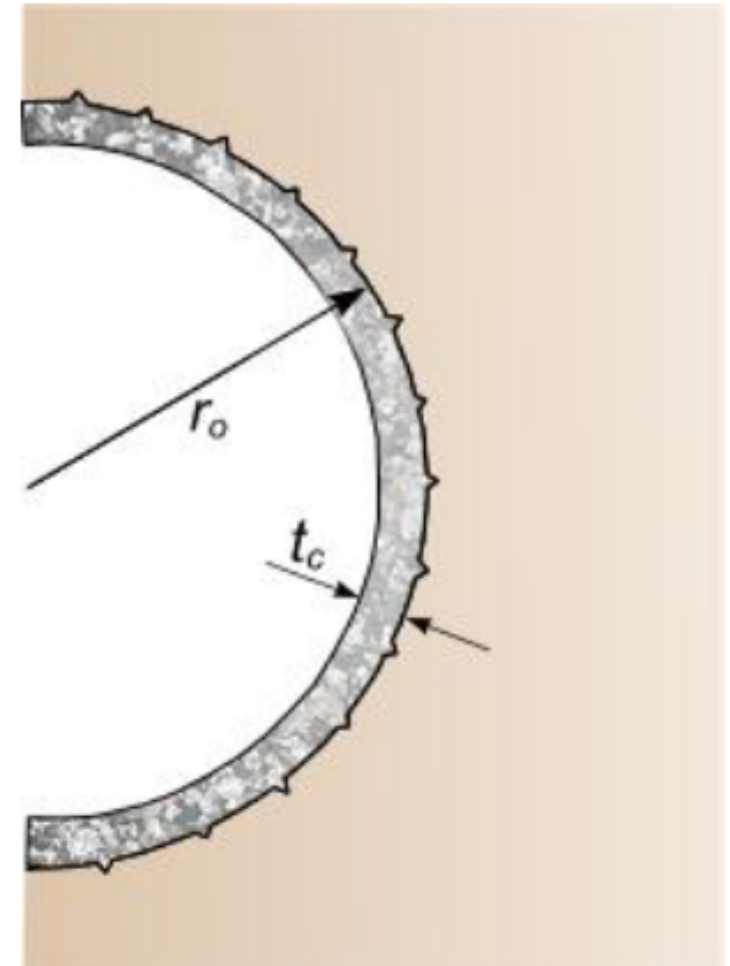
# ESEMPIO

## Dimensionamento sistemi di supporto e sostegno – ANELLO DI CALCESTRUZZO

Shotcrete					
input			Output		
Young modulus of concrete	Ecc =	30000 N/mm2		Max psc =	3.325 N/mm2
Poisson's ratio of concrete	gcc =	0.2		Stiff Ksc	1099.537 MPa/m
Lining thickness	tcc =	0.3 m		uicmax	0.00302 m
Tunnel radius	r0 =	3 m		strain %	0.1008
UCS of concrete or shotcrete	sconc	35 N/mm2		Yield uiy	0.0191 m
Shotcrete lining support interaction curve			x	16.04078	19.0648
			y	0	3.325
Approssimative Factor safety for shotcrete support				FS =	15.113636
				pse =	0.22 N/mm2

$$p_{scmax} = \frac{\sigma_{cc}}{2} \left[ 1 - \frac{(r_o - t_c)^2}{r_o^2} \right]$$

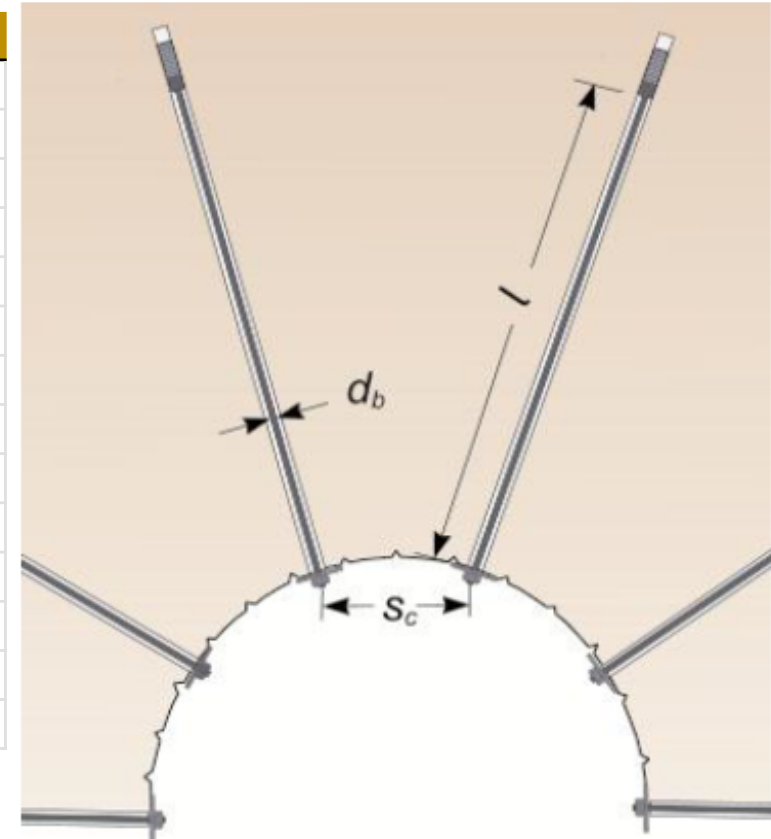
$$K_{sc} = \frac{E_c(r_o^2 - (r_o - t_c)^2)}{2(1 - \nu^2)(r_o - t_c)r_o^2}$$



# ESEMPIO

## Dimensionamento sistemi di supporto e sostegno - BULLONI

Rock Bolt					
input			Output		
Free bolt or cable length	Lrb	3 m			
Diameter of bolt or cable	drb =	0.034 m	Max psr	0.354	N/mm2
Young Modulus of bolt or cable	Erb =	207000 N/mm2	Stiffness Ksb	62.65	MPa/m
Ultimate failure load in pull test	Tbfail =	0.354 MN	uirmax	0.00565	m
Tunnel radius	r0 =	3 m	strain %	0.18836	
Circumferential bolt spacing	src	1 m	Yeld uiy =	0.02169	m
Longitudinal bolt spacing	srl =	1 m			
Shotcrete lining support interaction curve		x	16.0408	21.6915	40 mm
		y	0	0.354	0.354
Approssimative Factor safety for shotcrete support			FS =	1.966667	
			pse =	0.18	N/mm2

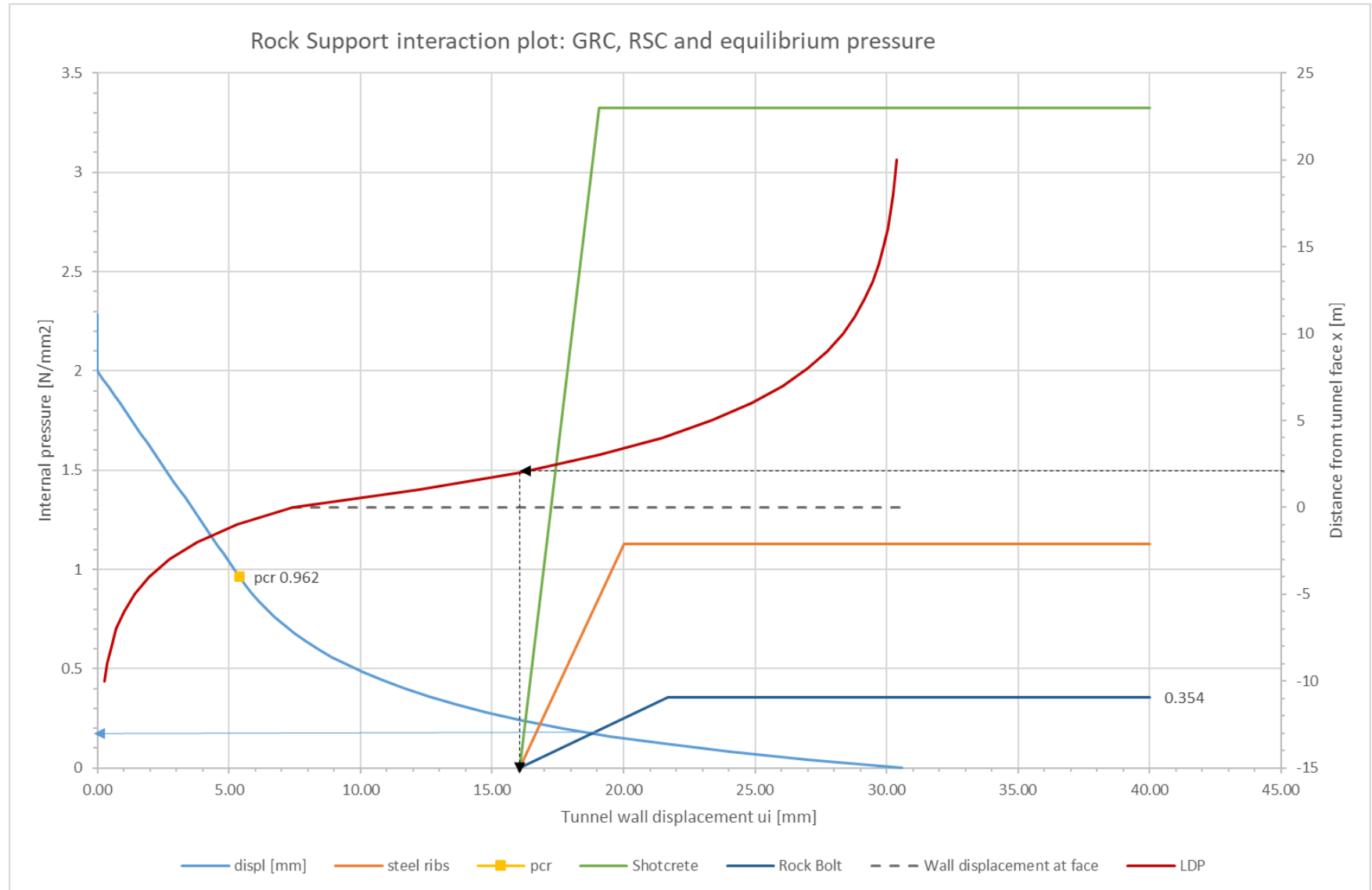


$$p_{sbmax} = \frac{T_{bf}}{s_l s_c}$$

$$K_{sb} = \frac{E_s \pi d_b^2}{4l s_l s_c}$$

# ESEMPIO

## Interazione tra ammasso roccioso e sistemi di supporto



## Modellazione numerica

### OBIETTIVO

interpretare l'aspetto tridimensionale del comportamento dello scavo di una galleria utilizzando analisi bidimensionali in campo elastico-plastico

### APPLICABILITÀ

Questo metodo può essere applicato se è valida una delle seguenti ipotesi:

- Rilassamento del materiale che compone il fronte di scavo EMS (Equivalent Modulus Stiffness)
- Sostituzione dello stato di sollecitazione iniziale all'interno della cavità con pressioni equivalenti (metodo della pressione interna equivalente, Equivalent Internal Pressure )

### PROCEDURA

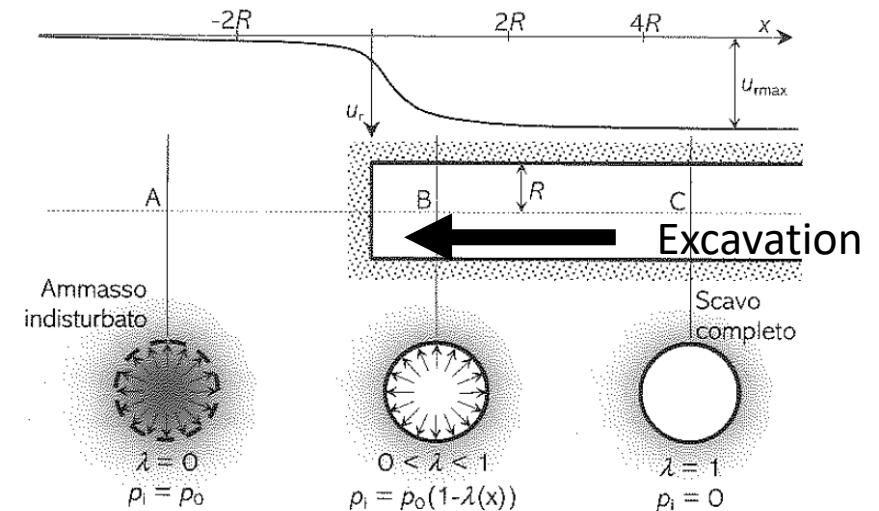
**Fase 1:** Identificazione del diametro equivalente della galleria e definizione della categoria di comportamento dello scavo

**Fase 2:** Stima della deformazione al fronte, attraverso la definizione del LDP

**Fase 3:** Determinazione dei coefficienti di rilassamento nelle varie fasi di scavo

**Fase 4:** Determinazione del tipo di supporto appropriato in base alla stima della deformazione

**Fase 5:** Analisi 2D delle fasi di scavo



## Modellazione numerica

### Fase 1: Identificazione del diametro equivalente della galleria

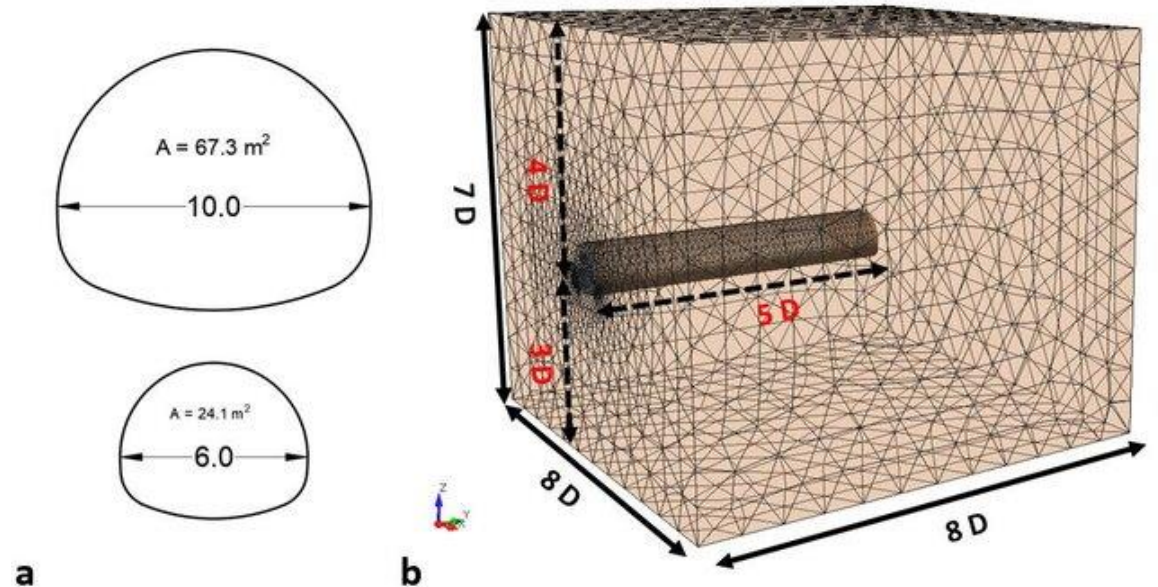
Nel caso di sezione non circolare, il diametro equivalente  $D_{eq}$  si ottiene come

$$D_{eq} = \left( \frac{4 * A_{scavo}}{p} \right) * 0.5$$

In alternativa, il contorno dello scavo può essere discretizzato in  $n$  vertici e l'area può essere ottenuta come segue:

$$A = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{n-1} (x_i y_{i+1} - x_{i+1} y_i)$$

L'ultimo vertice  $x_n, y_n$  deve coincidere con il primo  $x_0, y_0$



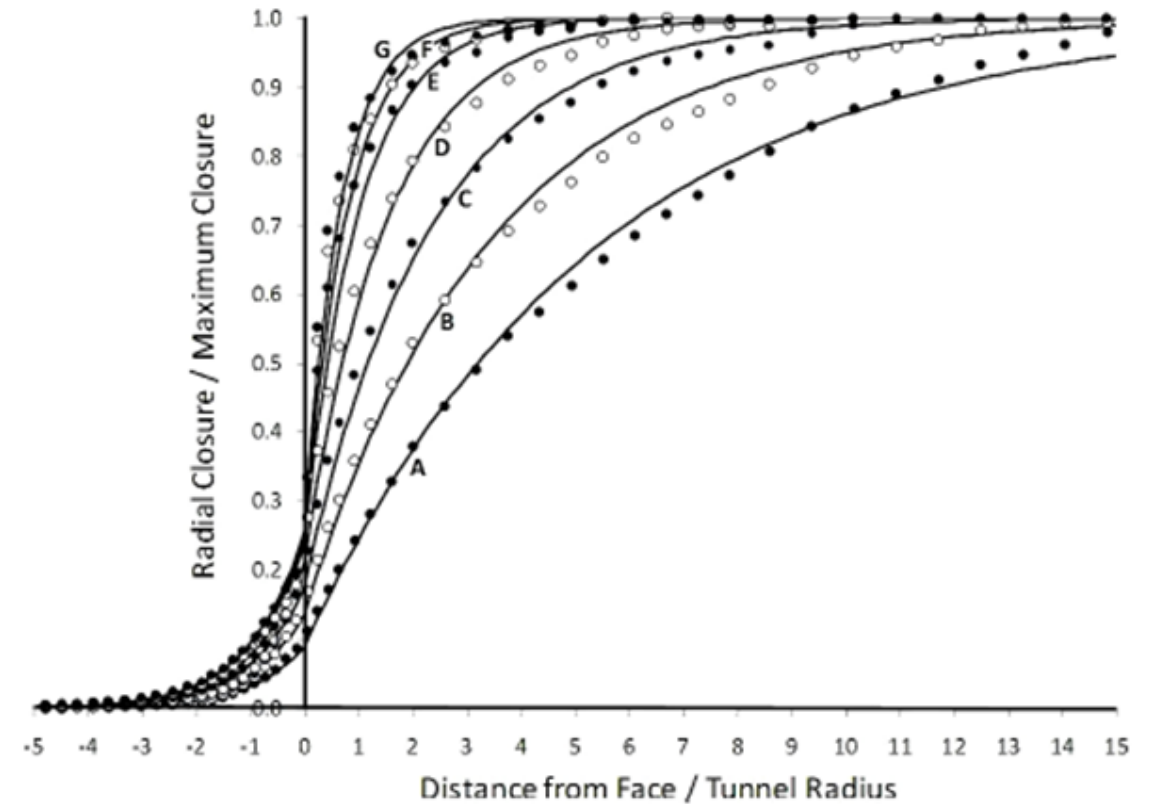
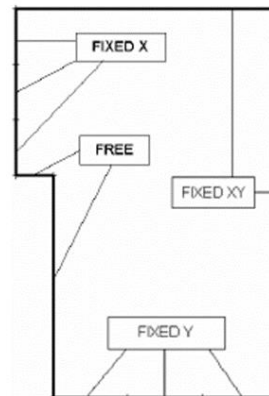
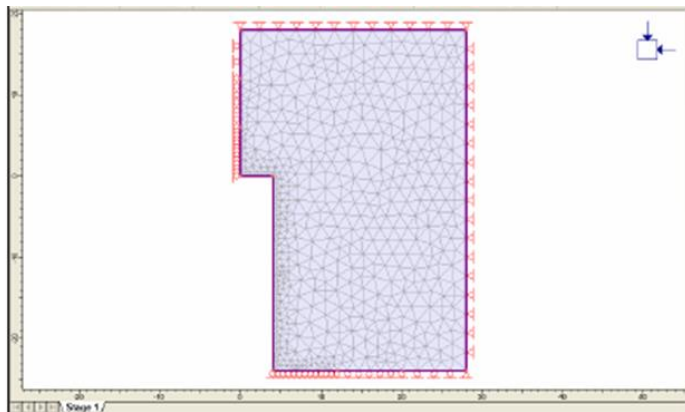


## Modellazione numerica

### Fase 2: Stima della deformazione al fronte, attraverso la definizione del LDP

Il profilo degli spostamenti longitudinali viene costruito disegnando un grafico dello spostamento radiale longitudinale in funzione della distanza dal fronte di scavo, normalizzata rispettivamente in  $u_{max}$  e  $D_{eq}$ , utilizzando:

- Modelli assai-simmetrici
- Modelli empirici (ad es. Panet, Unlu-Gergek, Vlachopoulos-Diederichs, ecc.)

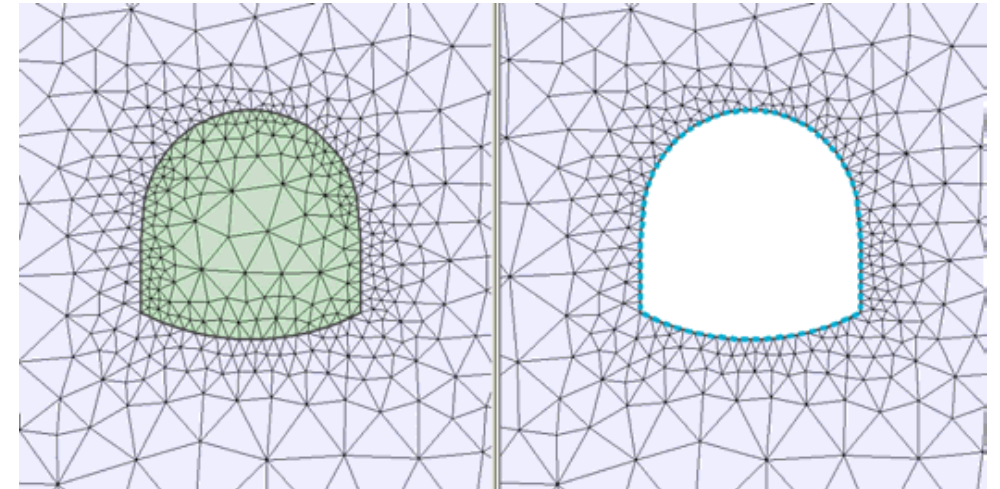


## Modellazione numerica

### Fase 3: Determinazione dei coefficienti di rilassamento nelle varie fasi di scavo

#### MODELLO A DEFORMAZIONI PIANE

- I. Il modello finale viene considerato con la geometria effettiva della galleria;
- II. Si considerando le caratteristiche del supporto selezionato;
- III. Il modulo ridotto (o pressione interna ridotta) viene applicato per simulare l'arrivo del fronte di scavo ( $X = 0$ );
- IV. Il modulo ridotto (o pressione interna ridotta) viene applicato per simulare le fasi di scavo e di supporto a monte del fronte di scavo ( $X =$  installazione del supporto)
- V. Il supporto è attivato;
- VI. Fase di rilassamento dell'area scavata



Se i valori di deformazione derivati si discostano in modo significativo da quelli valutati durante le fasi precedenti, il rilassamento del materiale deve essere modificato fino a ottenere i valori inizialmente stimati

## ESEMPIO: simulazione di una fase di scavo

### Modello a deformazioni piane

Caratteristiche dell'ammasso roccioso

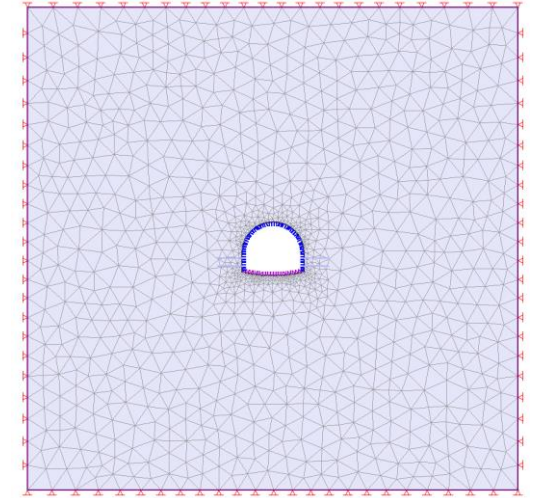
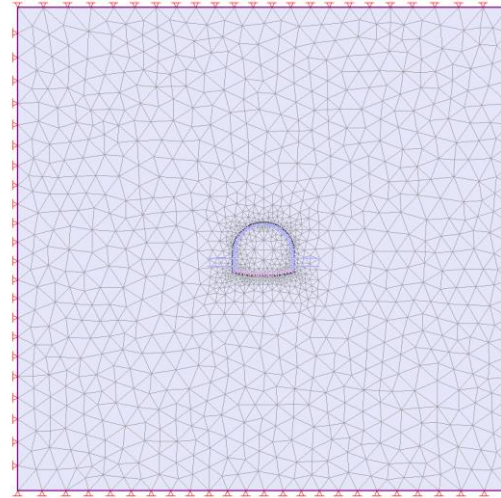
- I. GSI = 35;
- II.  $\sigma_{ci} = 30$  MPa;
- III.  $m_i = 10$ ;
- IV.  $D = 0.5$

Sforzo in situ

- I. Vertical stress= 6 MPa;
- II. Horizontal stress= 3 MPa;

Caratteristiche geometriche del tunnel ( $A_{excav} = 74.63m^2$ )

- I. Crown radius= 5 m;
- II. Tunnel width = 10 m;
- III. Side wall height = 3 m
- IV. Invert Radius= 16.025 m ( $f=0.8m$ )
- V. Application support at 1.5 m from the face

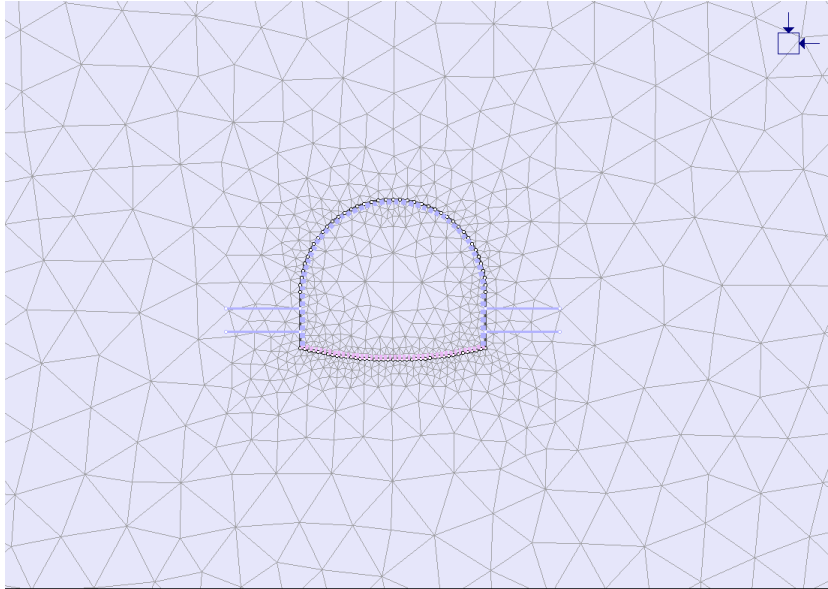


Support

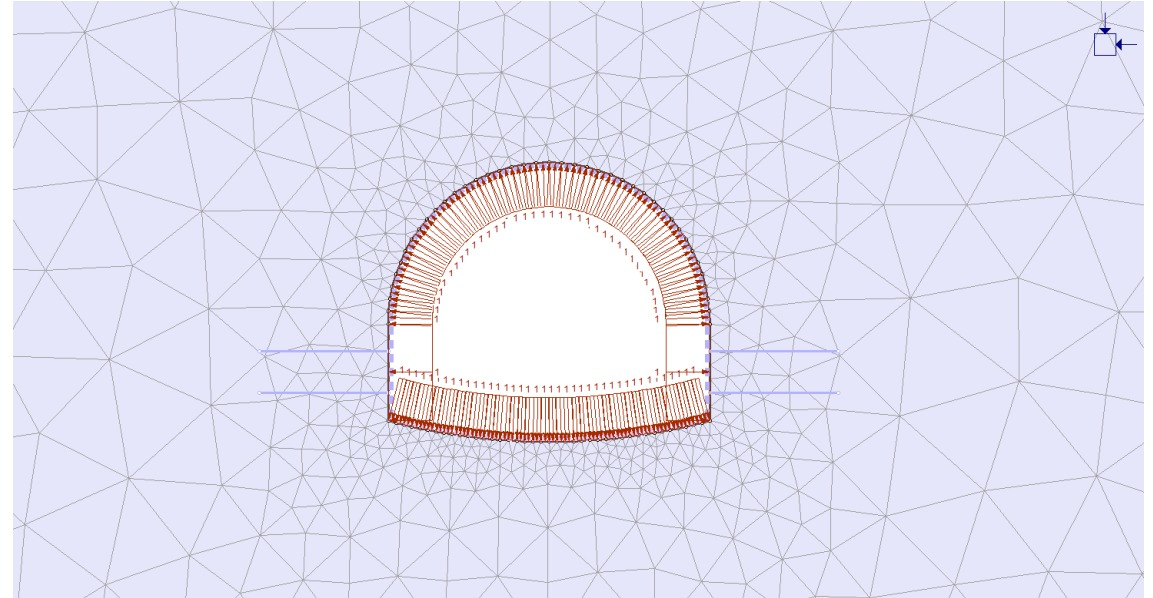
- I. Centine 2INP180/1 m;
- II. Shotcrete CP25/30  $sp=30cm$ ;
- III. Arco rovescio C28/35  $sp=80cm$
- IV. Rivestimento finale C28/35  $sp=70cm$

## ESEMPIO: simulazione di una fase di scavo

### Geostatico



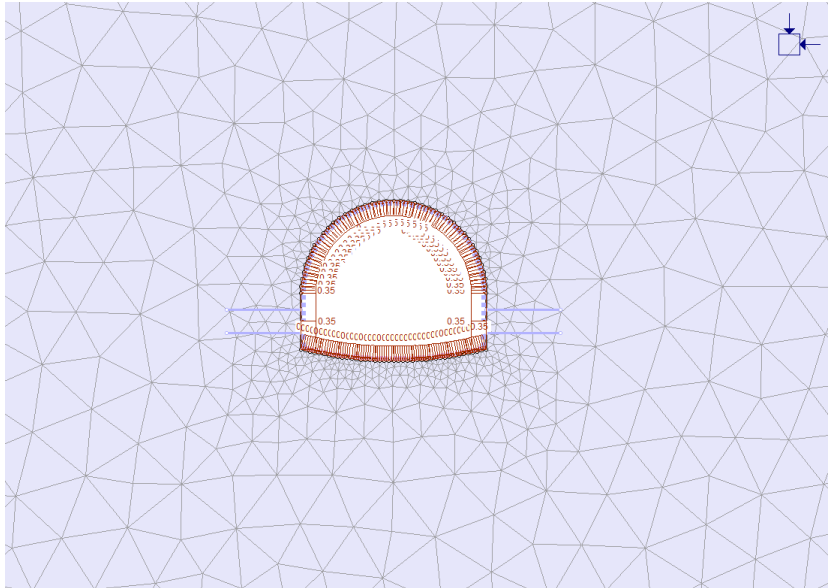
Viene calcolato lo stato tensionale geostatico prima dell'inizio delle attività di scavo



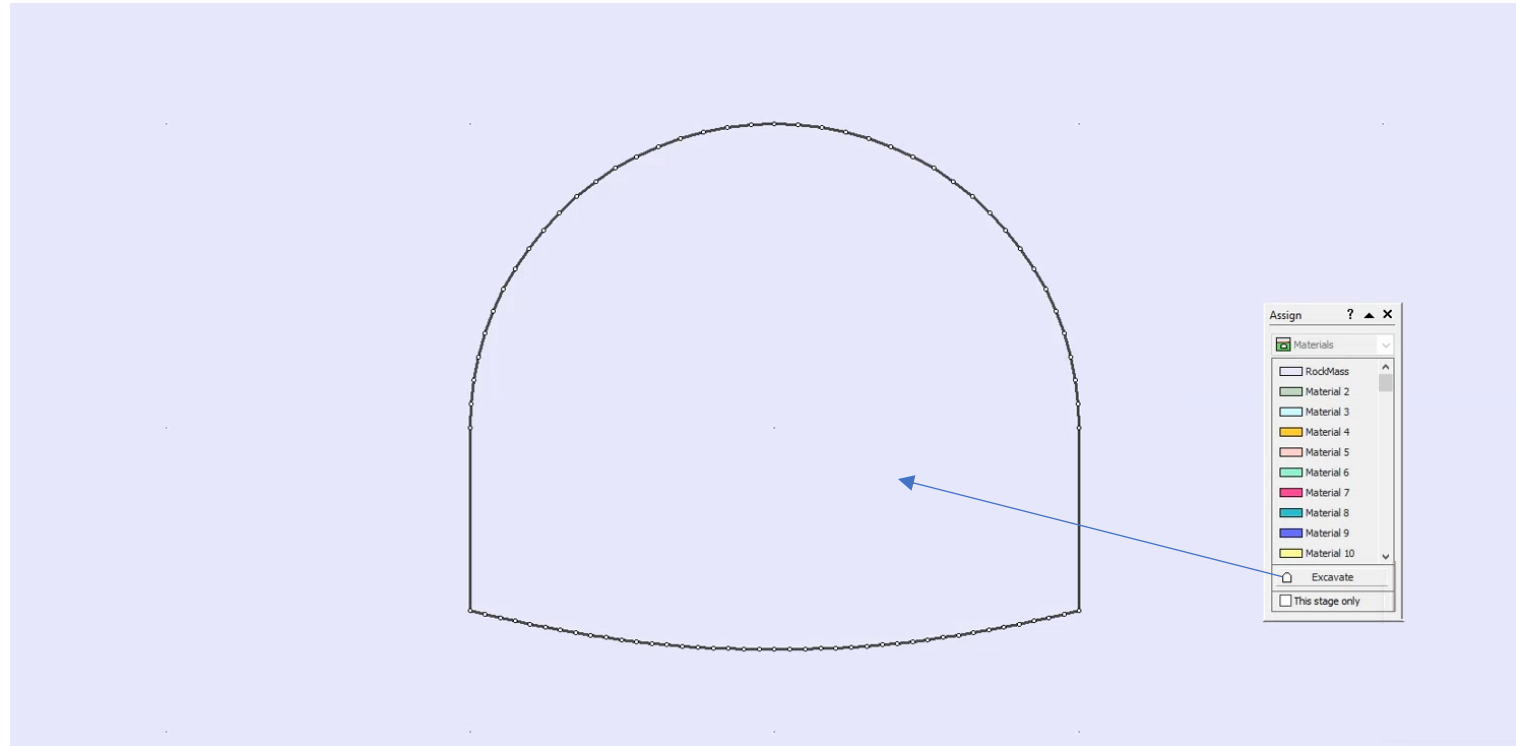
Stage intermedio di verifica (coefficiente di rilassamento unitario)

## ESEMPIO: simulazione di una fase di scavo

### Fronte di scavo

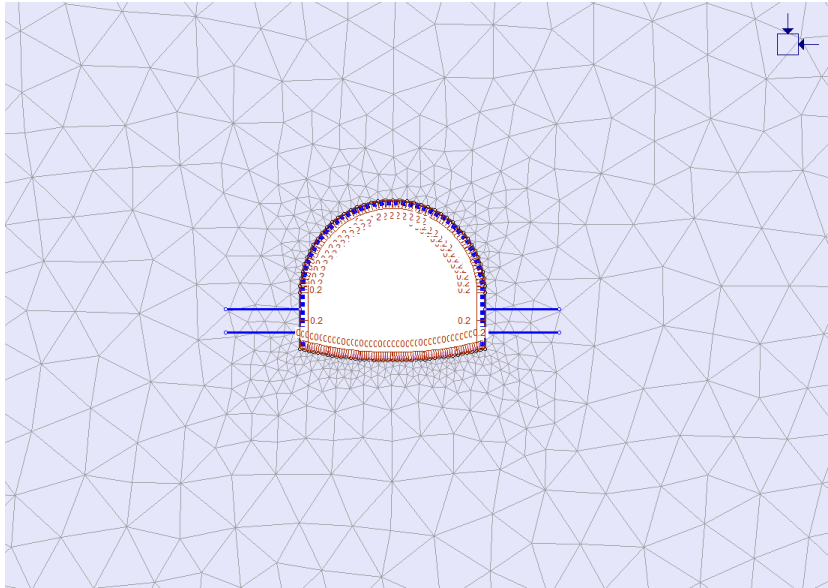


Viene rimosso il materiale per simulare l'attività di scavo della galleria, introducendo un coefficiente di rilassamento basato sulla pressione interna ricavata



# ESEMPIO: simulazione di una fase di scavo

## Supporto



**Define Liner Properties**

Name: Primary Support    Colour: [Blue]

Liner Type: Reinforced Concrete

Reinforcement    Common Types [...]

Spacing (m): 1

Section Depth (m): 0.18

Area (m<sup>2</sup>): 0.0052

Moment of Inertia (m<sup>4</sup>): 2.9e-005

Young's Modulus (MPa): 200000

Poisson Ratio: 0.3

Compressive Strength (MPa): 275

Tensile Strength (MPa): 275

Weight (kg/m): 21.9

Stage Concrete Properties

Concrete

Thickness (m): 0.3

Young's Modulus (MPa): 30000

Poisson Ratio: 0.25

Compressive Strength (MPa): 25

Tensile Strength (MPa): 1

Unit Weight (MN/m<sup>3</sup>): 0.024

Material Type:  Elastic     Plastic

Include Weight in Analysis

Sliding Gap

Strain at Locking: 5 %

Beam Element Formulation: Timoshenko

Copy To...     Show only properties used in model    OK    Cancel

**Define Bolt Properties**

Bolt 1    Bolt Colour: [Blue]

Bolt Properties

Bolt Type: End Anchored

Bolt Diameter (mm): 34

Bolt Modulus, E (MPa): 200000

Tensile Capacity (MN): 0.33

Residual Tensile Capacity (MN): 0

Out-of-plane Spacing (m): 1

Face Plates

Attached Face Plates

Add Pull-Out Force

Force (MN): 0

Constant Shear Stiffness

Stiffness (MN/m): 0

Add Bulges

Define Bulges...

Bond Length

Percent of Length: 20

Length (m): 1

Secondary Bond Length [Define...]

Bolt Model

Elastic     Plastic     Joint Shear

Pre-Tensioning

Pre-Tensioning Force (MN): 0     Constant Force in Install Stage

Copy To...     Show only properties used in model    OK    Cancel

Si inserisce il rivestimento di calotta e un set di bulloni per ciascun lato. Il rivestimento è inserito come materiale composito per permetterne l'attivazione in stage successivi (rivestimento di prima fase + rivestimento definitivo)

**Define Composite Properties**

Primary+FinalLining    Composite 2    Composite 3    Composite 4

Name: Primary+FinalLining    Colour: [Blue]

Composite Type: 2 liners

First Liner: Primary Support

Second Liner: Cal installed 2 stages after First Liner

Show only properties used in model    OK    Cancel

**Summary of Properties**

**Primary Support**

Liner Type: Reinforced Concrete

Formulation: Timoshenko

Reinforcement:

Type: I-beam(HE Europe): INP 180

Spacing: 1 m

Section depth: 0.18 m

Area: 0.0052 m<sup>2</sup>

Moment of inertia: 2.9e-005 m<sup>4</sup>

Young's modulus: 200000 MPa

Poisson ratio: 0.3

Compressive strength: 275 MPa

Tensile strength: 275 MPa

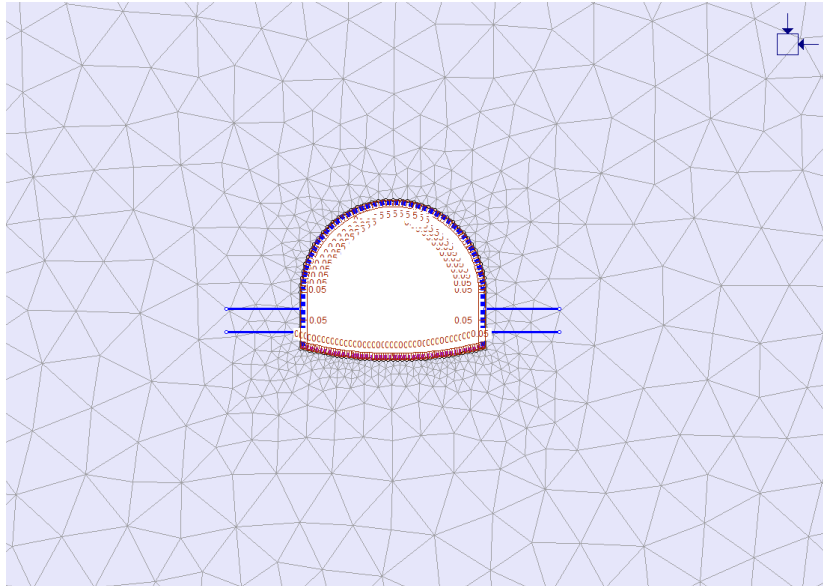
Weight: 21.9 kg/m

Concrete:

Thickness: 0.3 m

## ESEMPIO: simulazione di una fase di scavo

### Arco rovescio



Viene aggiunto l'arco rovescio per completare il rivestimento del cavo

Define Liner Properties

Primary Support Arov Liner 3 Liner 4 Liner 5 Liner 6 Liner 7 Liner 8

Name: Arov Colour: [Purple] Liner Type: Reinforced Concrete

Reinforcement Common Types

Spacing (m): 1  
 Section Depth (m): 0.7  
 Area (m2): 0.000628  
 Moment of Inertia (m4): 7.6946e-005  
 Young's Modulus (MPa): 200000  
 Poisson Ratio: 0.3  
 Compressive Strength (MPa): 275  
 Tensile Strength (MPa): 275  
 Weight (kg/m): 4.94  
 Rebar(Europe): #20 (diameter=20mm)

Stage Concrete Properties

Concrete

Thickness (m): 0.8  
 Young's Modulus (MPa): 33000  
 Poisson Ratio: 0.2  
 Compressive Strength (MPa): 30  
 Tensile Strength (MPa): 1  
 Unit Weight (MN/m3): 0.024

Material Type:  Elastic  Plastic

Include Weight in Analysis

Sliding Gap

Strain at Locking: 5 %

Beam Element Formulation: Timoshenko

Copy To...  Show only properties used in model

OK Cancel

Reinforcement

Shape: I-beam Lattice girder Hollow section Rebar Wire Mesh Channel Dbl Channel

Type: US Canada Europe

Rebar Depth d (mm): 700  
 Area (mm2): 628  
 Moment of Inertia (10e6mm4): 10.145  
 Weight (kg/m): 4.94

Designation (Metric)

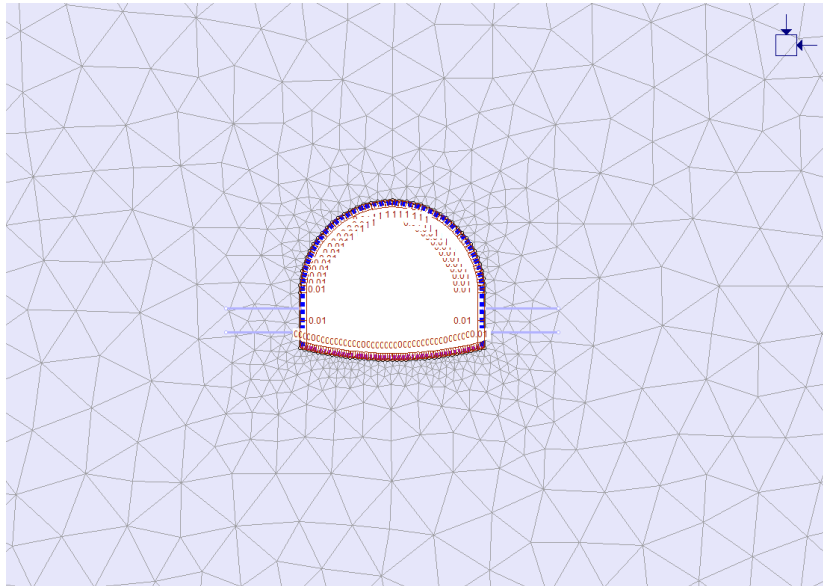
- #6 (diameter=6mm)
- #8 (diameter=8mm)
- #10 (diameter=10mm)
- #12 (diameter=12mm)
- #14 (diameter=14mm)
- #16 (diameter=16mm)
- #20 (diameter=20mm)
- #25 (diameter=25mm)
- #28 (diameter=28mm)
- #32 (diameter=32mm)
- #40 (diameter=40mm)
- #50 (diameter=50mm)

Imperial  Metric

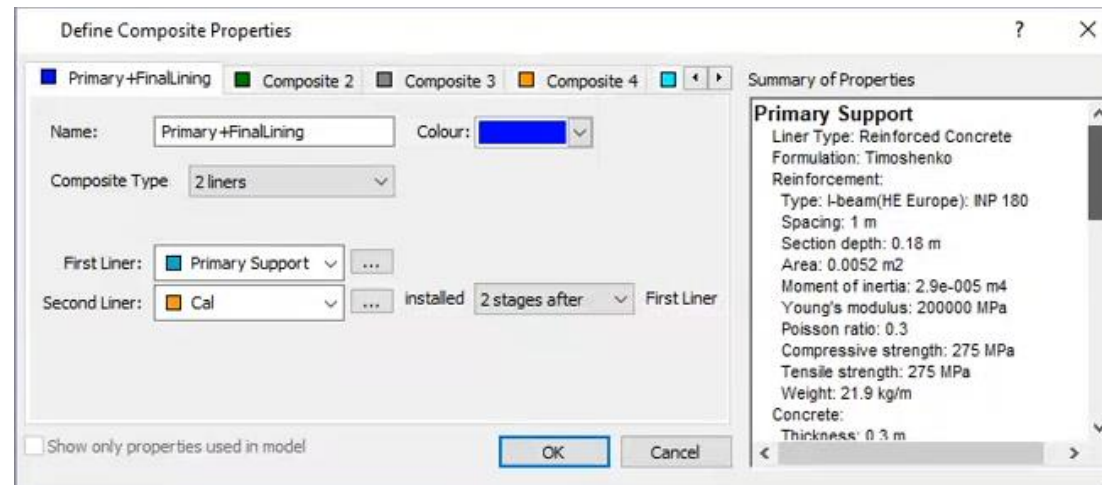
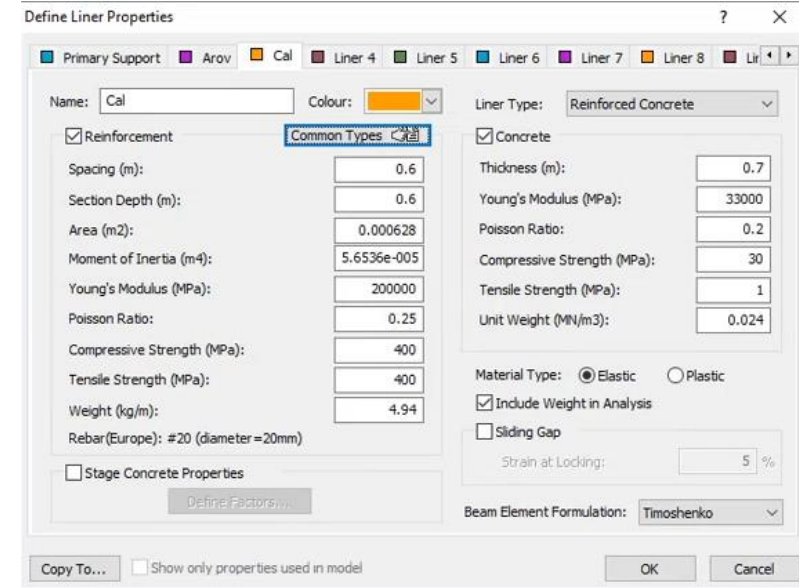
Edit Database... OK Cancel

# ESEMPIO: simulazione di una fase di scavo

## Rivestimento definitivo



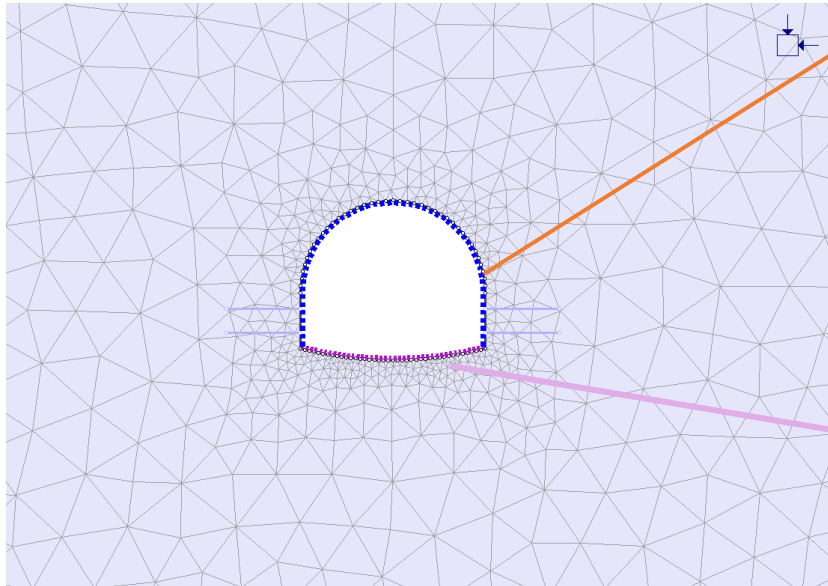
Viene qui attivato il rivestimento definitivo, precedentemente inserito come lining composito; i bulloni vengono rimossi dal calcolo





# ESEMPIO: simulazione di una fase di scavo

## Rilassamento



Define Liner Properties

Primary Support Arov Cal Liner 4 Liner 5 Liner 6 Liner 7 Liner 8 Liner 9

Name: Cal Colour:  Liner Type: Reinforced Concrete

Reinforcement Common Types

Spacing (m): 0.6  
 Section Depth (m): 0.6  
 Area (m<sup>2</sup>): 0.000628  
 Moment of Inertia (m<sup>4</sup>): 5.6536e-005  
 Young's Modulus (MPa): 200000  
 Poisson Ratio: 0.25  
 Compressive Strength (MPa): 400  
 Tensile Strength (MPa): 400  
 Weight (kg/m): 4.94  
 Rebar(Europe): #20 (diameter=20mm)

Stage Concrete Properties

Define Factors...

Show only properties used in model

Concrete

Thickness (m): 0.7  
 Young's Modulus (MPa): 33000  
 Poisson Ratio: 0.2  
 Compressive Strength (MPa): 30  
 Tensile Strength (MPa): 1  
 Unit Weight (MN/m<sup>3</sup>): 0.024

Material Type:  Elastic  Plastic

Include Weight in Analysis

Sliding Gap

Strain at Locking: 5 %

Beam Element Formulation: Timoshenko

Define Liner Properties

Primary Support Arov Liner 3 Liner 4 Liner 5 Liner 6 Liner 7 Liner 8 Liner 9

Name: Arov Colour:  Liner Type: Reinforced Concrete

Reinforcement Common Types

Spacing (m): 1  
 Section Depth (m): 0.7  
 Area (m<sup>2</sup>): 0.000628  
 Moment of Inertia (m<sup>4</sup>): 7.6946e-005  
 Young's Modulus (MPa): 200000  
 Poisson Ratio: 0.3  
 Compressive Strength (MPa): 275  
 Tensile Strength (MPa): 275  
 Weight (kg/m): 4.94  
 Rebar(Europe): #20 (diameter=20mm)

Stage Concrete Properties

Define Factors...

Show only properties used in model

Concrete

Thickness (m): 0.8  
 Young's Modulus (MPa): 33000  
 Poisson Ratio: 0.2  
 Compressive Strength (MPa): 30  
 Tensile Strength (MPa): 1  
 Unit Weight (MN/m<sup>3</sup>): 0.024

Material Type:  Elastic  Plastic

Include Weight in Analysis

Sliding Gap

Strain at Locking: 5 %

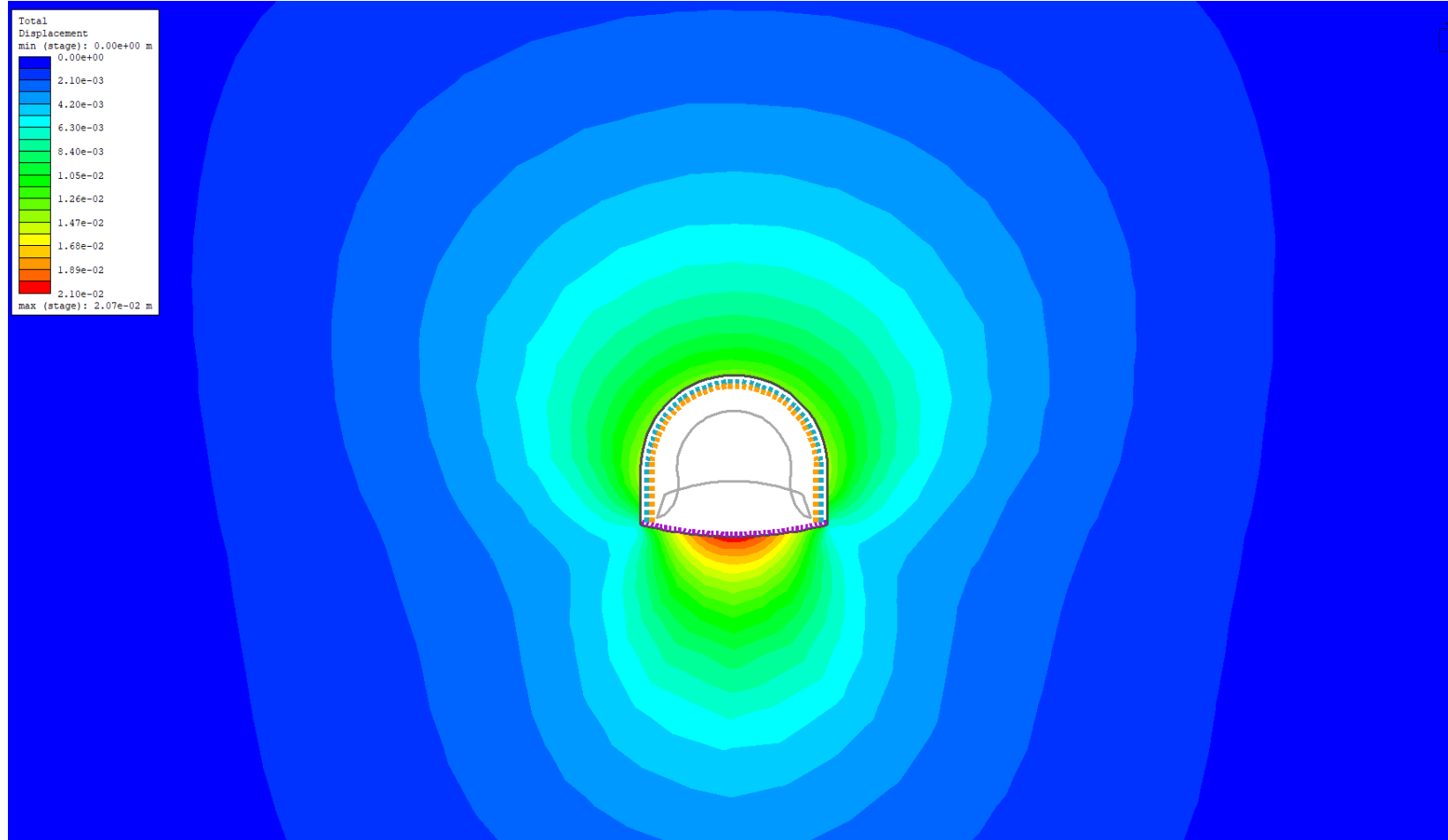
Beam Element Formulation: Timoshenko

In fine si arriva al rilassamento dell'area scavata a seguito dell'installazione del rivestimento finale (il coefficiente di rilassamento è nullo)

## ESEMPIO: simulazione di una fase di scavo

### Risultati

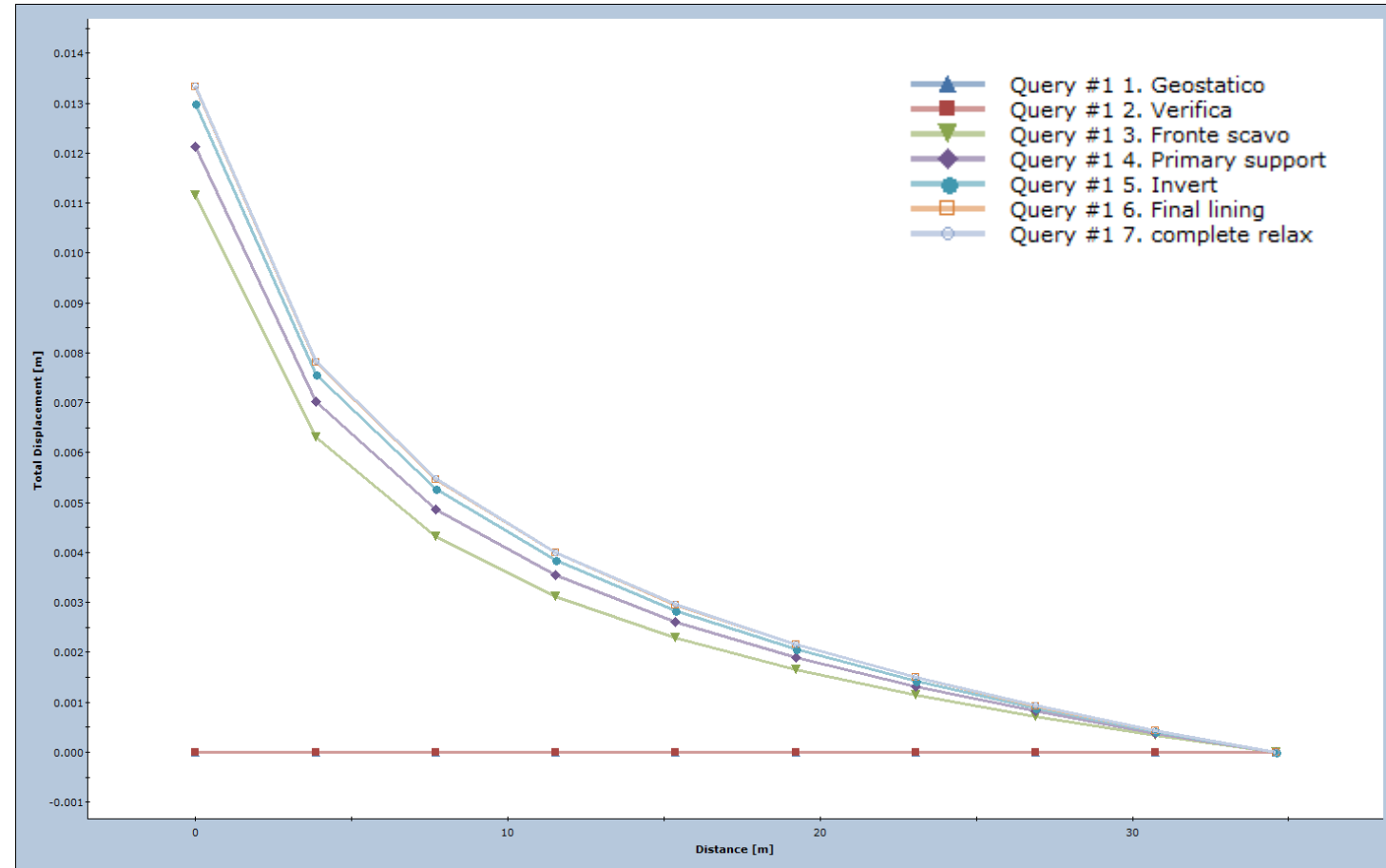
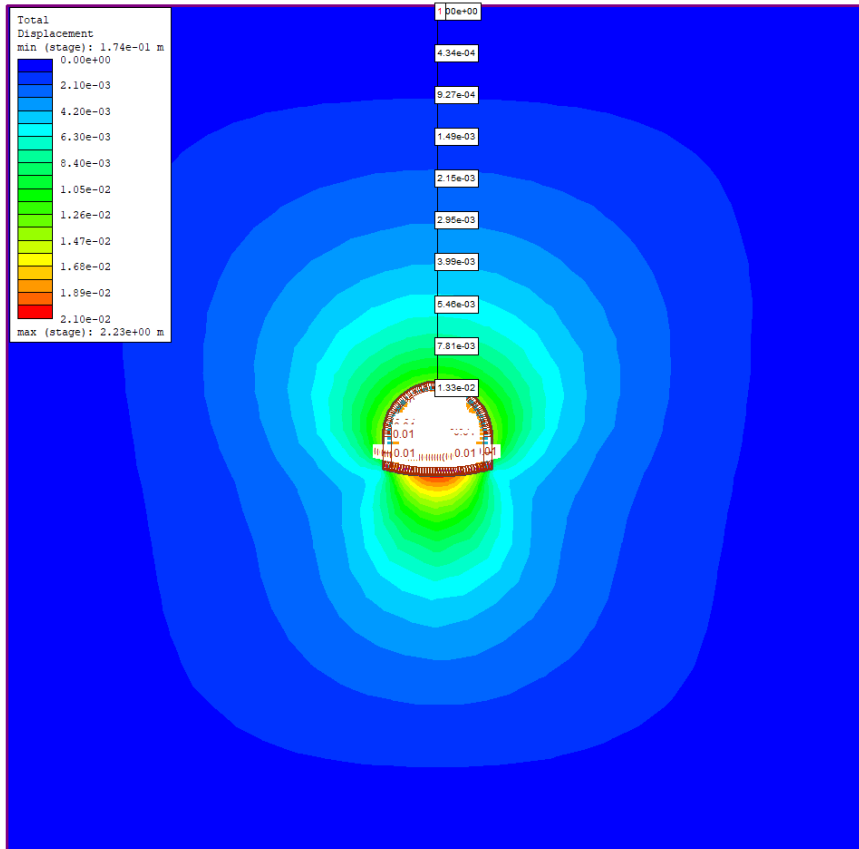
Sezione deformata



# ESEMPIO: simulazione di una fase di scavo

## Risultati

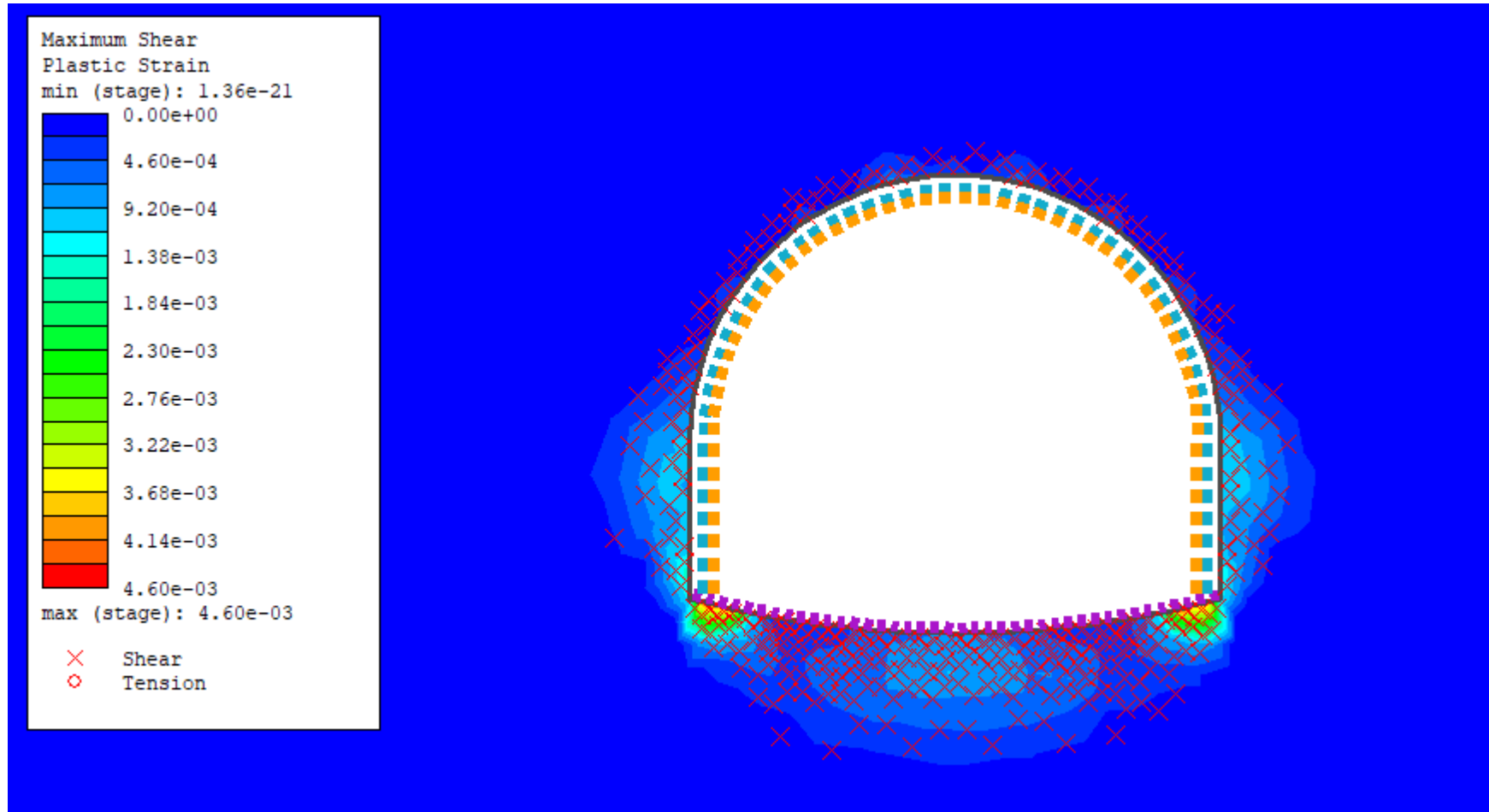
### Spostamenti



## ESEMPIO: simulazione di una fase di scavo

### Risultati

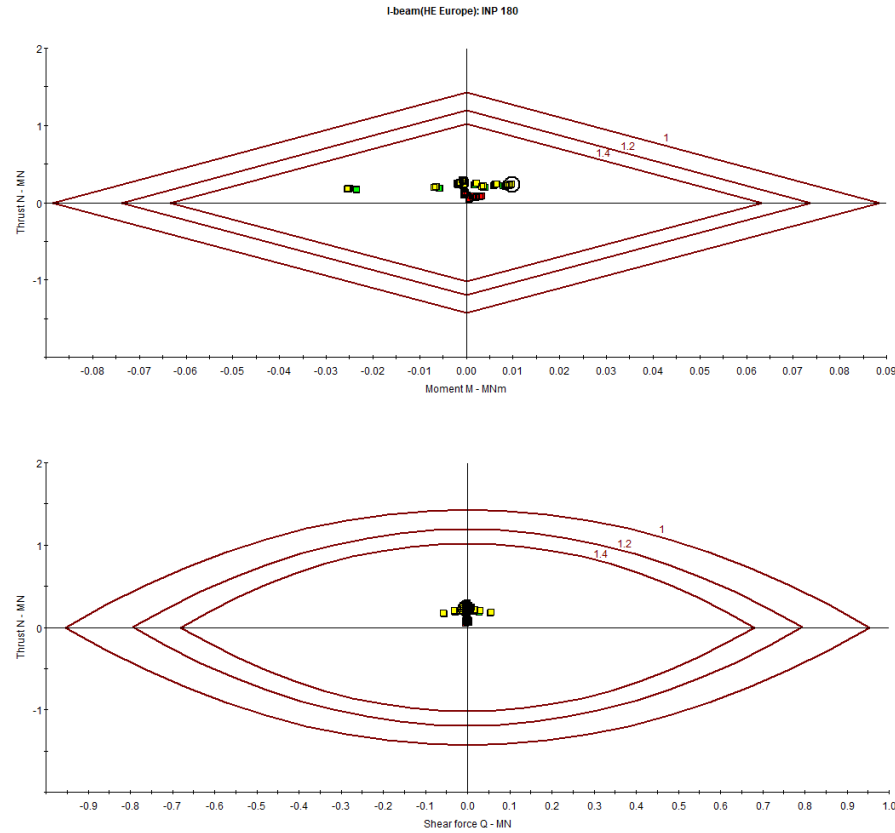
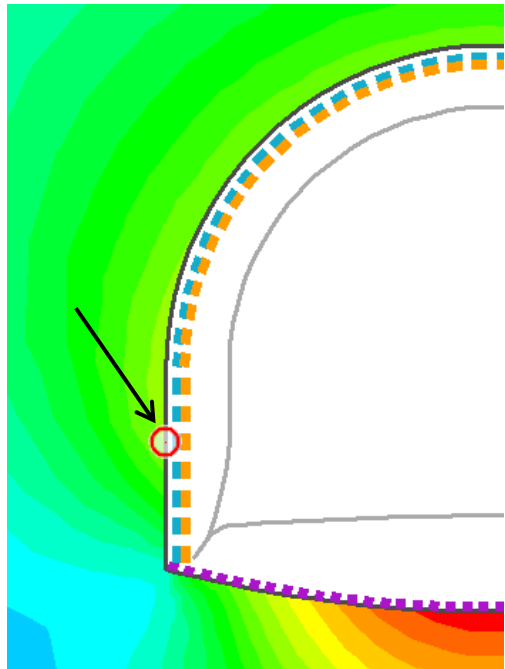
Elementi plasticizzati al  
contorno dello scavo



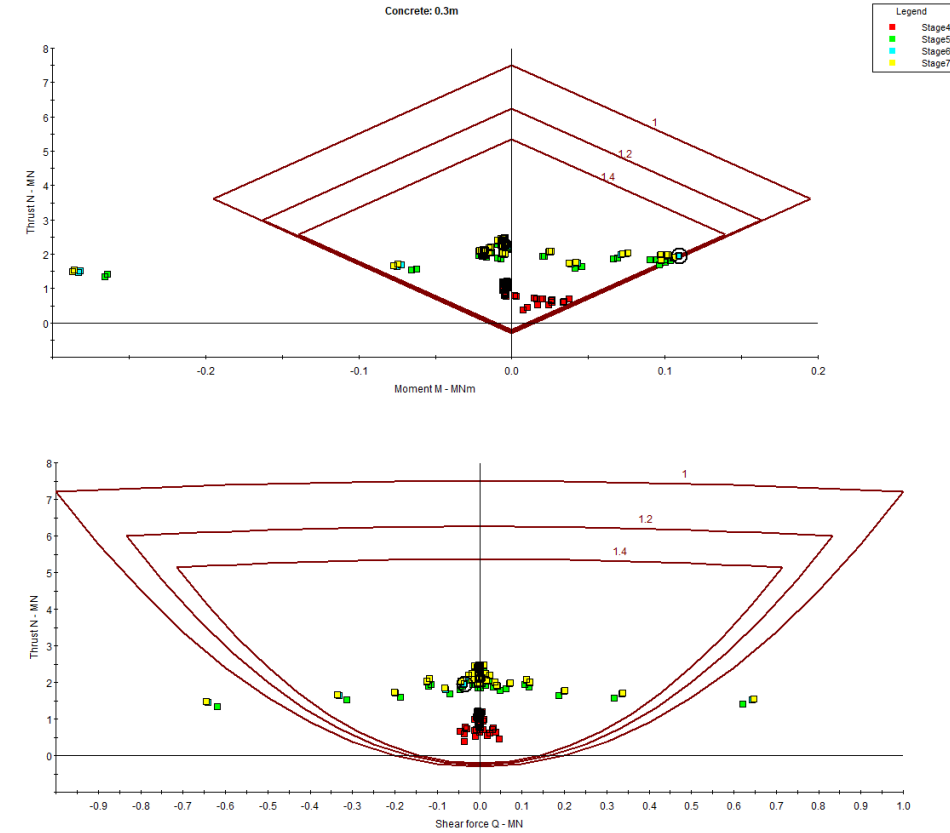
## ESEMPIO: simulazione di una fase di scavo

### Risultati

Verifica strutturale degli elementi di supporto (e.g. rivestimento di prima fase)



Support Element: Primary Support



## CASO DI STUDIO: Impianto idroelettrico in Africa

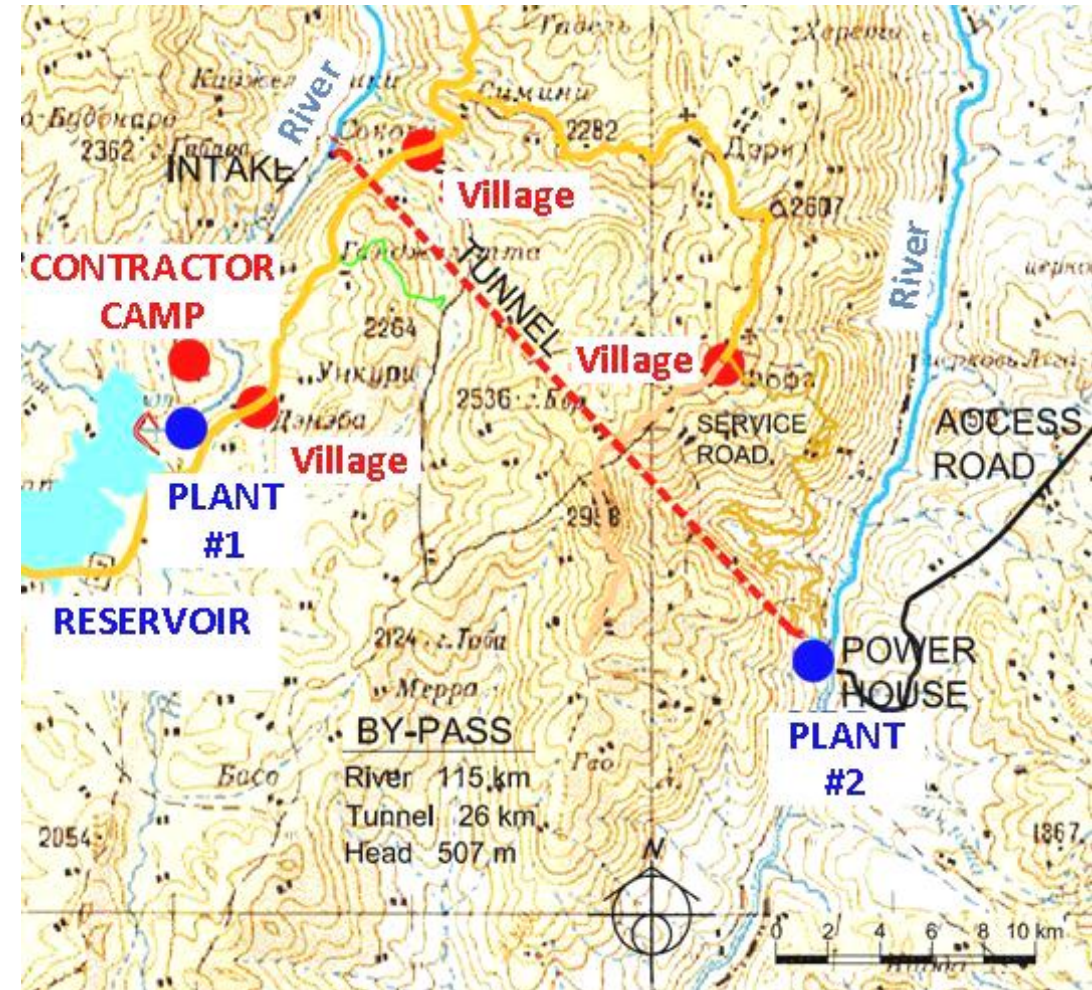
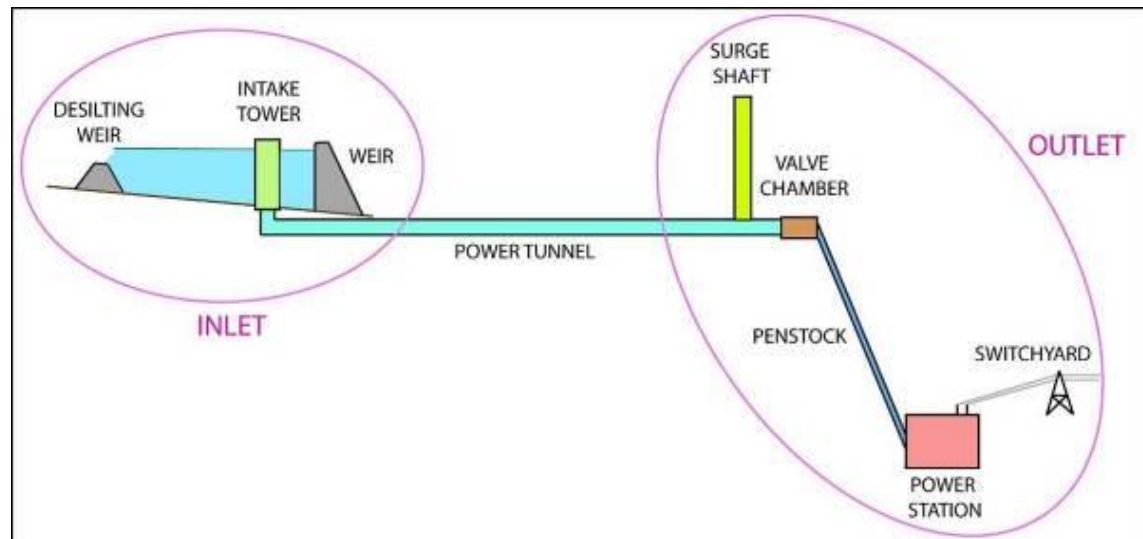
### General layout

Power tunnel

Length ~ 26 km

Max overburden ~ 1.8 km

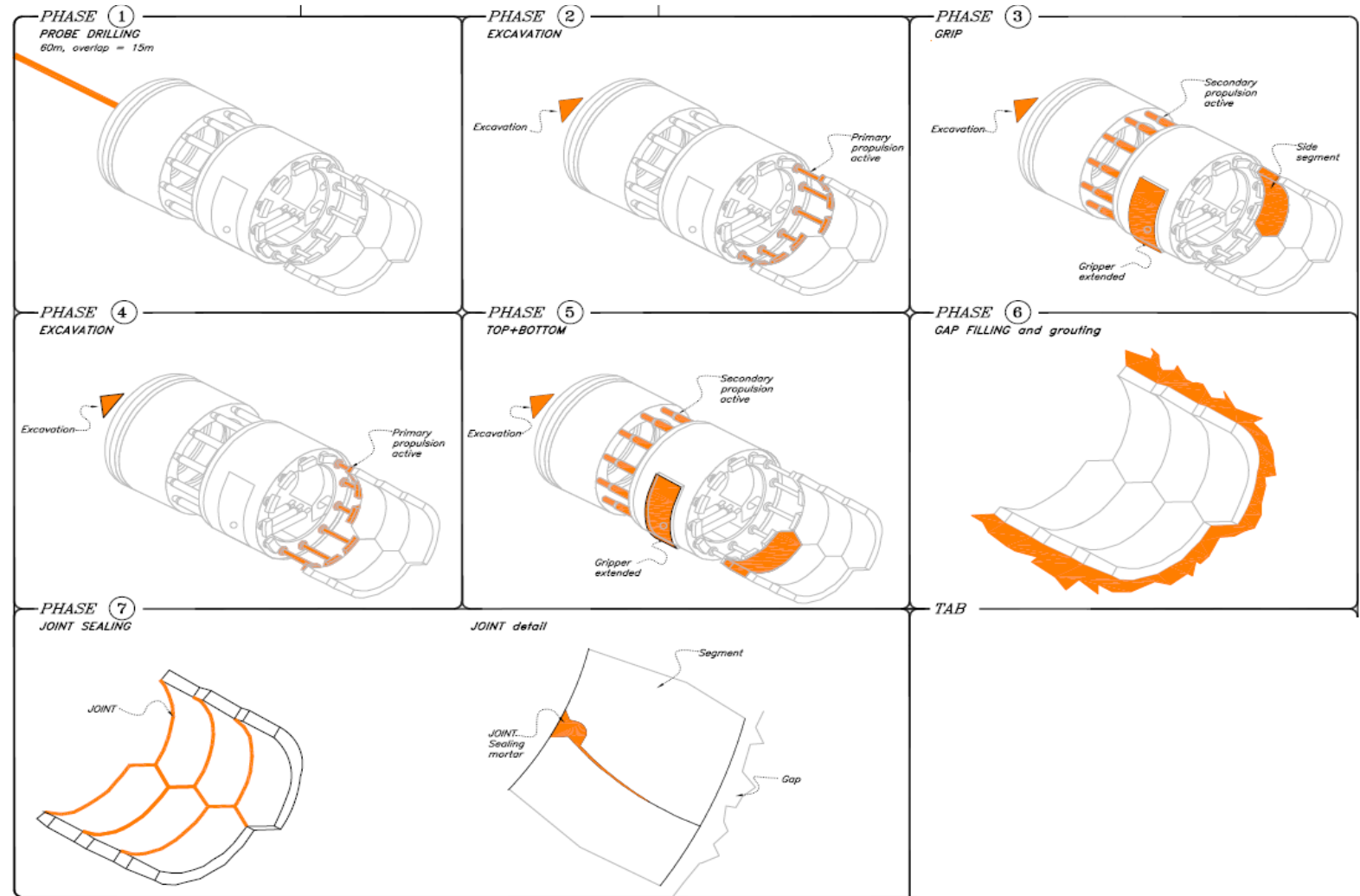
Tunnel diameter ~ 7 m



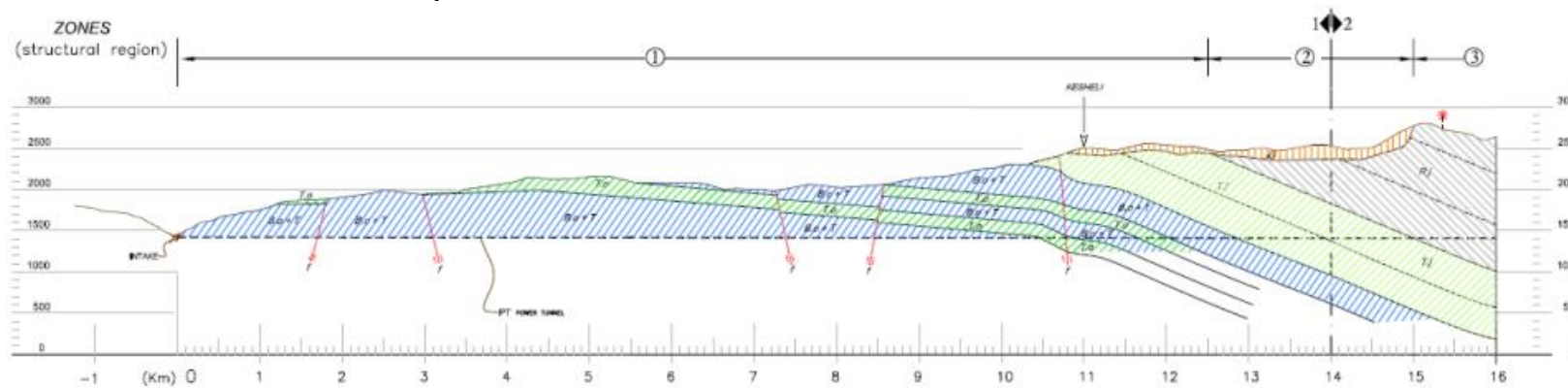
## CASO DI STUDIO: Impianto idroelettrico in Africa

### Tunnelling method: DSU-TBM

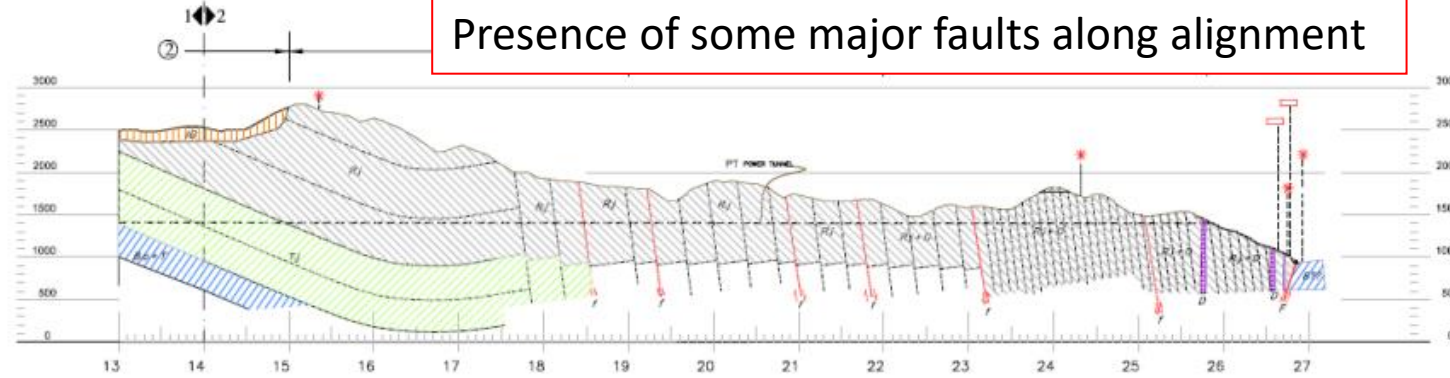
- Double shield machine, open mode
- Use of # 2 TBM (inlet/outlet)
- Annular void backfill  
I injection peagravel  
+  
II injection (mortar)



# CASO DI STUDIO: Impianto idroelettrico in Africa



Presence of some major faults along alignment



**LEGEND**

<p><b>Rj</b> IG NIMBRITES of the RIFT (Pliocene) —ignimbrites with interbedded Tuffs + Kaolinitic Soils</p> <p><b>D</b> DYKES (Late Miocene) —Dykes both basic (dolerite) and acidic (syenite), from few cm to 50 m thickness and perhaps bigger, intruded into Jima-Volcanic layers.</p>	<p><b>JIMA VOLCANICS (Oligocene – Miocene)</b></p> <p><b>Rj</b> RHYOLITE and RHYOLITE – BRECCIA, with rare intercalations of Tuff (Rj) (+ D = DEL DIKES)</p> <p><b>Tj</b> TRACHYTE and TRACHY-Rhyolite (Tj)</p>	<p><b>OMO VOLCANICS (Oligocene–Miocene)</b></p> <p><b>Bj+T</b> BASALT OF OMO FORMATION, (WITH VOLCANIC BRECCIA, TUFF, PALAEO SOIL, MINOR TRACHYTE)</p> <p><b>Bj</b> BASALT EXPOSED IN OMO RIVER BED, AGE UNCERTAIN MAY BE FAULT OF OMO FORMATION OR TWOLLAGA</p> <p><b>Lj</b> TRACHYTE OF OMO FORMATION (MAPPED AS CONTINUOUS LAYERS)</p>	<p><b>f</b> - AIR PHOTO LINEAMENT, MAY CORRESPOND TO FAULT</p> <p><b>F</b> - MAJOR FAULT ALONG OMO GORGE</p> <p><b>*</b> LABORATORY TEST</p> <p><b>□</b> RMR</p>
---	---	---	--

Foreseen geology:

Basalts and volcanic rocks



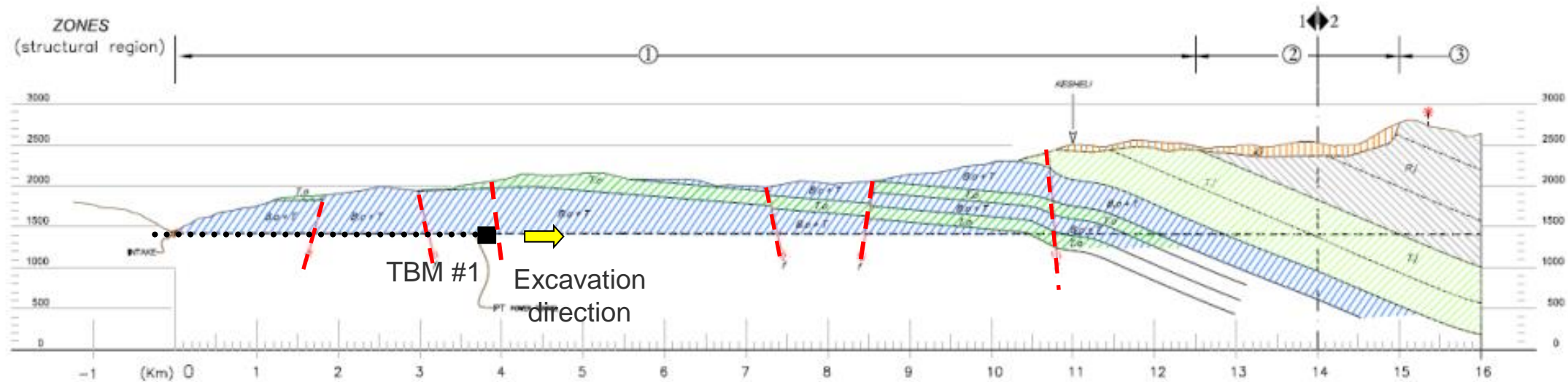
## CASO DI STUDIO: Impianto idroelettrico in Africa

### EVENT AT THE CHAINAGE ~4+200 FROM INTAKE HEADING

The rock-mass cover was about 800m.

Unexpected long fault zone with high water load was encountered: *~40 bars of mud (400 m of water load) acting on the TBM, poured out with a temperature of about 40° C*

The TBM was pushed back more than 60 cm and displaced laterally more than 40 cm as consequence of the sudden extrusion and collapse of the tunnel face against the cutterhead and the front shield.



## CASO DI STUDIO: Impianto idroelettrico in Africa

### EVENT AT THE CHAINAGE ~4+200 FROM INTAKE HEADING

The TBM was pushed back more than 60 cm and displaced laterally more than 40 cm as consequence of the sudden extrusion and collapse of the tunnel face against the cutterhead and the front shield. As a consequence, **severe damages occurred to the shields, the cylinders and the last 7 segment rings installed behind the TBM**. The tunnel face moved 40-60 mm/hour towards the TBM.



### Impact

- Stop of tunnelling works activities from inlet
- High level of damage loss to TBM and to permanent lining
- Delay in starting of service of Hydropower Plant

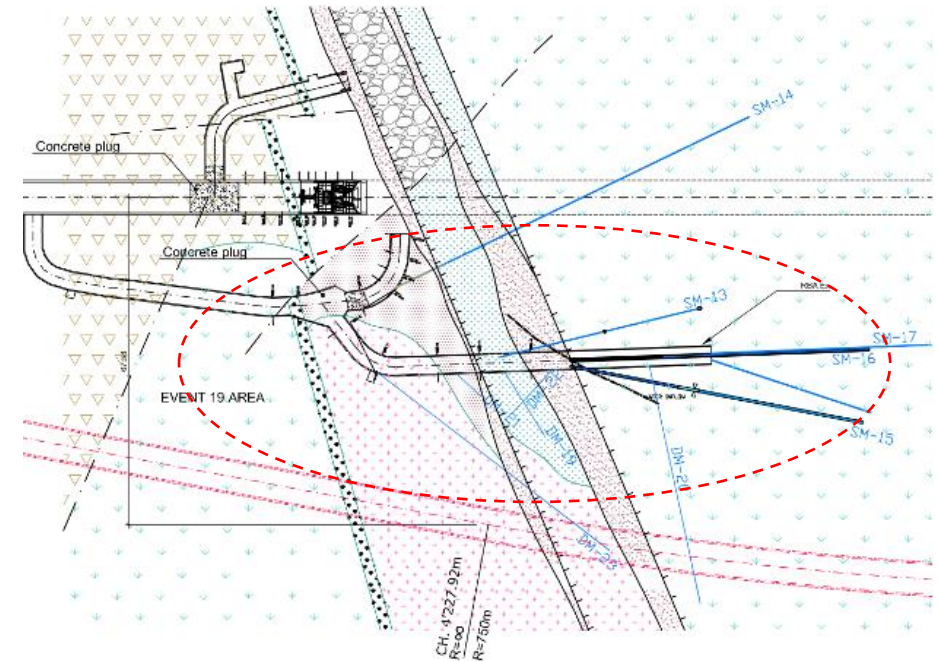
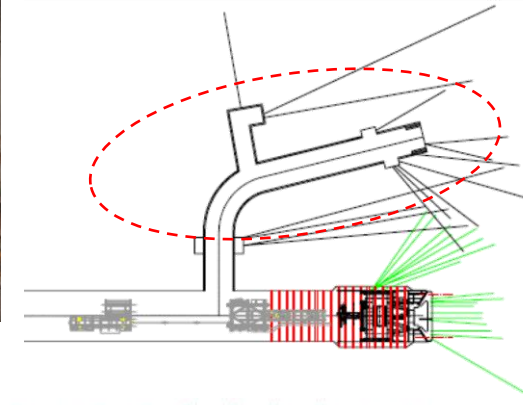
## CASO DI STUDIO: Impianto idroelettrico in Africa

### REMEDIAL MEASURES

- Creation of a Back Chamber to free and dismounting completely the TBM devices (not the shield!) → top-drift excavation & successive enlargement
- Execution of a by-pass (Explorative Tunnel) in order to execute additional investigations boreholes and drainages
- Execution of the new alignment to by-pass the fault.

### The rescue work included:

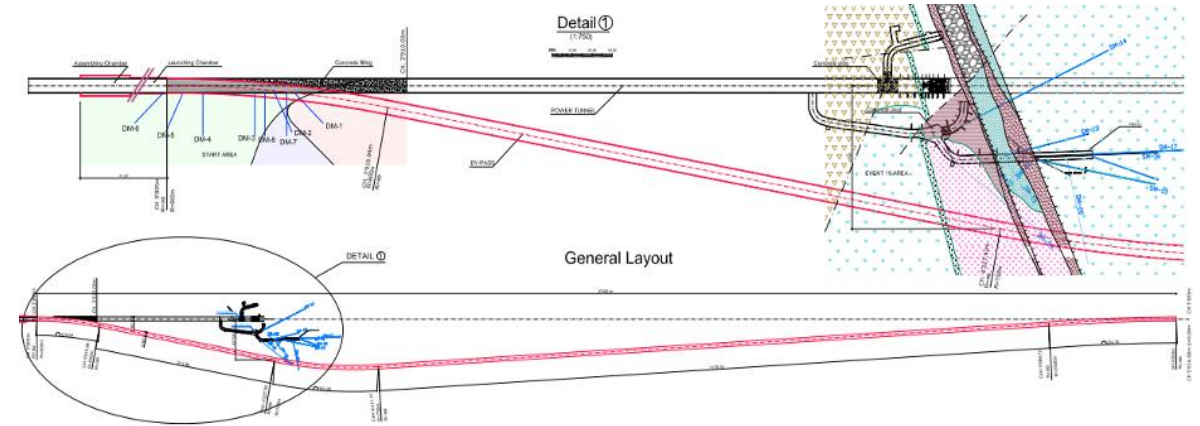
- 230 m of by-pass tunnels;
- removal of 39.600 m<sup>3</sup> of mud out of the tunnel;
- drilling of 1.600 m of drainage/exploratory holes.



## CASO DI STUDIO: Impianto idroelettrico in Africa

### REMEDIAL MEASURES

- The TBM was dismantled and transported outside (not the TBM shield, that was lost). Then, progressively, reparation and modification at the external yard proceeded regularly. Then the TBM was reassembled a few hundreds meters behind the fault.
- From there, it started again and followed a new alignment to by-pass the fault.
- Two years of hard work and special measures were necessary to recover the situation.



→ Loss ~ 7 Mio EUR ←

## CASO DI STUDIO: Impianto idroelettrico in Africa

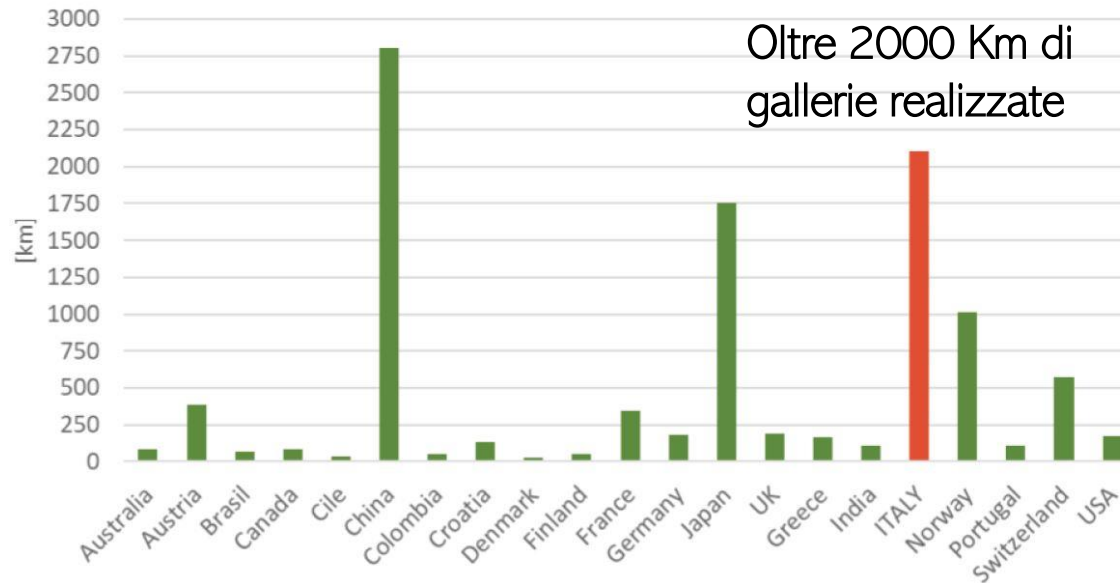
### Possible causes

- Very complex morphological condition (long and deep tunnel) → insufficient ground investigation before tunnelling excavation:
  - Surface mapping was applied as prevalent investigation method;
  - Application of subsurface investigations and geophysical techniques in site investigation was very reduced with respect to tunnel length and rock-mass overburden.
- Complex geological and hydrogeological contest
- Insufficient ground investigation during tunnelling excavation
  - Direct investigations: was the probe-drilling ahead of TBM face systematically executed? The drilling activities interfere with the TBM advance...
  - Geophysical techniques in site investigation: geo-electrical probe drilling (Beam system) ahead of TBM face was not executed.
- Absence of a proper Risk Management Plan (RMP)

## L'arte Italiana delle Gallerie

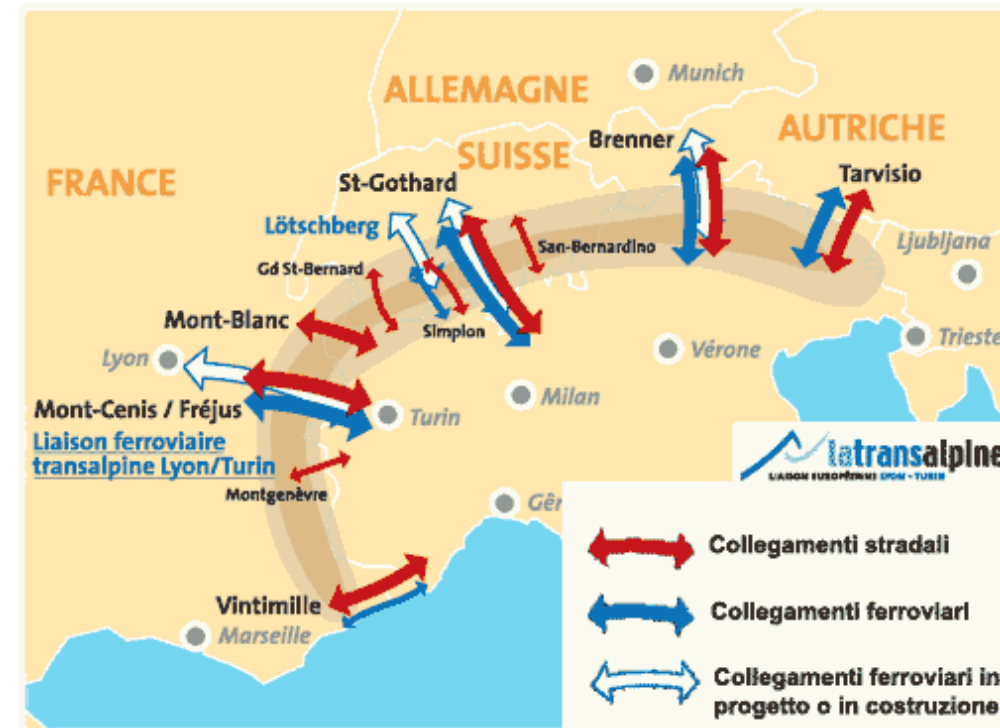
Le gallerie in Italia sono particolarmente diffuse e la tendenza allo scavo del sottosuolo è in forte sviluppo per diversi motivi:

- Orografia del territorio e richiesta sociale di infrastrutture dovuta all'intensa urbanizzazione;
- Innovazioni nelle modalità di scavo e aumentata capacità di esecuzione in condizioni difficili;
- Riduzione dei costi e dei tempi di esecuzione.



## L'arte Italiana delle Gallerie

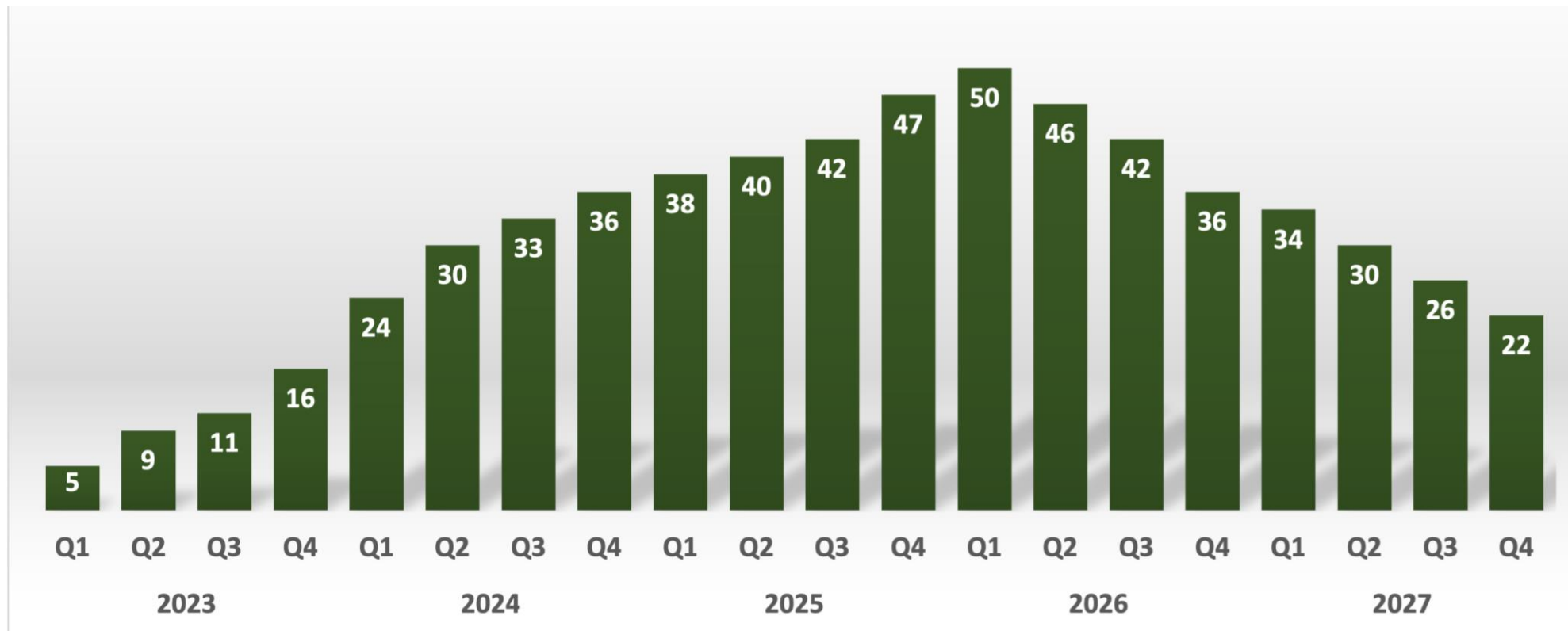
- Tunnel di base del Brennero (55km a doppia canna, che – insieme con la già esistente circonvallazione di Innsbruck adiacente – raggiungerà una lunghezza pari a 64km, diventando il più lungo al mondo)
- Tunnel di base del Moncenisio (57km a doppia canna), che condividerà il podio dei più lunghi al mondo con in tunnel di base del Brennero e del Gottardo.
- Terzo Valico dei Giovi (complessivamente 37 km di gallerie a doppia canna tra Genova e Tortona, tra cui la Galleria di Valico 27 km e la Galleria Serravalle 8 km).
- Ferrovia AC Napoli-Bari (complessivamente più di 60 km di gallerie, tra cui: Galleria Hirpinia 27km, Galleria Orsara 11km, Galleria Monte Aglio 4km, Galleria Grottaminarda 2km, Galleria Melito 4.5 km, Galleria Rocchetta 6.5km).
- Ferrovia AC Verona-Fortezza di approccio al Brennero.
- Ferrovia AC Messina-Catania (8 gallerie di lunghezza complessiva 35km su 42km di tracciato per il raddoppio e la velocizzazione in variante della Giampileri-Fiumefreddo).



[www.societàitalianagallerie.it](http://www.societàitalianagallerie.it)

## L'arte Italiana delle Gallerie – Il Futuro

Previsione del numero di TBM in operazione in Italia nei prossimi anni





## Monitoraggio in galleria

Nella progettazione di strutture in sotterraneo permane una notevole quantità di incertezze dovuta a un gran numero di fattori:

- Incertezze nei parametri geomeccanici;
- Ampie semplificazioni effettuate per modellare il terreno e le sollecitazioni naturali;
- Limitazione delle esplorazioni geologico-geotecniche per motivi finanziari.

Per questo motivo sono necessari sistemi di controllo che consentano di:

- Controllare in corso d'opera le ipotesi prese in fase di progettazione, verificando che le previsioni progettuali del comportamento del terreno corrispondano alla realtà.
- Rilevare in anticipo danni o crolli imminenti, consentendo di prendere provvedimenti per la sicurezza degli operatori o degli utenti.



## Monitoraggio in galleria

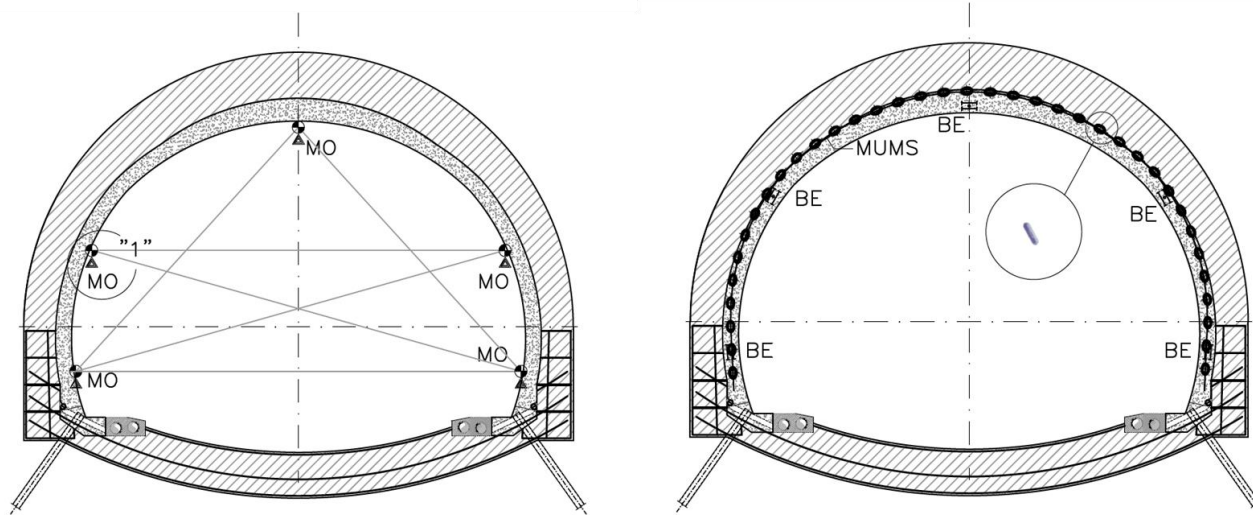
In genere in galleria vengono controllati i seguenti parametri:

Le deformazioni della cavità della galleria in termini di convergenza, estrusione del fronte e cedimento.

- Le deformazioni superficiali del terreno e delle strutture sovrastanti la galleria.
- Forza e pressione agente sul rivestimento preliminare
- Deformazioni e stato tensionale nei rivestimenti (preliminare e definitivo)
- Cedimento in superficie;
- La rotazione del rivestimento finale nel monitoraggio a lungo termine della galleria;
- La rotazione delle strutture preesistenti sopra la galleria;
- Movimenti nell'intorno della galleria e stato di attività movimenti franosi nelle vicinanze dell'opera da realizzare;
- Ammassi rocciosi agli imbocchi;
- Forza sui tiranti e deformazioni paratie tirantate;
- Livello di falda.



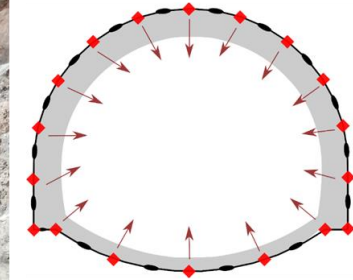
# Monitoraggio in galleria - Convergenza



**RILIEVI TOPOGRAFICI MANUALI O AUTOMATICI**

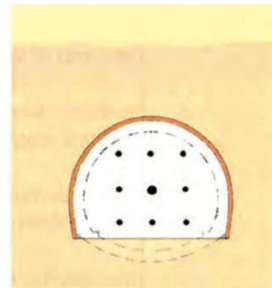
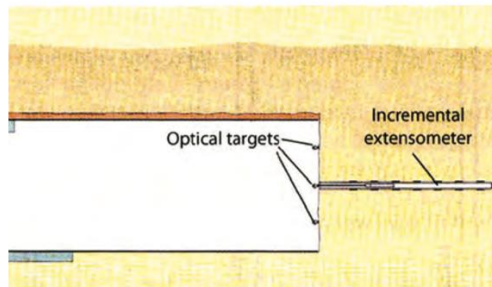
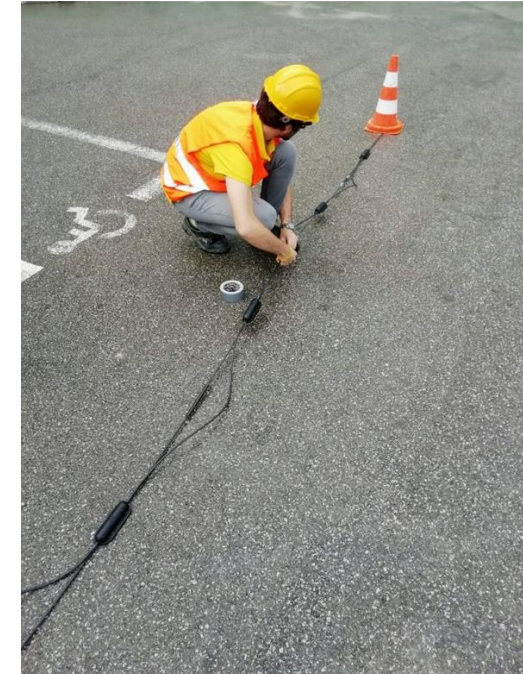
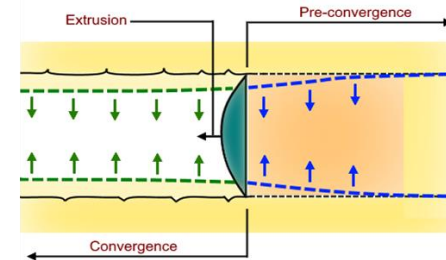


**CATENE DI CONVERGENZA**



**DISTOMETRI**

## Monitoraggio in galleria – Estrusione e preconvergenza



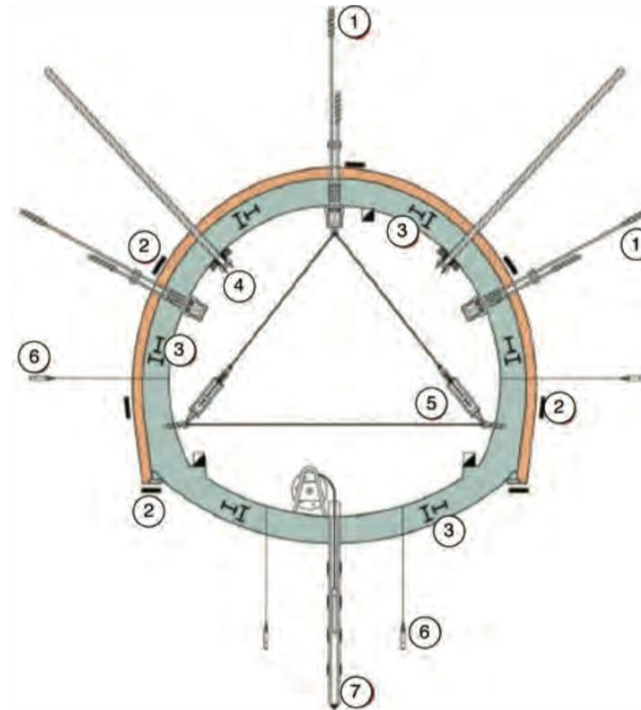
**ESTRUSOMETRI**

**CATENE DI PRECONVERGENZA**

## Monitoraggio in galleria – Forza e pressione agente sul rivestimento preliminare



**CELLE DI CARICO**



- ① Extensometer
- ② Pressure sensor
- ③ Strain gauge
- ④ Load cell
- ⑤ Tape extensometer
- ⑥ Piezometer
- ⑦ Sliding micrometer

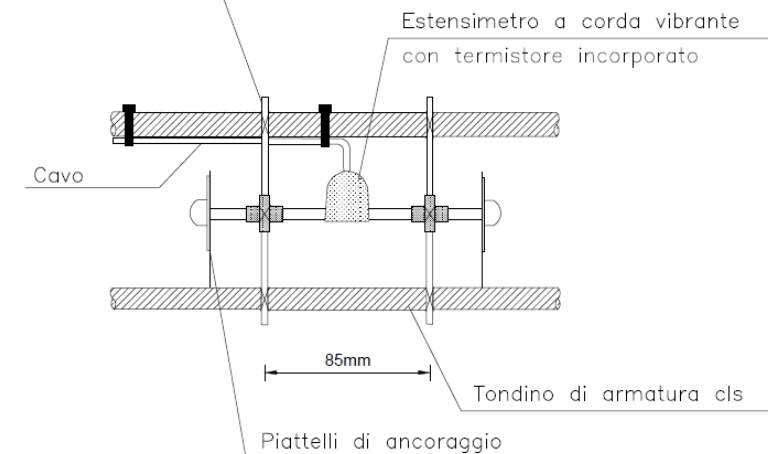


**CELLE DI PRESSIONE**

## Monitoraggio in galleria – Forza e pressione agente sul rivestimento preliminare e definitivo



Barrette di supporto a sezione quadrata 6x6mm





Scuola di dottorato GNIG in Ingegneria Geotecnica 2024

Gaeta, 4-6 settembre 2024

# Grazie per l'attenzione

Dimensionamento di interventi di  
consolidamento in scavi sotterranei

Prof. Andrea Segalini

DIA - Università di Parma



 [andrea.segalini@unipr.it](mailto:andrea.segalini@unipr.it)