



**Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino**

**Appunti universitari**

**Tesi di laurea**

**Cartoleria e cancelleria**

**Stampa file e fotocopie**

**Print on demand**

**Rilegature**

**NUMERO : 323**

**DATA : 20/07/2012**

# **A P P U N T I**

**STUDENTE : Frison**

**MATERIA : Meccanica delle Rocce riassunto**

**Prof. Barla**

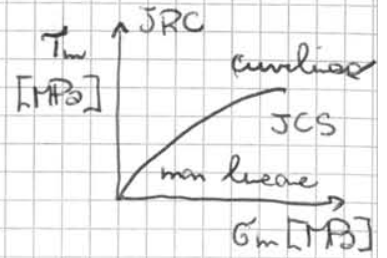
Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

**ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.  
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.**

• CRITERIO DI BARTON → Res taglio

$$\tau = \sigma \cdot \tan \left[ JRC \cdot \log_{10} \left( \frac{JCS}{\sigma} \right) + \varphi_b \right]$$



- JRC: coeff. scabrezza [-]
- JCS: resist. compress. sulla parete del giunto [MPa]
- $\varphi_b$ : angolo di attrito di base [°]

• CRITERIO DI BARTON - BANDIS → Res taglio

$$\tau = \sigma'_m \cdot \tan \left[ \varphi'_v + JRC_m \log_{10} \left( \frac{JCS_m}{\sigma'_m} \right) + i_m \right]$$

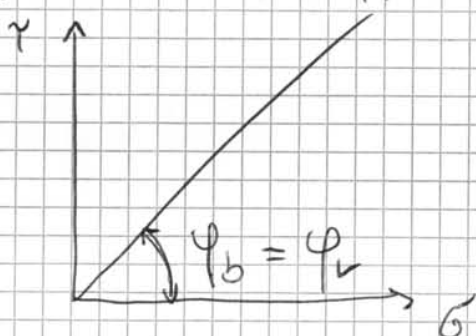
- JRC<sub>m</sub>: coeff. scabrezza alla scala reale del problema [-]
- JCS<sub>m</sub>: coeff. rapp. resist. delle pareti a contatto alla scala reale del problema. [MPa]
- $\varphi'_v$ : angolo di attrito residuo [°]
- $i_m$ : angolo esatt. oscillazione giunti [°]

1 CRITERIO DI BARTON

CRITERI DI RESISTENZA  
PER LE DISCONTINUITÀ

2 CRITERIO DI BARTON - BANDIS

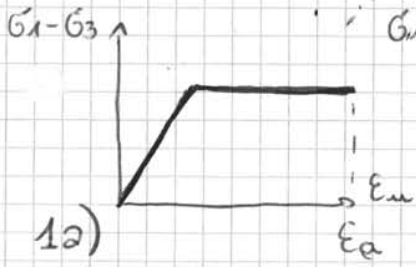
- $\varphi_b$ : presa effettuata su superf. liscia
- $\varphi_v$ : presa effettuata su superf. naturale liscia



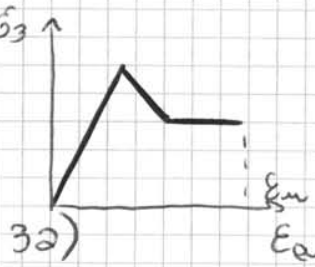
In MECCANICA DELLE ROCCE:

ELPLA

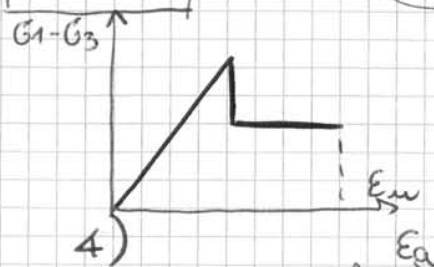
(H-B) 1997



12) idealmente plastica  
A.R. qualità scadente molto scadente



32) duttile  
A.R. qualità medie.



4) idealmente fragile  
A.R. qualità molto buone.

MODELLO ELASTICO IDEALMENTE FRAGILE  
decremento istantaneo dei parametri di resistenza con aumento della componente plastica della deformazione.

$\epsilon_u$ : deformazione ultima

CRITERIO DI RESIST. (1) → PICCO (2) → RESIDUO

5)

• **COMPORAMENTO RIGONFIANTE (SWELLING)**: incremento di volume dipendente dal tempo, causato da reazioni chimico-fisiche di alcuni materiali/minerali contenuti nella roccia con l'acqua (ISRM 1983).

→ Rocce con argilla e anidrite.

→ Rigonfiamento può svilupparsi R.I.

(2) nel materiale riempito delle discontinuità.

CONFRONTARE I RISULTATI

ANALISI LABORAT.

PROVE IN SITO

- **MODELLO GEOTECNICO:** → Scelta  
 Schematizzazione ingegneristica della realtà in grado di descrivere gli elementi fondamentali di competenza A.R., ottenuta combinando insieme le informazioni derivanti dalla caratt. geotecnica.

A.R.: **MODELLI**

→ **CONTINUO:** (A.R. con mezzo terreno)

- dominio si comporta come un mezzo continuo
- non è possibile considerare l'effetto di discontinuità localizzate.

→ **DISCONTINUO:** (struttura A.R. governa il comportam. termo-deformativo)

- dominio considerato composto da una matrice di R.I. e da discontinuità localizzate (giunti e interfacce).

→ **CONTINUO EQUIVALENTE:** → (A.R. come Mezzo Cont. Eq.)  
 $\text{IHE} \leftarrow \text{L} \rightarrow \text{EL-PIA}$

- mezzo per sua natura discontinuo viene restituito, ai fini del calcolo, con un continuo le cui proprietà sono tali che il suo comportamento corrisponda a quello del mezzo reale.

In Mezzo Reale: → **DISCONTINUO**

SCELTA ( → **CONTINUO EQUIVALENTE** )

PER ( → spaziotempo  
 → orientazione )

dimensioni del probl. → resist. discontinuità  
 → dati termico in situ.

• CLASSIFICAZIONE A.R.: (vedi base appunti)

- METODI:
- 1) RSR (Klickham)
  - 2) RMR (Bieniawski)
  - 3) Q (Barton)
  - 4) GSI (Hoek)

$$RMR = \sum 6 \text{ parametri}$$

$$Q = \frac{RQD}{J_w} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_e}{SRF} \quad \rightarrow \quad Q_c = Q \frac{C_w}{100}$$

$$GSI \text{ da tabella} \quad / \quad \text{oppure} \quad GSI = RMR - 5$$

se:

1° venute d'acqua = 15

2° 6° parametri = 0

Se  $GSI < 25$  non è possibile determ. RMR.

→ Correlazione tra indici di classificazione:

①  $GSI = RMR - 5$

②  $RMR = 9 \ln Q + 44$



2) A.R.

→ HOEK - BRÖNN:

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

$$m_b = m_i \cdot e^{\frac{\sigma_{SI} - 100}{28}}$$

$$S_b = e^{\frac{\sigma_{SI} - 100}{9}} \rightarrow \text{per } \sigma_{SI} < 25, S_b = 0$$

$$\alpha = 0,5 \quad (\sigma_{SI} > 25)$$

$$\alpha = 0,65 - \frac{\sigma_{SI}}{200} \quad (\sigma_{SI} < 25)$$

$$\sigma_{cm} = \sigma_{ci} \cdot \sqrt{D_b}$$

$$\sigma_{tm} = \frac{\sigma_{ci}}{2} \cdot \left( m_b - \sqrt{m_b^2 + 4D_b} \right)$$

→ MOHR - COULOMB: → = R.I.

$$c_0 = \sigma_{cm} = \frac{2 c' \cos \varphi'}{1 - \sin \varphi'}$$

$\left. \begin{array}{l} c' : \text{coefficiente [MPa]} \\ \varphi' : \text{angolo resist. taglio [}^\circ \text{]} \end{array} \right\} \text{A.R.}$

X R.I.

1  $m_b = m_i$

2  $S = 1$

3  $\alpha = 0,5$

$N_\varphi \rightarrow \varphi'$

$\varphi' = 2 \cdot (45^\circ + \arctan N_\varphi)$

$c_0 \Rightarrow c'$

$$c' = \frac{c_0 \cdot (1 - \sin \varphi')}{2 \cdot \cos \varphi'}$$

→ ~~linearizzazione~~ H-B: 8 coppie di valori  $\sigma_3' - \sigma_1'$  equid.

CAMPO DI

APPLICAZIONE:

$$0 < \sigma_3' < 0,25 \sigma_{ci}$$

↓  
integraz.  
lineare

$$\sigma_1 = \underbrace{\sigma_{cm}}_{L_3 c'} + N_\varphi \underbrace{\sigma_3'}_{L_3 \varphi'}$$

) da Mohr - Coulomb

# MODULO

1) MODULI DI DEFORMAZIONE A.R. → **(ILE)** [GP<sub>3</sub>]

2) BIENIAWSKI:

$$E_d = (2 \cdot RMR_b) - 100 \quad (RMR_b > 50)$$

b) SERAFIN - PEREIRA: \*

$$E_d = 10 \frac{RMR_b - 10}{40} \quad (\forall RMR_b)$$

c) HOEK - BROWN: \*

$$E_d = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10 \frac{\sigma_{ci} - 10}{40} \quad (\sigma_{ci} < 100 \text{ MPa}) \neq$$

media  
base

**(ELPLA)**

d) GRIMSTAD e BARTON:

$$E_d = 25 \log_{10} Q$$

\* più affidabili

2) MODULO DI ELASTICITÀ (YOUNG)

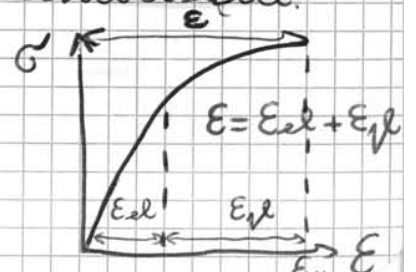
$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon}$$

→ coeff. e rapporto di Poisson

$$\nu = - \frac{\epsilon_v}{\epsilon_a} \quad (\text{mm})$$

↳ Un mezzo a comportamento elastico lineare manifesta degli incrementi di deformaz. reversibili al variare dello stato tens. agente.

↳ la risposta di un mezzo a comportamento elasto-plastico ad una variazione tensionale consiste nella somma di un incremento di deform. elastica reversibile ed un incremento di deformaz. plastica irreversibile.





• ANALISI STATO TENSIONALE / DEFORMATIVO:

1) SOLUZ. LAMÉ (MEZZO ILE,  $k_0 = 1$ )

CONDIZ. CANTORO:  
 $r=a \rightarrow \sigma_r = p_i$   
 $r=\infty \rightarrow \sigma_r = p_0$

$\sigma_r = \sigma_\theta$   
 $P_0$

$$\sigma_r = P_0 - (P_0 - P_i) \cdot \frac{a^2}{r^2}$$

$$\sigma_\theta = P_0 + (P_0 - P_i) \cdot \frac{a^2}{r^2}$$

$$u_r = \frac{1+\nu}{E} \cdot (P_0 - P_i) \cdot \frac{a^2}{r}$$

$$\tau_{\max} = (P_0 - P_i) \cdot \frac{a^2}{r^2}$$

$\sigma_r = 0, \sigma_\theta = 2P_0 = 2\sigma_r$  [a=r,  $P_i=0$ ]

**Ipotesi** su cui si basa:

- 1 CILE (mesur)
- 2 Si cut. M-c
- 3 cantà circolare e profonda
- 4 stato tem. originario isotrop
- 5 linearità geometrica
- 6 stato di deformaz. piana
- 7 premessa intera applicata unif sul contorno della galleria.

2) SOLUZ. KIRSCH (MEZZO ILE,  $k_0 \neq 1$ )

$$\sigma_r = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_h + \sigma_v) \cdot \left(1 - \frac{a^2}{r^2}\right) + \frac{1}{2} \cdot (\sigma_h - \sigma_v) \cdot \left(1 + \frac{3a^4}{r^4} - \frac{4a^2}{r^2}\right) \cos 2\theta$$

$$\sigma_\theta = \frac{1}{2} \cdot (\sigma_h + \sigma_v) \cdot \left(1 + \frac{a^2}{r^2}\right) - \frac{1}{2} \cdot (\sigma_h - \sigma_v) \cdot \left(1 + \frac{3a^4}{r^4}\right) \cos 2\theta$$

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

$\sigma_v$ : tensione verticale  
 $\sigma_h$ : tensione orizzontale  
 $k_0 = \frac{\sigma_h}{\sigma_v}$

$\theta$

(spost. radiale)

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

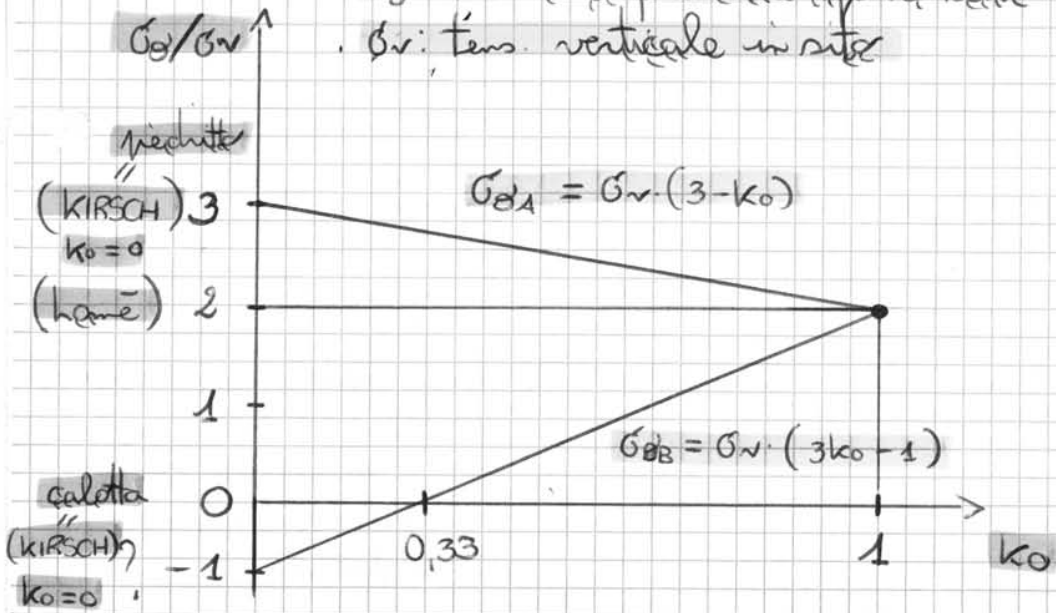
(spost. circol.)

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

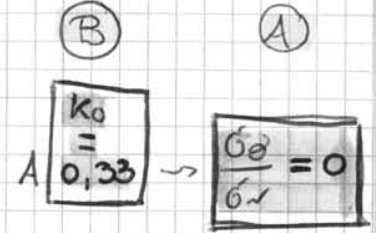
**IPOTESI** = SOLUZ. LAMÉ, eccetto per d'isotropia dello stato di sforzo originario.

→ STATO TENSIONALE ORIGINARIO DI TIPO NON ISOTROPO.

$\sigma_\theta$ : tens. circonferenziale dopo la scava  
 $\sigma_v$ : tens. verticale in sito



KIRSCHE,  
 CALOTTA / PIEDRITTO

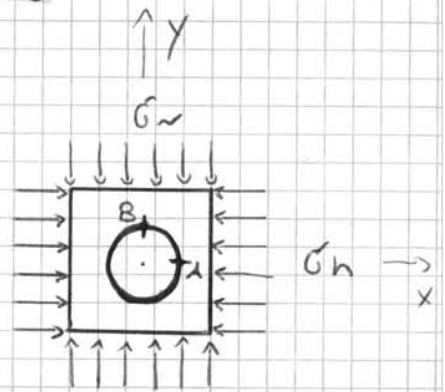


SOVRAPPOSIZIONE DEGLI EFFETTI:

PIEDRITTO  
 $\sigma_A = 3\sigma_v - \sigma_h$

CALOTTA  
 $\sigma_B = 3\sigma_h - \sigma_v$

Valori da confrontare con le tensioni MAX finite.



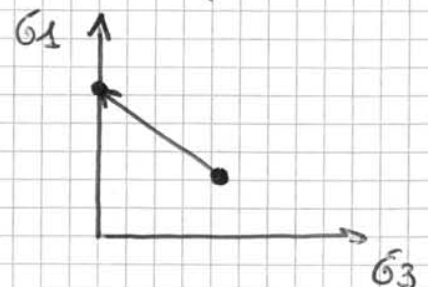
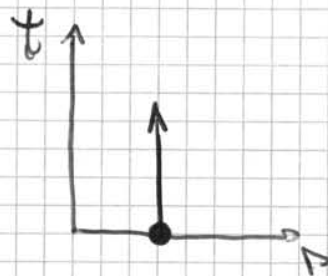
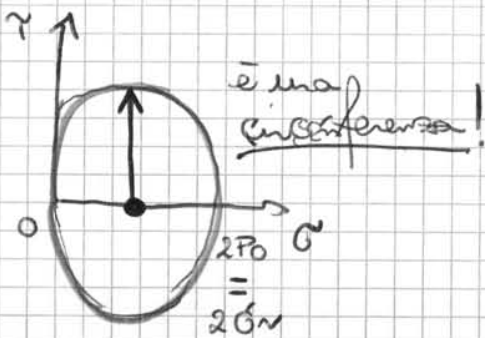
PERCORSO DELLE SOLECCITAZIONI:

Esempio: LAMÉ  $\sigma_\theta = 2P_0 = 2\sigma_v$

- Prima della scava:  $P_i = P_0$

- Dopo la scava:  $P_i = 0$

è il caso della soluz. KIRSCHE con  $\begin{cases} k_0 \neq 0,1 \\ \sigma_h \neq 0 \\ r = a \\ \theta = 0^\circ \text{ e } 90^\circ \end{cases}$



## • PENDII NATURALI E FRONTI DI SCAVO:

### → TIPI DI INSTABILITÀ:

#### 1) CROLLO (fall):

Fenomeno che inizia con il distacco di terra e roccia da un pendio acclive lungo una superficie lungo la quale lo spostamento di taglio è nullo e limitato.

#### 2) RIBALTAMENTO (toppling): → CAUSATO DA DISCONTINUITÀ SUB-VERTICALI.

Rotazione in avanti, verso l'esterno del versante, di una massa di terra e roccia, intorno ad un punto e un asse situati al di sotto del centro di gravità della massa spostata.

→ Analisi della dinamica di caduta massi: METODO LUMPED MASS

→ N° SIMULAZIONI

→ VALUTAZ. CADIZ. VERSANTE

#### 3) SCIVOLAMENTO (slide):

Verso la base del versante di una massa di terra e roccia che avviene in gran parte lungo una superficie di rottura e entro una fascia, relativamente sottile, di intensa deformazione di taglio.

ROTTURA PIANA IN UNA STRUTTURA

→ Tipologie:

- piano - 2D → NETTAMENTE STRATIFICATA.

- a 2 blocchi.

- 3D - tridimensionale → rotolamento a cuneo.

- cuneo.

- max cuneo.

ROTTURA A CUNEO

DAUTA ALL'INTERSEZ.

DI 2 SIST. DISC.

ROTTURA CIRCONARE IN UNA MASSA

FORTEMENTE FRAMMENTATA CON UNO SCHEMA

STRUTTURALE NON DEFINIBILE.

## • METODO DELL'EQUILIBRIO LIMITE:

① **Gallerie**: limitata ad indagare situazioni geometriche semplici e per l'analisi della stabilità di blocchi di roccia a tetto, in parete e sul fronte di scavo.  
→ Il metodo consente di fare valutazioni parametriche sul tipo di instabilità e sul metodo di sostegno.

② **Ad un pendio in roccia**: ricerca per tentativi e scelta a priori della superficie potenziale di rottura, in base a considerazioni geometriche derivanti dal rilievo geologico strutturale, dalle osservazioni in sito, dalle indagini, nonché dal monitoraggio.

→ In corrispondenza di tale superficie si calcola il rapporto tra le forze resistenti e quelle instabilizzanti.

• **METODO DELLE TENSIONI**: lo studio e l'analisi delle condizioni di stabilità della galleria / gora sotterranea con il metodo delle tensioni comporta lo studio in condizioni naturali in assenza degli interventi (condizioni intrinseche) e lo studio in presenza di interventi di rinforzo / stabilizzazione.

→ lo scavo di una galleria in un A.R. provoca una modifica dello stato tensionale originario.

## ↳ STUDIO DELLO STATO TENSIONALE / DEFORMATIVO:

→ ASSUNZIONE DI UNA LEGGE COSTITUTIVA → A.R.

ILF

ALPHA

+

CRITERIO DI

PLASTICIZZAZIONE

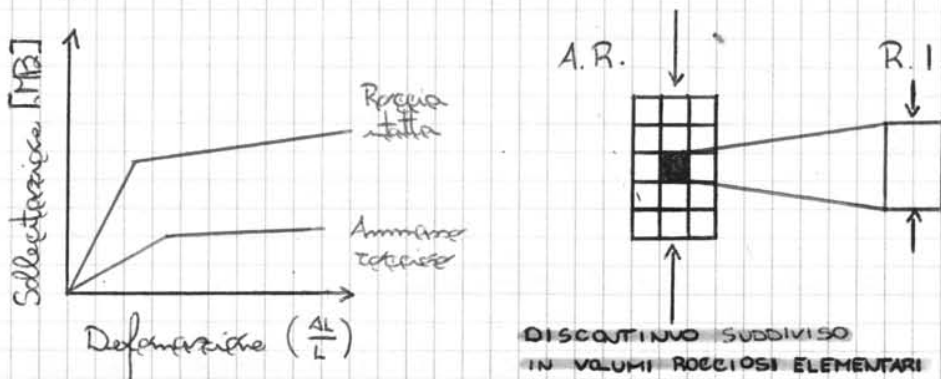


# MECCANICA DELLE ROCCE - RIASSUNTI

## PARTE INTRODUTTIVA:

## CAP. 1

- **AMMASSO ROCCIOSO:** è costituito dai volumi rocciosi separati da discontinuità che rappresentano pleggi piani e superfici di debolezza.
- **ROCCIA INTATTA:** intesa come materiale, è un campione rappresentativo appartenente ad un volume elementare dell'ammasso roccioso.



A parità di sollecitazioni applicate, la deformazione dell'ammasso roccioso è maggiore.

- **DISCONTINUITÀ:** e anche giunte, associate a piani e superfici di debolezza presenti all'interno dell'ammasso roccioso. (JOINT)

↳ **SISTEMI DI DISCONTINUITÀ:** discontinuità ripetitive aventi caratteristiche simili (gracitura, spaccatura ecc...)

→ **DISCONTINUITÀ PRINCIPALE:** con riferimento ad un piano, ha un ruolo importante all'interno di un ammasso roccioso e ne condiziona il comportamento statico.

ES. Faglia: frattura e zona di frattura lungo cui c'è stato uno spostamento reciproco da pochi centimetri a qualche centinaio di metri. La roccia è frantumata ed alterata su entrambi i lati e le pareti sono striate e disegate a causa dello scorrimento.



immerside.

**BUSSOLA** → posizionata sul piano orizzontale controllando la livella a bolla d'aria.

**COPERCHIO** → posizionato sul piano della discontinuità, lungo (bussola) la linea di massima pendenza.

**INCLINAZIONE** → misurata tramite una scala graduata.

N.B.

Qualora l'affioramento non consenta di posizionare l'intero specchio della bussola lungo il piano, è preferibile utilizzare una cartellina rigida per prolungare idealmente il piano al di fuori dell'affioramento.

In genere le orientazioni di ogni discontinuità rilevata si riportano su un diagramma stereografico, al fine di facilitare la determinazione delle famiglie di discontinuità. → DIPS.



**2 SPAZIATURA:** la spaziatura è la distanza tra discontinuità adiacenti misurata in direzione ortogonale alle discontinuità.

Normalmente ci si riferisce alla spaziatura media di un sistema di discontinuità.

Rappresenta un dato molto importante poiché incide sulla dinamica dei volumi rocciosi elementari.

**3 CONTINUITÀ**: la continuità e persistenza è l'estensione areale e della profondità di penetrazione di una discontinuità stimata sulla base della misura della lunghezza della traccia di quella discontinuità in un affiorante.

È un parametro di difficile individuazione poiché non sempre si è in grado di misurare l'intera traccia. Può essere approssimativamente quantificata osservando le lunghezze delle tracce di discontinuità sulla superficie esposta.

La persistenza di una famiglia di discontinuità può essere considerata:

- molto bassa:  $< 1$  km;
- bassa:  $1 - 3$  km;
- media:  $3 - 10$  km;
- alta:  $10 - 20$  km;
- molto alta:  $> 20$  km.

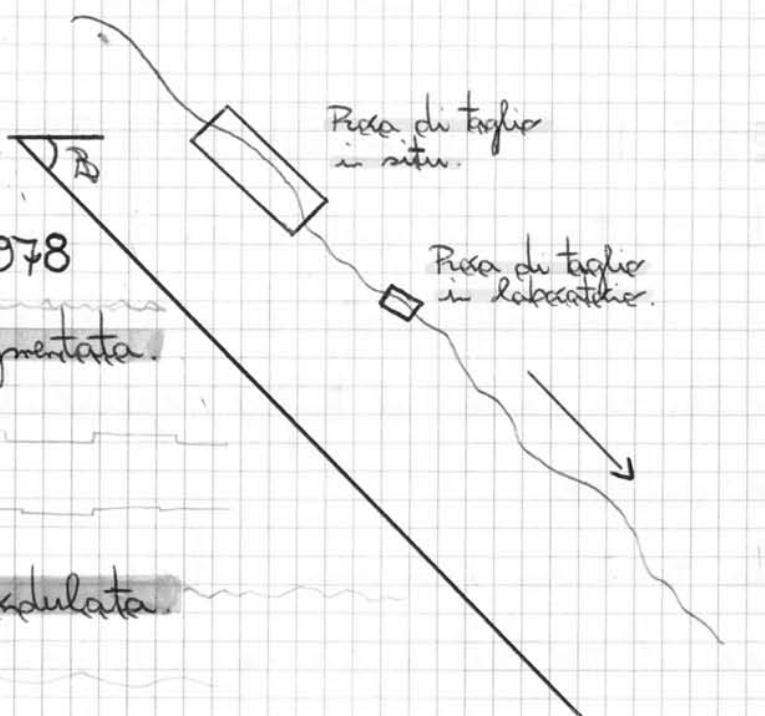
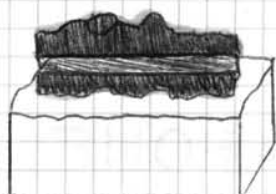
È importante conoscere il tipo di terminazione di ogni famiglia di discontinuità:

$\left. \begin{array}{l} \text{a) in roccia.} \\ \text{b) sotto un'altra discontinuità.} \\ \text{c) in corrispondenza di un limite dell'affiorante.} \end{array} \right\} \text{riduce la} \\ \text{persistenza.}$

N.B. la persistenza di un sistema di discontinuità è individuata statisticamente (usualmente si considera il valore medio).

Attenzione ai farti di roccia (Zoe del piano non interessate dalla discontinuità)  $\rightarrow$  RES. TAGLIO 1-2 O.G. rispetto a quella delle discat.

metallici che possono scorrere in modo relativo lungo una stessa piana. L'operatore posiziona il pettine in direzione ortogonale alla discontinuità e, esercitando una leggera pressione, consente agli aghi di adeguarsi al profilo della discontinuità. Rimuovendo il pettine, gli aghi mantengono il calco del profilo che può essere agevolmente confrontato con i profili di scabrezza tipici definiti dall'ISRM al fine di individuare in modo quantitativo la scabrezza.



- Classi di rugosità: ISRM 1978

- I rugosa (e irregolare), segmentata.
- II liscia, segmentata.
- III liscia, segmentata.
- IV rugosa (e irregolare), ondulata.
- V liscia, ondulata.
- VI liscia, ondulata.
- VII rugosa (e irregolare), piana.
- VIII liscia, piana.
- IX liscia, piana.

POTENZIALITÀ DI SCIVOLAMENTO DIPENDE DALLA SCABREZZA.

• Rugosa, liscia, liscia → osservazione su piccola scala.

• Segmentata, ondulata, piana → osservazione su grande scala.

[liscia: discontinuità che non presenta asperità a causa di scorrimenti laterali e rotati dei due blocchi]

**6. APERTURA:** L'apertura di una discontinuità è la distanza media tra i suoi lembi. È causata da spostamenti relativi tangenziali tra i due lembi quando la discontinuità è rugosa e ondulata, oppure anche da spostamenti trasversali indotti da sforzi di trazione.

L'apertura delle discontinuità influenza il flusso idrico delle acque sotterranee negli ammassi rocciosi, condizionandone la permeabilità.

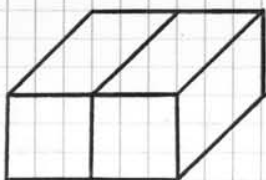
L'apertura può essere descritta con i seguenti termini:

- molto stretta :  $< 0,1 \text{ mm}$ ;
- stretta :  $0,1 - 0,25 \text{ mm}$ ;
- parzialmente aperta :  $0,25 - 0,5 \text{ mm}$ ;
- aperta :  $0,5 - 2,5 \text{ mm}$ ;
- moderatamente larga :  $2,5 - 10 \text{ mm}$ ;
- larga :  $10 - 25 \text{ mm}$ ;
- molto larga :  $25 - 100 \text{ mm}$ ;
- estremamente larga :  $10 - 100 \text{ cm}$ ;
- cavernosa :  $> 1 \text{ m}$ .

• N.B. Coeff. permeabilità di un granito  $\approx 10^{-8} \div 10^{-9}$

[- Rempimento : aria e acqua.] ← IMP

DISCONTINUITÀ CHIUSA:



DISCONTINUITÀ APERTA:



→ eventuale  
riempimento.

a: apertura



## STRUTTURA DELL'AMMASSO ROCCIOSO:

Il numero di famiglie di discontinuità presenti all'interno di un ammasso roccioso, insieme alla loro spazialità e continuità, determina la forma dei blocchi di roccia integra e quindi la struttura dell'ammasso.

- Poche famiglie di discontinuità: probabilità d'instabilità  $\approx 0$ .
- Numerose famiglie di discontinuità: competenza dell'ammasso  $\approx$  quello dei terreni.

La dimensione dei blocchi di roccia integra è legata alla spazialità media e alla persistenza delle discontinuità e al numero di famiglie presenti nell'ammasso roccioso.

I blocchi, in funzione del numero e dell'orientazione delle discontinuità, possono avere forma cubica, rombica, tetraedrica, a latta, ecc... La dimensione dei blocchi è una informazione importante che influenza sul competenza dell'ammasso. Può essere stimata semplicemente misurando, direttamente in situ, la dimensione media dei blocchi maggiormente rappresentativi oppure mediante la definizione dell'indice  $J_v$ , ovvero del numero di discontinuità presenti nell'unità di volume ( $m^3$ ).  $\rightarrow$  sommo il numero di giunti relativi a ciascun sistema.

DEFINISCO  $(J_v)$   $\rightarrow$  CLASSIFICO I BLOCCHI:

- molto grandi:  $< 1$  discontinuità /  $m^3$ ;
- grandi: 1 - 3 discontinuità /  $m^3$ ;
- medi: 3 - 10 discontinuità /  $m^3$ ;



# INDAGINE / SONDAGGIO IN SITO:

CAP. 3

1 L'INDAGINE GEOLOGICA comprende: → caratterizzazione geologica.

- l'analisi della documentazione esistente.
- l'analisi fotointerpretativa. → foto aeree da satellite.
- il rilievo geologico.
- il rilievo geomorfologico.
- il rilievo idrogeologico.
- indagini dirette con sondaggi.
- indagini con metodi geofisici.

2 L'INDAGINE GEOTECNICA comprende: → caratterizzazione geotecnica

- l'analisi della documentazione esistente.
- l'osservazione.
- la sperimentazione.

→ INDAGINI FONDAMENTALI e INDISPENSABILI → molto spesso molto in superficie.

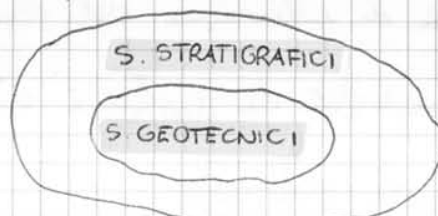
Le perforazioni di sondaggio si suddividono in due tipi:

1) **SONDAGGIO STRATIGRAFICO**: consente di individuare la stratigrafia dell'ammasso roccioso oggetto dell'indagine.

2) **SONDAGGIO GEOTECNICO**: consente di determinare, oltre a riconoscere il profilo stratigrafico, la profondità di innesco e di stabilizzazione delle eventuali falde idriche e di determinare le proprietà meccaniche dei detriti per mezzo del prelievo di campioni indisturbati.

→ in superficie.

→ in galleria.



ATTENZIONE! Durante l'escavazione del foro di sondaggio, in presenza di roccia alterata e frantumata, è necessario assicurare la stabilità delle pareti del foro stesso e del fondo foro. Venirà quindi impiegato, dove necessario, un rivestimento metallico provvisorio del foro che dovrà essere installato mano a mano che la perforazione procede.

Per assicurare la stabilità del fondo foro è possibile effettuare le manovre di estrazione e compensazione a velocità bassa e mantenere al battente del fluido di perforazione al più alto possibile.

→ Solo in caso di formazioni rocciose competenti, dove le pareti risultano stabili, è possibile evitare l'installazione del rivestimento.

### PARAMETRI DESCRITTIVI:

1) Per le condotte:

- a) litologia. → tipo di roccia.
- b) Struttura. → stratificazione ecc...
- c) Grado di alterazione.

2) Per le discontinuità:

- a) Type. → scistosità, faglia, giunte, stratificazioni.
- b) Firma e scabrezza.
- c) Natura dei lembi / pareti. → resist. parete.
- d) Riempimento.

NO Spaccatura, spaccatura e persistenza.  
Lo non può essere definita bene.  
(solo con una scala nelle pareti del foro).

## 1. RECUPERO PERCENTUALE DI SONDAGGIO:

Il recupero totale di canota è ottenuto direttamente dal rapporto di sondaggio e si basa sulle lunghezze di ciascuna canota.

$$R_{\%} = 100 \cdot \frac{\sum (l_s)}{l_c} \longrightarrow \begin{cases} l_s: \text{lunghezza dei singoli spezzoni di canota} \\ l_c: \text{lunghezza perforata} \end{cases}$$

nota è un indice della legge MPZ Durante un sondaggio si definisce anche la frequenza come il numero di discontinuità naturali che intersecano la lunghezza unitaria di canota recuperata.  $\rightarrow$  FORI DI DIVERSA ORIENTAZIONE Danno risultati diversi!!

## 2. RECUPERO PERCENTUALE MODIFICATO (RQD):

RQD: Rock Quality Designation  $\rightarrow$  inglese (Deere 1963).

$\rightarrow$  per una prima informazione circa la qualità dell'ammasso roccioso

Il recupero percentuale modificato si riferisce al recupero della canota se si prendono in considerazione solo gli spezzoni di canota di lunghezza superiore a 10 cm, recuperati, come percentuale alla lunghezza di perforazione:

$$RQD = 100 \frac{\sum (l_c - l_{(< 100 \text{ mm}))}}{l_c} \quad [\%] \quad \boxed{RQD \leq RP_{\%}}$$

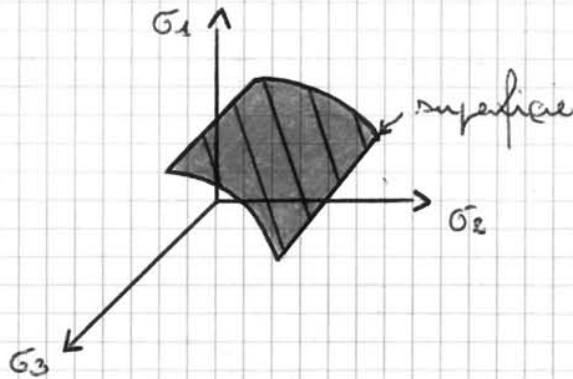
N.B. Nell' eseguire il calcolo si prendono in considerazione solo le discontinuità naturali e non le fratture prodotte dalle operazioni di perforazione ed estrazione della canota.

La lunghezza di ogni singolo spezzone va approssimata lungo l'asse della canota stessa, così che delle discontinuità che siano parallele al foro non realizzino indebitamente i valori di RQD di un A.R. altrimenti massiccio.

# CRITERI DI RESISTENZA:

- 1) Criterio di Mohr - Coulomb.
- 2) Criterio di Hek - Brash.

## RESISTENZA DELLA ROCCIA $\rightsquigarrow$ TENSIONI PRINCIPALI

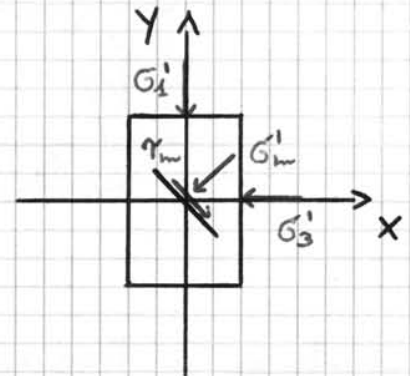


$f(\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3) \rightarrow$  è una superficie

$$[\sigma]_{xyz} = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{bmatrix}$$

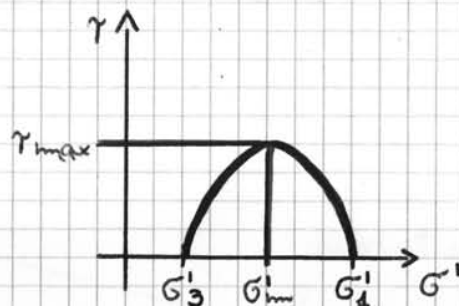
### 1) CRITERIO DI MOHR - COULOMB: è un criterio empirico.

- $\sigma_1'$ : tensione principale massima.
- $\sigma_3'$ : tensione principale minima.
- $\sigma_m'$ : sforzo normale efficace.
- $\tau_m$ : sforzo tangenziale efficace.
- $\sigma_m'$ : sforzo normale medio.
- $\tau_{max}$ : sforzo di taglio MAX.
- $c'$ : coesione [MPa]
- $\psi'$ : angolo di attrito.



$$\sigma_m' = \frac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2}$$

$$\tau_{max} = \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{2}$$





c) PIANO  $\sigma_3 - \sigma_1$

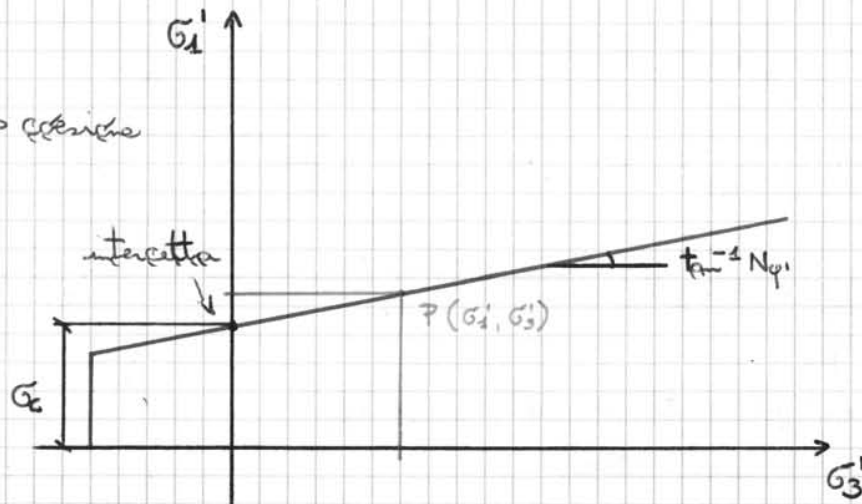
$$\sigma_1 = \sigma_c + \sigma_3 \cdot N_{\psi'}$$

$$\sigma_c = \frac{2c' \cos \psi'}{1 - \sin \psi'}$$

↳  $c'$  (coefficiente di coesione) → tensione massimale

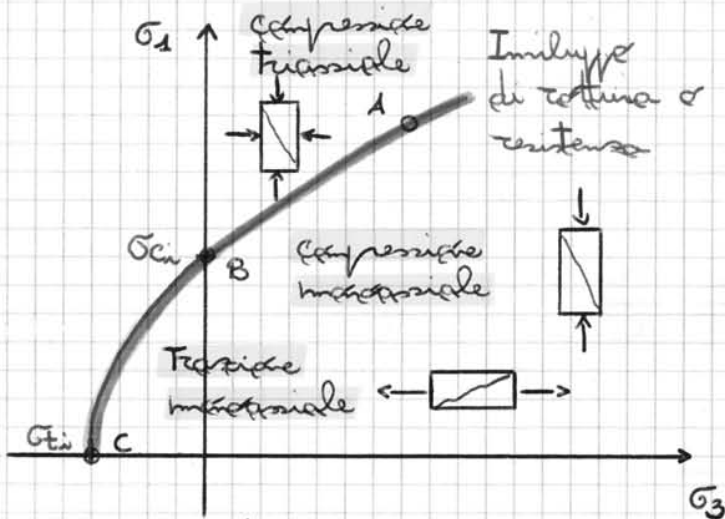
$$N_{\psi'} = \frac{1 + \sin \psi'}{1 - \sin \psi'}$$

↳ angolo ( $\psi'$ )  
↳ co. taglio



(1980)

2) CRITERIO DI HOEK - BROWN: è un criterio empirico.



→ è una funzione non lineare.  
(parabola)

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( m_{bi} \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0.5}$$

$\sigma_1$ : tensione principale massima.

$\sigma_3$ : tensione principale minima.

$\sigma_{ci}$ : resistenza a compressione.

$\sigma_{ti}$ : resistenza a trazione.

$m_{bi}$ : costante di Hoek-Brown.  
(empirica)

è un criterio di resistenza empirico per la roccia intatta di tipo cumulativo.

Considerazioni:

a)  $\sigma_3 = 0 \rightarrow \sigma_1 = \sigma_{ci}$

b)  $\sigma_1 = 0 \rightarrow \sigma_3 = \sigma_{ti}$

c)  $\sigma_{ci}$  e  $m_{bi}$  sono parametri che si determinano sperimentalmente mediante prove di laboratorio (compressione massimale e triassiale) nel campo

$0 < \sigma_3 < 0.5 \sigma_{ci}$  → per un'ottima interpretazione dei dati sperimentali.

↳ Si può ricorrere alla regressione lineare dei dati di prova



**1° tecnica:**

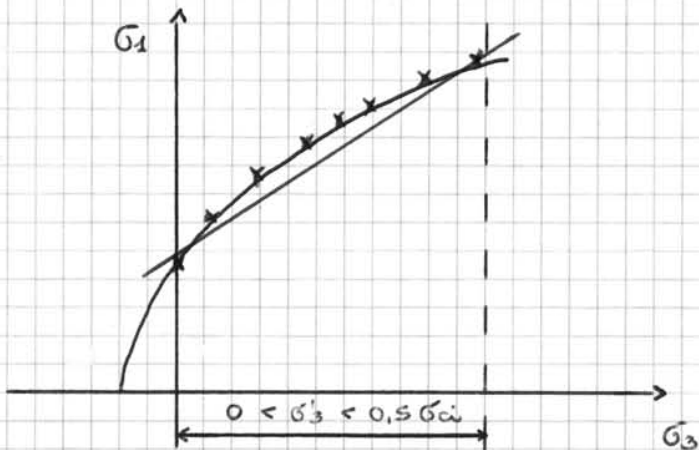
La prima tecnica prevede di individuare uno stato tensionale  $\sigma_3$  di riferimento e di tracciare la tangente al criterio curvilineo in corrispondenza di quel determinato stato tensionale.

La retta tangente rappresenta il criterio lineare e consente la determinazione di  $c'$  e  $\varphi'$ .

→ Bray → Hoek (1983) → consente di ricavare  $c'$  e  $\varphi'$  al variare della ~~risorsa~~ memoria efficace  $\sigma'_m$

**2° tecnica: Hoek e Brown (1997)**

La seconda tecnica prevede di definire otto coppie di valori  $\sigma_1 - \sigma_3$ , equidistanti nel campo  $0 < \sigma_3 < 0,5 \sigma_{ci}$ , che soddisfano l'equazione del criterio. Interpolando linearmente tra questi valori (trattando di caso fosse essi stessi dati sperimentali), si determinano i parametri  $c'$  e  $\varphi'$ .



INTERPOLAZIONE

LINEARE:  $y = ax + b$

$$\begin{cases} a = N\varphi' = \frac{1 + \sin \varphi'}{1 - \sin \varphi'} = \tan^2 \left( 45^\circ + \frac{\varphi'}{2} \right) \\ b = \sigma_{ci} = \frac{2c' \cos \varphi'}{1 - \sin \varphi'} \end{cases}$$

— Hoek e Brown  $\left( \sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \left( \min \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + 1 \right)^{0,5} \right)$

— Mohr - Coulomb  $\left( \sigma_1 = \sigma_{ci} + N\varphi' \sigma_3 \right)$

... 8 coppie di valori

## 1) **Classificazione mediante RMR**

CAP. 9

Il metodo RMR, introdotto da Bieniawski (1973), è la classificazione geomeccanica degli ammassi rocciosi più diffusa al mondo e prevede la definizione di sei parametri (Bieniawski 1989):

- $P_1$  - resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta;
- $P_2$  - recupero percentuale modificato RQD;
- $P_3$  - spaziatura delle discontinuità;
- $P_4$  - condizioni delle discontinuità;
- $P_5$  - venute d'acqua (riferita ad un tratto di galleria di 10 m);
- $P_6$  - orientazione delle discontinuità in rapporto alla direzione di scavo.

↳ Venisce più usata (campi utilizzati)

Ad ogni campo di variazione dei primi cinque parametri è associato un indice numerico, che risulta tanto più elevato quanto migliore è la qualità dell'ammasso roccioso al quale i parametri si riferiscono.

Il punteggio massimo attribuito a ciascun dei primi cinque parametri è diverso per ogni parametro, denotando la maggior importanza di alcuni rispetto ad altri nel descrivere il comportamento dell'ammasso roccioso, e, quindi, la sua qualità.

I punteggi da attribuire ai sei parametri sono riassunti in tabelle. La somma degli indici associati ai primi cinque parametri fornisce il valore del cosiddetto RMR "di base", caratteristico dell'ammasso analizzato. Al valore dell'RMR base viene poi sottratto un punteggio legato alla valutazione dell'influenza della giacitura dei sistemi di discontinuità principali sull'opera per la quale si esegue la classificazione. La sua determinazione può basarsi sull'analisi della giacitura del sistema di discontinuità più gravoso, ove sia possibile identificarlo, ovvero delle giaciture di tutte le famiglie individuate.

La riduzione dell'RMR base viene valutata attraverso un giudizio qualitativo distinto nelle seguenti categorie di influenza: molto favorevole, favorevole, mediocre, sfavorevole, molto sfavorevole.

L'RMR ottenuto dalla somma dei sei indici è detto "globale". I valori di RMR, variabili da 0 a 100, sono raggruppati a definire cinque classi di qualità dell'ammasso roccioso.

Nell'utilizzo della classificazione RMR occorre tenere presente che il metodo, definito sulla base di oltre 300 opere in vera grandezza, ha una vasta applicabilità ma pecca di essere conservativo e non è generalmente applicabile con risultati ragionevoli ad ammassi costituiti da rocce aventi resi-

stenza molto bassa o che mostrano comportamenti meccanici complessi o spiccatamente anisotrope.

CLASSI DI QUALITÀ A.R. IN BASE ALL'INDICE RMR:

CLASSI	I	II	III	IV	V
DESCRIZIONE	<i>Omogenea</i>	<i>Buona</i>	<i>Discreta</i>	<i>Scadente</i>	<i>Molto scadente</i>
RMR	$\frac{81}{100}$	$\frac{61}{80}$	$\frac{41}{60}$	$\frac{21}{40}$	< 20

**N.B.** Quando la roccia costituente l'ammasso roccioso presenta un valore di resistenza a compressione monoassiale ( $\sigma_{ci}$ ) inferiore a 100 MPa occorre utilizzare per tale relazione l'indice  $Q_c$ , ottenuto normalizzando il valore di Q per il rapporto  $\sigma_{ci}/100$  dove  $\sigma_{ci}$  è espresso in MPa:

$$Q_c = \left( \frac{RQD}{J_n} \cdot \frac{J_r}{J_a} \cdot \frac{J_w}{SRF} \right) \cdot \frac{\sigma_{ci}}{100}$$

**CLASSI DI QUALITÀ A.B. IN BASE ALL'INDICE Q:**

CLASSE I:	Q	400 - 1000	; eccezionalmente buona
CLASSE II:	Q	100 - 400	; estremamente buona
CLASSE III:	Q	40 - 100	; molto buona
CLASSE IV:	Q	10 - 40	; buona
CLASSE V:	Q	4 - 10	; discreta
CLASSE VI:	Q	1 - 4	; scadente
CLASSE VII:	Q	0,1 - 1	; molto scadente
CLASSE VIII:	Q	0,01 - 0,1	; estremamente scadente
CLASSE IX:	Q	< 0,01	; eccezionalmente scadente

### Correlazione tra i metodi di classificazione:

La correlazione tra i diversi metodi di classificazione permette di effettuare una verifica dei valori di qualità dell'ammasso roccioso ottenuti.

$$RMR = 9 \cdot \ln Q + 44$$

$$Q = e^{\frac{RMR_{base} - 44}{9}}$$

### Modulo di deformazione:

La valutazione del modulo di deformazione dell'ammasso roccioso può essere effettuata in funzione dell'indice RMR ad esempio con la relazione suggerita da Bieniawski (1978):

$$E_d = (2 \cdot RMR) - 100$$

La relazione è valida solo per  $RMR > 50$ .

Una relazione valida per tutti i valori di RMR è stata introdotta da Serafim e Pereira (1983):

$$E_d = 10^{\frac{RMR - 10}{40}}$$

Nelle due relazioni riportate, occorre impiegare il valore "base" di RMR.

Per rocce con resistenza a compressione monoassiale media o bassa ( $\sigma_{ci} < 100$  MPa), Hoek e Brown (1997) suggeriscono di adottare la formula che tiene conto della resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta, ed è espressa in funzione dell'indice GSI:

$$E_d = \sqrt{\frac{\sigma_{ci}}{100}} \cdot 10^{\frac{GSI - 10}{40}}$$

Utilizzando l'indice Q, Grimstad e Barton (1993) forniscono la seguente equazione, valida per qualsiasi valore di Q:

$$E_d = 25 \cdot \log_{10} Q$$



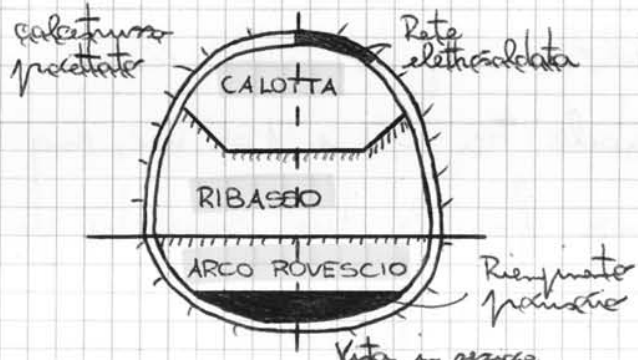
In generale, l'entità, di tale distanza dipende dalla rigata del terreno durante l'armamento e dal tipo di rete getta in opera. Lo scavo della platea generalmente avviene immediatamente prima della posa dell'arco rovescio.

• Perinvestimento: centine e els possibilmente integrati con bulloni e chiodi getta in opera sull'arco di calotta.

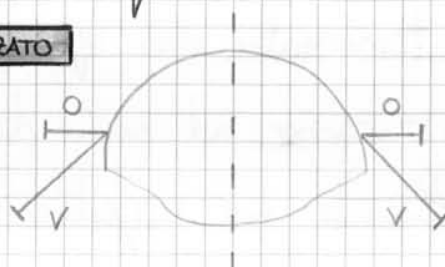
N.B. Nel caso di ammassi rocciosi di qualità scadente e molto scadente, può essere richiesta l'installazione di un anello di tubi (infilaggi) sul perimetro di scavo, eventualmente iniettati e cementati, in modo da proteggere l'armamento in calotta e distribuire in maniera uniforme i carichi sulle centine.

→ Il getto del rivestimento definitivo avviene ad una distanza dal fronte superiore a due volte il diametro della galleria.

Nel caso di gallerie superficiali e/o in presenza di rocce di scadente qualità: esse consistono nella posa in opera, in corrispondenza del piede delle centine di calotta, di una coppia di appoggi costituita da micropali verticali. Un'ulteriore coppia di micropali, questa volta orizzontali, funge da ancoraggio per il piede delle centine tese. Questo permette di evitare la sospensione dell'arco di calotta al momento dello scavo del ribasso, limitando inoltre le deformazioni orizzontali che hanno luogo in corrispondenza delle centine.



SCAVO PARZIALIZZATO



Per quanto riguarda l'andamento degli spostamenti è possibile fare un discorso analogo, oltre allo spostamento radiale sarà presente anche uno spostamento circonferenziale:

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

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

ANALISI:

Se:  $- k_0 = 0$   
 $- \sigma_h = 0$   
 $- r = a$   
 $- \theta = 0$

A

$\sigma_r = 0$   
 $\sigma_\theta = 3\sigma_r$

Se:  $- k_0 = 0$   
 $- \sigma_h = 0$   
 $- r = a$   
 $- \theta = \frac{\pi}{2}$

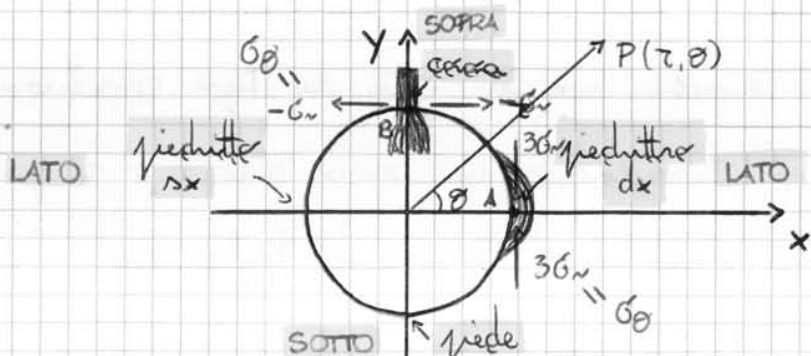
B

$\sigma_r = 0$   
 $\sigma_\theta = -\sigma_r$

Valori ottenuti sostituendo nelle equazioni.

A.R. → Criteri di resistenza:

$\sigma_{cm}$  → Se  $\left\{ \begin{array}{l} \bullet 3\sigma_r > \sigma_{cm} \text{ ha rottura per compressione.} \\ \bullet |- \sigma_r| > \sigma_{tm} \text{ ha rottura per trazione.} \end{array} \right\}$  MOLTO IMP.

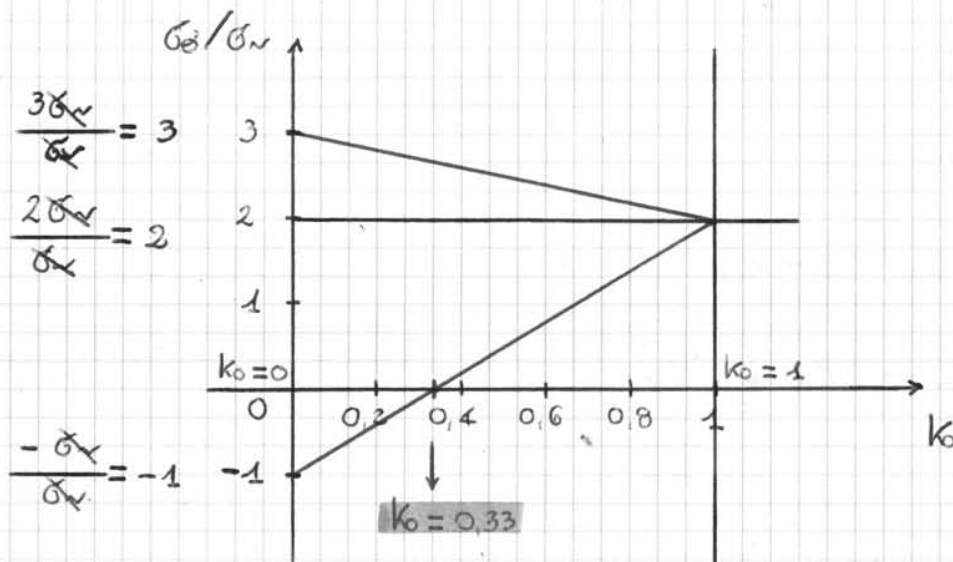


→ Per simmetria, situazione:  
 $- \text{cassa} = \text{piede.}$   
 $- \text{piedritto } dx = \text{piedritto } dx.$

$$\sigma_{\theta} = 3k_0 \sigma_v - \sigma_v$$

$$\sigma_{\theta} = \sigma_v \cdot (3k_0 - 1)$$

Sintesi nel grafico:



Riassumendo:

- 1) L'apertura della galleria comporta una concentrazione delle tensioni sul costone.
- 2) In A e B si ha una variazione lineare di  $\sigma_{\theta}$  al variare di  $k_0$ .
- 3) Per  $k_0 = 0$  (compressione massima) il massimo valore del fattore di concentrazione vale +3.
- 4) Per  $k_0 = 1$  il fattore di concentrazione è costante e vale +2.

N.B.

ISOSTATICHE: linee che mi indicano pte per pte le direzioni principali.

LINEE DI LIVELLO DELLE TENSIONI PRINCIPALI: linee che mi indicano da stessa tensione. (rappresentare)

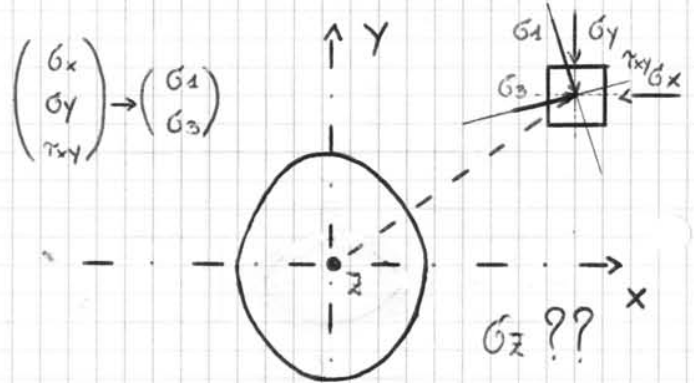
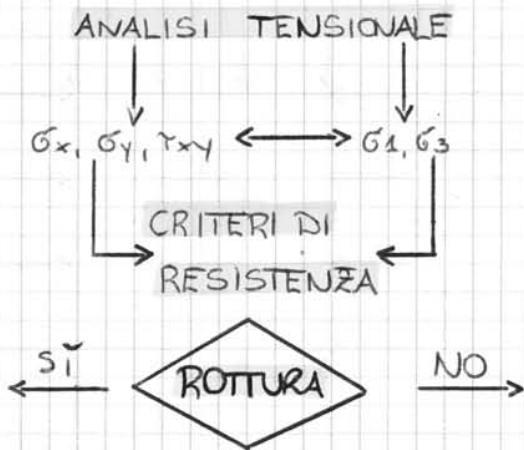
→ Posso variare la loro forma geometrica in base al valore di  $k_0 = \frac{\sigma_h}{\sigma_v}$ .  
 ↳ varia l'andamento → risolvibile richiedendo le eq. analitiche.

ATTENZIONE: Se varia  $k_0$ , varia anche  $\sigma_{\theta}$ !!

## ANALISI DI STABILITÀ IN ASSENZA DI INTERVENTI

Il calcolo dello stato tensionale indotto nell'interno di una galleria a seguito delle scavi, anche nell'ipotesi CILE, è di interesse per l'analisi progettuale.

È così possibile verificare la compatibilità e meno delle tensioni agenti con le caratteristiche di resistenza (criterio di resistenza).

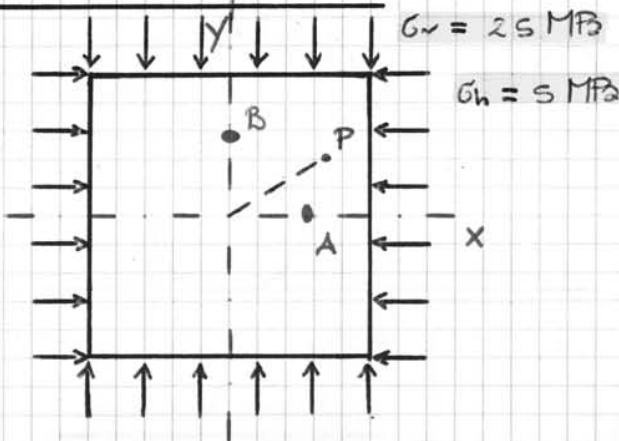


$$\sqrt{(\sigma_x + \sigma_y)} = \sigma_z = \sqrt{(\sigma_1 + \sigma_3)}$$

$$\sigma_z = \frac{\epsilon_z}{\epsilon} = \nu \frac{\epsilon_x}{\epsilon} + \nu \frac{\epsilon_y}{\epsilon}$$

## SOVRAPPOSIZIONE DEGLI EFFETTI → APPLICAZIONE

• Esercizio / formule:



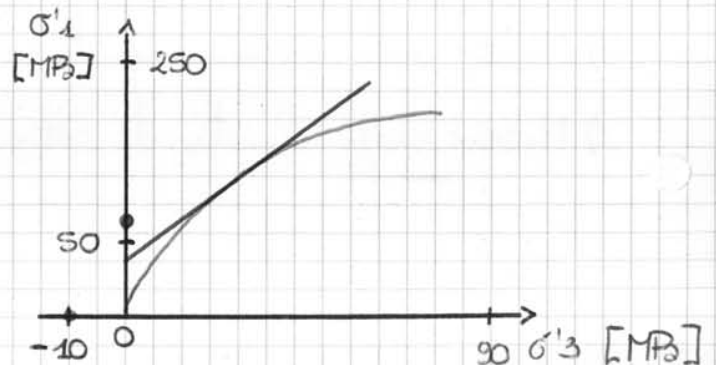
$$K_0 = \frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \frac{5}{25} = 0,20$$

$$\sigma_A = 3\sigma_v - \sigma_h = (3 \cdot 25) - 5 = 70 \text{ MPa}$$

$$\sigma_B = 3\sigma_h - \sigma_v = (3 \cdot 5) - 25 = -10 \text{ MPa}$$

in A: rottura per compressione.

in B: rottura per trazione.





- Per tutti i punti in condizione plastica:

a) Equilibrio:

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{r} = 0$$

b) Mohr - Coulomb: (CONDIZIONE DI SMERVAMENTO)

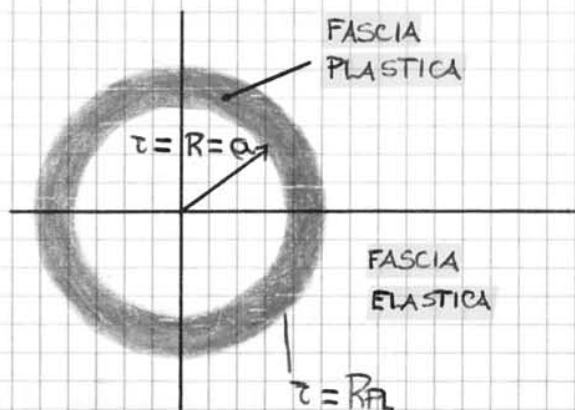
$$\sigma_\theta = \frac{\sigma_r \cdot (1 + \sin \varphi) + 2c \cdot \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

Cerca il valore di  $\sigma_\theta$  per raggiungere la condizione limite.

Per  $\sigma_r = 0 \rightarrow \sigma_\theta = \frac{2c \cdot \cos \varphi}{1 - \sin \varphi}$

Resistenza a compressione  
indefinita.

c) Condizioni al contorno:



TENSIONE DI SMERVAMENTO  
SOGLIA

CONDIZIONE DI SMERVAMENTO

N.B. Per tutti i punti all'interno della fascia plastica deve valere la condizione di smervamento.

PLASTICIZZAZIONE

ROTTURA (collasso) no more interest!!

I)  $r = R = a$  ) Condizione di contenimento - stabilizzazione.  
 $\sigma_r = p_i$

II)  $r = R_e$  ) Interfaccia fascia plastica / fascia elastica.

$$(\sigma_r)_{el} + (\sigma_\theta)_{el} = (\sigma_r)_{pl} + (\sigma_\theta)_{pl} = 2p_0$$

III)  $r \rightarrow \infty$ ,

$\sigma_r = p_0$  (all'infinito tende lo stato di tensione originario)

2) STATO DI SFORZO E DEFORMAZIONE NELL'INTORNO DI UNA GALLERIA

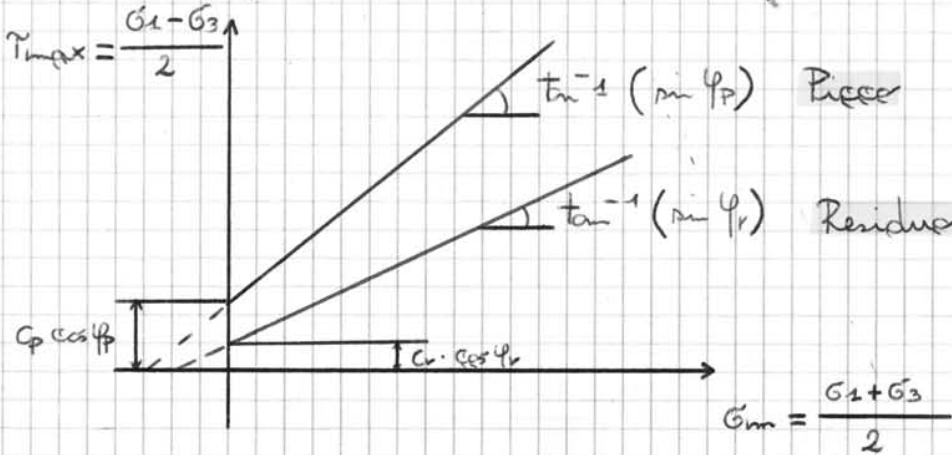
CIRCOARE - MODELLO ELPLA: → SOLUZIONE COMPLETA

(Ribacchi e Riccioli 1977)

- IPOTESI DI BASE:

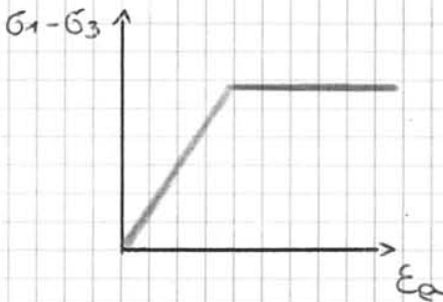
- 1) Stato tensionale in sito isotrofo  $k_0 = 1$ .
- 2) A.R. omogenea e isotrofa.
- 3) Galleria circolare profonda.
- 4) Problema bidimensionale (deformazioni piano). (2D)

• Criterio di plasticizzazione di Mohr - Coulomb:

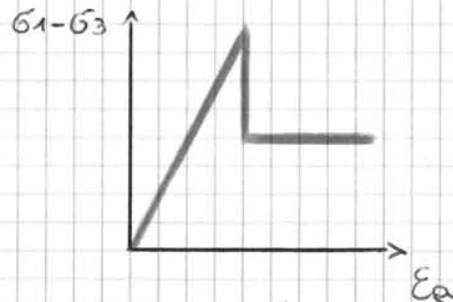


(a 45°) angoli ai piani principali.

• Modelli costitutivi: (con soluzioni analitiche)



Ideale plastico, per ammassi rocciosi con caratteristiche di qualità da scadente a molto scadente.



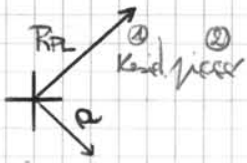
Ideale fragile, per ammassi rocciosi con caratteristiche di qualità molto buone.

→ PICCO ≡ RESIDUO ) ⑤ PARAMETRI per caratt. la forza plastica A.R. ( $\nu, E, c, \psi_r, \psi_p, \psi$ )

⑥ PARAMETRI per caratt. la forza plastica A.R. ( $\nu, E, c, \psi_r, \psi_p, \psi$ )

NO Modelli ramollite.

Pressione critica: mi dice quale fase del salto in condizioni PL a EL



$$P_{cv} = P_0 (1 - \sin \varphi_p) - c_p \cos \varphi_p$$

→ Pressione critica per cui si avvera plasticizzazione.

PL	EL
PLASTICIZAZIONE	
	$P_{cv}$

$R = a = \tau \rightarrow$  ROTTURA DE IMPA SI INTERRIENE  $\rightarrow P_{max} \rightarrow$  PLASTICIZZAZIONE

Calcolo del raggio plastico: → SOLUZIONE:

$$R_{PL} = a \cdot \left\{ \frac{(P_0 + c_v \cotg \varphi_v) - (P_0 + c_p \cotg \varphi_p) \cdot \sin \varphi_p}{P_i + c_v \cotg \varphi_v} \right\}^{\frac{1}{N_v - 1}}$$

Modello di comportamento ideale e fragile.

N.B. Per  $c_p = c_v$  e  $\varphi_p = \varphi_v$  si ottiene la soluzione semplificata.

STATO DEFORMATIVO ATTORNO ALLA GALLERIA:

1° Calcolo della spostamento radiale in zona elastica ( $\tau \geq R_{PL}$ ):

$$u_r = \frac{1 + \nu}{E} \cdot \underbrace{(P_0 - P_{cv})}_{P(Lame)} \cdot \frac{R_{PL}^2}{r}$$

2° Calcolo della spostamento radiale in zona plastica ( $a \leq \tau \leq R_{PL}$ ):

$$u_r = \frac{1 + \nu}{E} \cdot \left\{ \frac{R_{PL}^{k+1}}{r^k} (P_0 + c_p \cotg \varphi_p) \sin \varphi_p + (1 - 2\nu) \cdot (P_0 + c_v \cotg \varphi_v) \cdot \left( \frac{R_{PL}^{k+1}}{r^k} - \tau \right) - \frac{(P_i + c_v \cotg \varphi_v) \cdot [1 + N_v \cdot k - \nu (k+1) \cdot (1 + N_v)]}{(N_v + k) a^{N_v - 1}} \cdot \left[ \frac{R_{PL}^{(N_v + k)}}{r^k} - \frac{N_v}{r} \right] \right\}$$

con  $N_v = \frac{1 + \sin \varphi_v}{1 - \sin \varphi_v}$  piano  $\sigma_1 - \sigma_3$

$k = \frac{1 + \sin \psi}{1 - \sin \psi} \rightarrow \psi$ : angolo di dilatazione  $\left. \begin{array}{l} \text{tra} \\ \text{due} \end{array} \right\}$  tra settore della massima di volume.

OSSERVAZIONI:

1° L'equazione di  $u_r$  ( $a \leq \tau \leq R_{PL}$ ) dipende da  $\nu, E, R_{PL}, P_0, c, \varphi, \psi$ .

2°  $u_r \rightarrow \infty, R_{PL} \rightarrow \infty \rightarrow$  ho cellame!

•  $R_{PL} = a = R, c_p = c_v = 0, \varphi_p = \varphi_v = \varphi = 0 \rightarrow$  MEZZO PURAMENTE A.R. ATTRITIVO  $\rightarrow$  FRATTURATO!!

riduzione di lame, introducendo le nuove condizioni di contorno

$\sigma_r = P_{cv}$  e  $\tau = R_R$

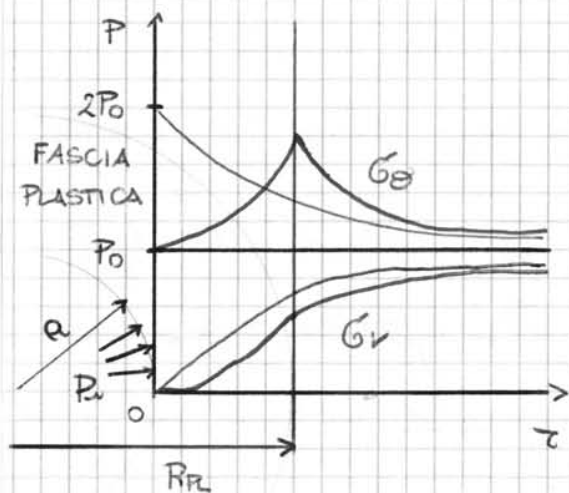
$$\sigma_r = P_0 - (P_0 - P_{cv}) \cdot \left(\frac{R_R}{r}\right)^2$$

$$\sigma_\theta = P_0 + (P_0 - P_{cv}) \cdot \left(\frac{R_{PL}}{r}\right)^2$$

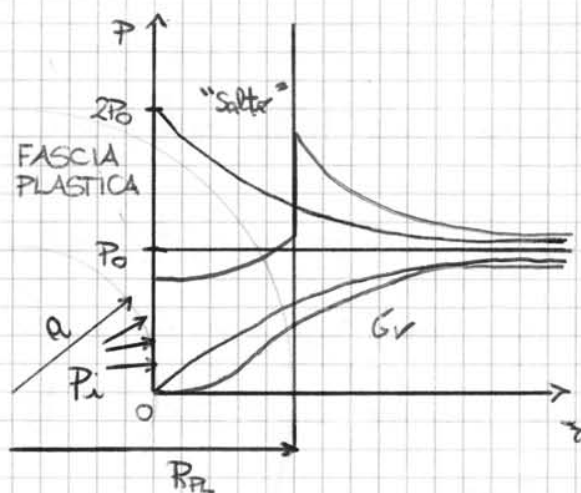
come scritto precedentemente.

$P_0 - P_{cv} = P$

3. Andamento dello stato tensionale attorno alla galleria in caso di comportamento elasto-plastico ideale:



4. Andamento dello stato tensionale attorno alla galleria in caso di comportamento fragile:



Nel caso di elasto plasticità ideale, in assenza di pressione interna la tensione circonferenziale cresce da un valore corrispondente alla resistenza a compressione massimale dell'ammasso roccioso sulla parte della galleria fino ad un valore massimo in corrispondenza del confine elasto-plastico.



## In conclusione:

Lo scavo di una galleria induce usualmente sollecitazioni nell'ammasso roccioso al centro che raggiungono i limiti di resistenza dell'A.R. In una fascia più o meno estesa attorno allo scavo si verificano delle deformazioni plastiche e lo stato di sforzo risulta profondamente modificato rispetto a quello che si avrebbe in un mezzo idealmente elastico. Di conseguenza, anche l'entità delle deformazioni che la galleria subisce risulta fortemente influenzata, così come gli sforzi indotti in un rivestimento e in un sistema di sostegno.

→ GALLERIA CIRCOARE → GENERAZIONE DI UNA FASCIA DI A.R., CONCENTRICA ALLO SCAVO, IN CUI SI RAGGIUNGO CONDIZIONI PLASTICHE

↓ ↓  
**FASCIA PLASTICA**

↳ Estensamente il calcolo dello stato di sforzo e il comportamento del materiale continua ad essere elastico.

La rettura, in un elemento di ammasso roccioso attorno allo scavo, si verifica quando, per una determinata pressione interna ( $p_i$ ), al diminuire della distanza dal centro della galleria ( $r$ ), lo stato tensionale raggiunge i valori definiti dal limite di resistenza. Il valore di  $r$ , per cui si ha rettura è detto RAGGIO PLASTICO ( $R_p$ ) che è quindi funzione della pressione interna applicata.



• Andamento dello spostamento radiale in funzione della distanza dal fronte per una galleria circolare in condizioni intrinseche,  $K_0 = 1$  e utilizzo della pressione interna fittizia per la simulazione dell'effetto dell'avanzamento del fronte di scavo:

→ Derivata con calcoli di tipo numerico.

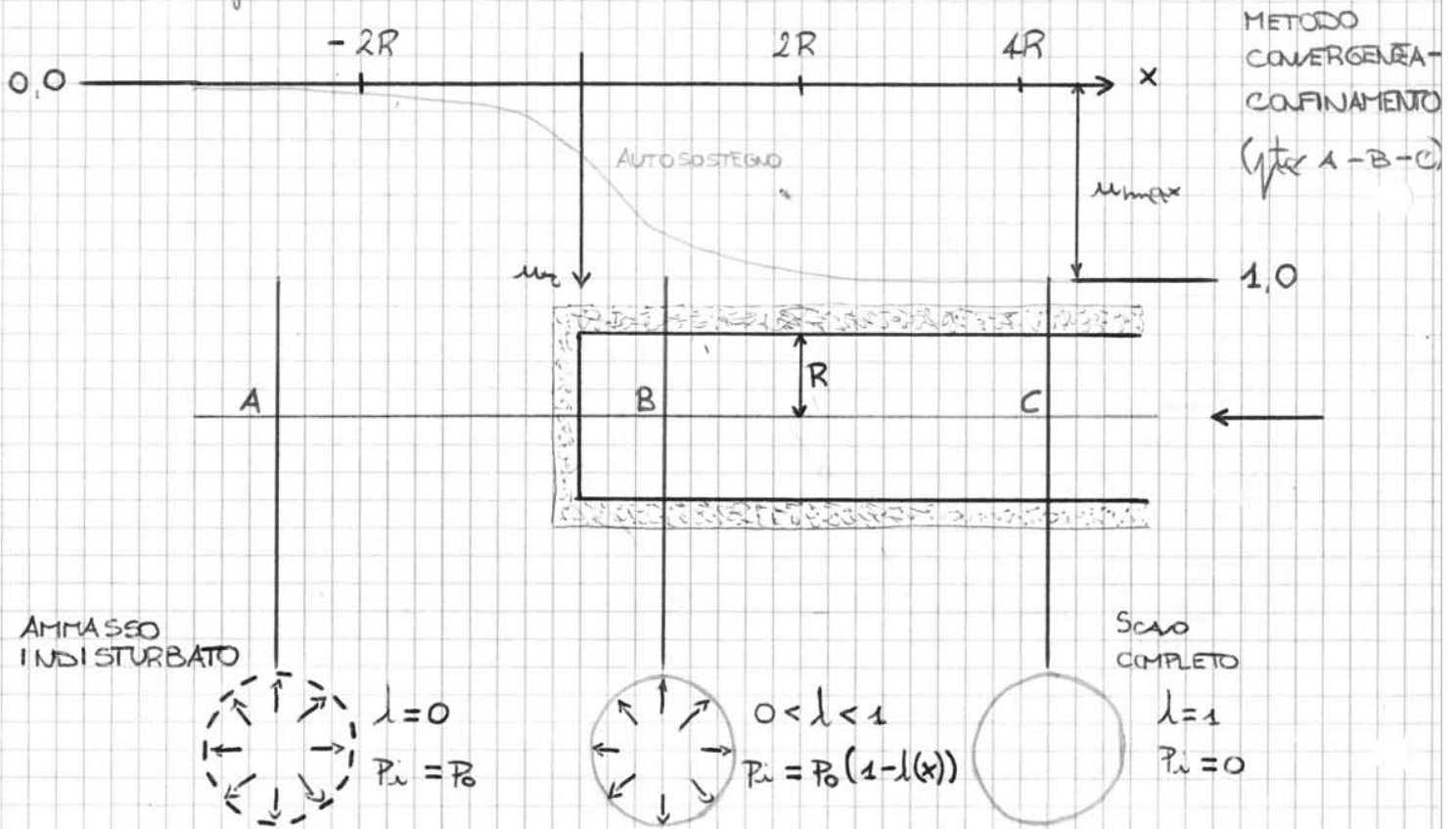
(Panet & Guéhenec 1974)

SPOSTAM. RADIALE



SPOSTAM. LONGITUDINALE

MONITORAGGIO AL FRONTE DI SCAVO:



Si può notare che prima dell'arrivo del fronte di scavo lo spostamento radiale è nullo, per aumentare poi gradualmente, subendo una forte accelerazione in corrispondenza del passaggio dello stesso fronte di scavo. Infine lo spostamento radiale si stabilizza sul valore finale calcolabile in base alle soluzioni analitiche, ad una distanza dal fronte di circa due diametri.

$$u_r(x) = u_r(\infty) \cdot \left[ 1 + \frac{-x/2a}{0,55} \right]^{-1,7}$$

dove  $u_r(0)$  è lo spostamento radiale che si ha sul fronte di scavo,  $u_r(\infty)$  quello a scavo completato,  $x$  la distanza dal fronte,  $a$  è il raggio della galleria e  $R_p$  il valore del raggio plastico.

$h(x)$ : aliquota dello spostamento totale  $u_r(\infty)$ , funzione della posizione della sezione rispetto al fronte di scavo.

Lo serve per determinare lo spostamento radiale e di riprodurre il fenomeno tridimensionale.

$(1-h)$ : è il reciproco di  $h$  e consente, moltiplicato per la pressione originaria in sito, di trovare la pressione interna corrispondente ad un determinato spostamento radiale  $u_r(x)$ .

Il fase di estrusione uno dei controlli più semplici e usuali è la misura di convergenza, cioè dello spostamento relativo tra punti posti sul profilo dello scavo.

MONITORAGGIO AL FRONTE DI SCAVO:



- 1 CONVERGENZA: mentre il fronte della galleria avanza, essere la convergenza della galleria.
- 2 MISURA DI CONVERGENZA: spostamento relativo tra punti posti sul profilo dello scavo.
- 3 ESTRUSIVE: il fronte viene indietro.
- 4 MIRE OTTICHE: 0 → mi permette di misurare pte per pte, dopo il fronte, lo spostam. longitud.



Esma a fondo di scavo

Attenzione agli spostamenti - deformazioni!!

- Si può definire  $l_e$  (in relazione al criterio scelto) per il quale si immescano zone plastiche sul perimetro di scavo.

• Mohr - Coulomb:

$$l_e = \frac{1}{N_{pm} + 1} \cdot \left[ N_{pm} - 1 + \frac{2}{N} \right]$$

• Hoek - Brown:

$$l_e = \frac{1}{4 \cdot N} \cdot [l_{mb}^2 + 8 \cdot l_{mb} \cdot N + 16 \cdot N - l_{mb}]$$

interenti messi in opera per stabilizzare lo scavo

CURVA CARATTERISTICA DEL "SOSTEGNO":

La curva o linea caratteristica del sostegno / rivestimento esprime il legame tra la pressione esercitata dallo stesso sulla parete della galleria ( $P_i$ ) e lo spostamento radiale ( $u_r$ ) a cui entrambi sono soggetti.

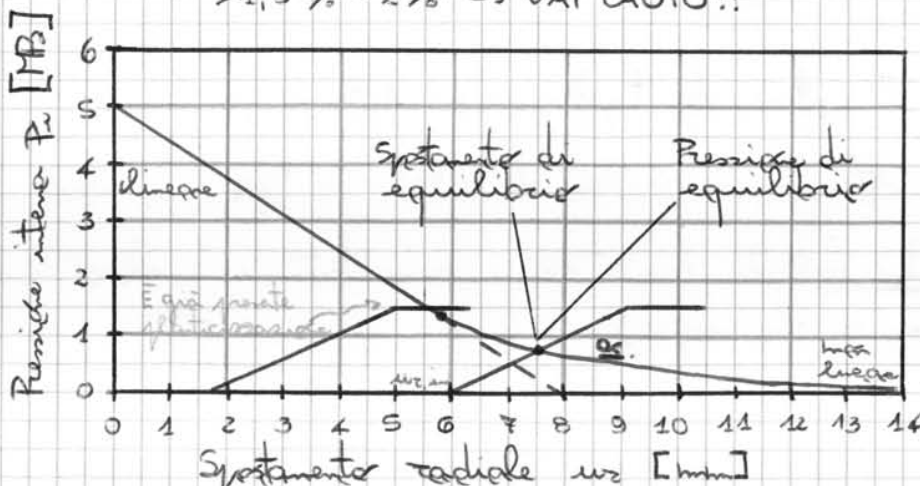
La curva caratteristica del sostegno è definita dalla rigidità del sostegno e dalla pressione limite che esso può sostenere.

Le condizioni di equilibrio tra roccia e sostegno / rivestimento vengono determinate dall'intersezione tra la curva caratteristica della galleria e quella del sostegno / rivestimento.

CURVA DEL SOSTEGNO:

N.B. Attenz. alla spost. diametrale → DEFORTUAZ. TROPPIA PLASTICIZZAZ. DEVO INTRODURRE IL SOSTEGNO. ↓ INTERVENIRE SUL FRONTE

L'intersezione mi rappresenta il conico sul rivestimento.



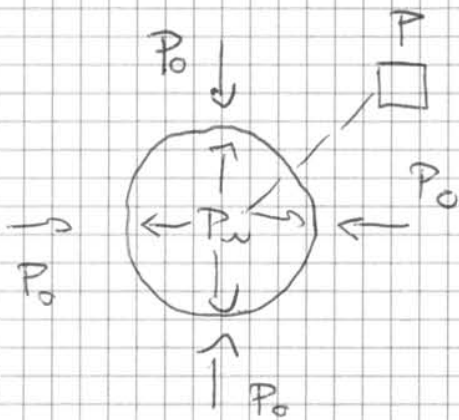
TROPPIA PLASTICIZZAZ. DEVO INTRODURRE IL SOSTEGNO. ↓ INTERVENIRE SUL FRONTE. → la pressione diminuisce.

È pratica usuale considerare che i sostegni operino in parallelo e che abbiano in comune lo stesso spostamento iniziale. Questa ipotesi comporta che la rigidità della cura caratteristica complessiva sia data dalla sommatoria delle rigidità dei diversi sostegni, mentre per quanto riguarda la pressione limite, spesso, per semplicità, si assume la pressione limite inferiore.



LA SCABREZZA, IN PRESENZA DI SPOSTAMENTI TANGENZIALI RELATIVI, È CAUSA DEL FENOMENO DELLA DILATANZA, CIOÈ L'ALLONTANAMENTO DEI LEMBI DELLA DISCONTINUITÀ NELLA DIREZIONE PERPENDICOLARE AL PIANO MEDIO CHE LA RAPPRESENTA.

è quella che si applica con il mio sostegno!!



$P_0$ : pressione idrostatica  
 $P_i$ : pressione indotta applicata uniforme

CADIZ. DEFORMAZ. PIANA  
 se la scappa galleria laterale dal fess

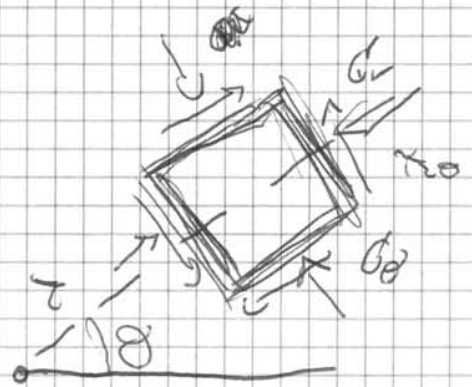
$$k_0 = \sigma_h / \sigma_v = 1$$

Sollecitazioni

$$\begin{bmatrix} \sigma_v \\ \sigma_\theta \\ \tau_{v\theta} \end{bmatrix}$$

Deformazioni

$$\begin{bmatrix} \epsilon_v \\ \epsilon_\theta \\ \gamma_{v\theta} \end{bmatrix}$$



Eq. equilibrio

$$\frac{\partial \sigma_v}{\partial z} = \frac{\sigma_v - \sigma_\theta}{r}$$

do??

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$$

Leggi costitutive:

$$\sigma_v = (\lambda + 2G) \epsilon_v + \lambda \epsilon_\theta$$

$$\sigma_\theta = (\lambda + 2G) \epsilon_\theta + \lambda \epsilon_v$$