

Le classifiche tecniche nel quadro del comportamento degli ammassi rocciosi

Elementi di geomeccanica

Paolo Tommasi

CNR - Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria

*Seminario organizzato da AGATAS in collaborazione con Ordine dei Geologi Trentino Alto Adige - Südtirol
Trento, 12-13 febbraio 2026, Servizio Geologico P.A.T*

L'ammasso roccioso "fratturato"

Concetti base
sull'ammasso

Nel caso più generale:
Blocchi → Costituiti dal **materiale roccioso** ("matrice")
separati da
discontinuità → **Superfici** più o meno regolari (separazione completa o parziale)



L'ammasso roccioso "fratturato"

Concetti base
sull'ammasso

Comportamento
meccanico/idraulico
dell'ammasso roccioso



Comportamento **meccanico/idraulico**
delle discontinuità

Distribuzione spaziale e orientazione
delle discontinuità

Comportamento meccanico/idraulico
del materiale roccioso dei blocchi



NON È una semplice
somma di contributi

Altri tipi di ammasso roccioso

Concetti base
sull'ammasso

Più raramente:

- Le **discontinuità** sono praticamente **assenti** ➡ comportamento meccanico/idraulico
ammasso = materiale



- Le **discontinuità** sono molto spaziate ➡ comportamento meccanico/idraulico
dipende dalla **scala del problema!!**



Il materiale roccioso

Il materiale costituente i blocchi (o l'intero ammasso)

Il materiale
roccioso

Rocce **dure** e **fragili** (*hard brittle*)

- Porosità, ***n***, bassa (< di **qualche %**):
 - micropori (isometrici e microfessure)
 - macropori assenti o occasionali
- Rocce cristalline (igneie, metamorfiche)
- Rocce sedimentarie (calcari, arenarie molto cementate)

- Resistenza e rigidità elevate
- Rottura a taglio e trazione
- Comportamento fragile

Rocce **tenere** (*soft/weak*)

- Elevata porosità (**fino al 40 %**):
 - macropori
 - micropori per lo più isometrici
- Rocce piroclastiche e calcareniti
- Rocce argillose
- Rocce cristalline **alterate**

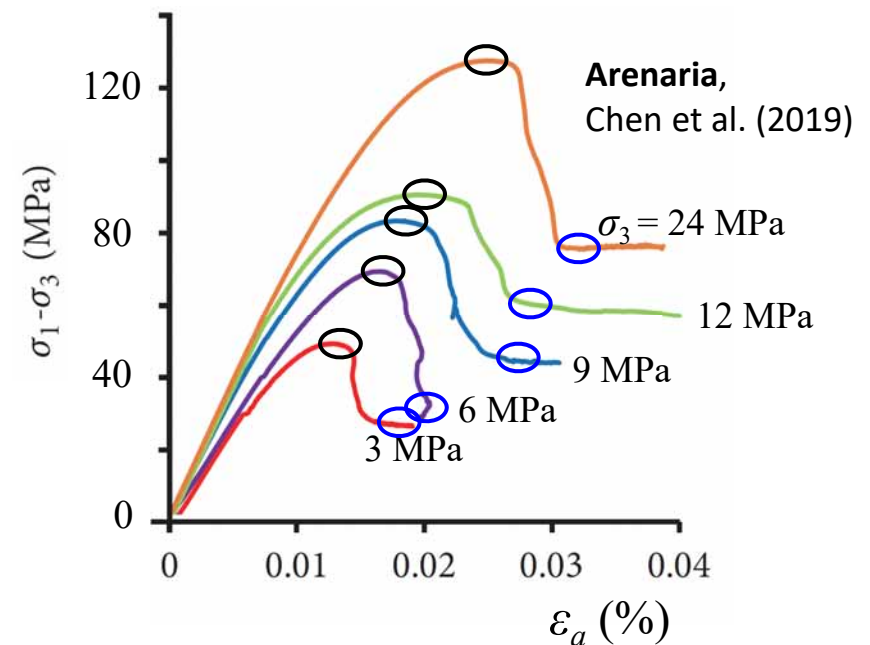
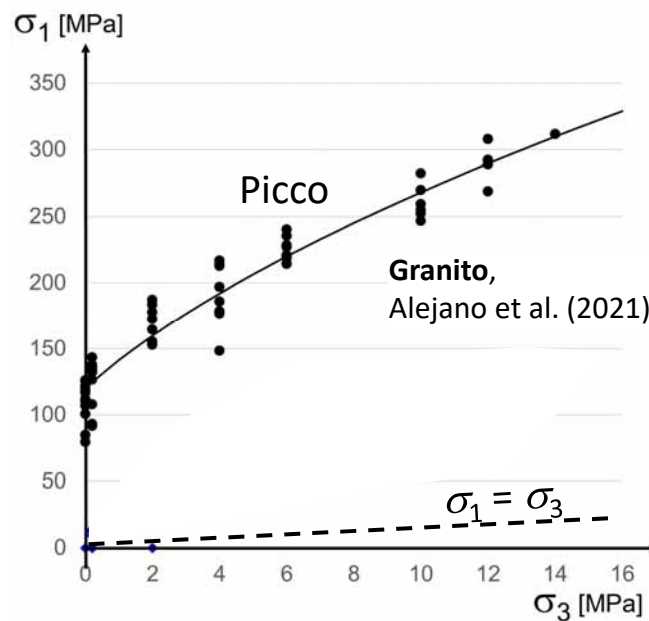
- Resistenza e rigidità basse
- Rottura a taglio e a trazione
- Plasticizzazione in condizioni isotrope
- Comp. fragile a **bassi sforzi confinamento**

Ammassi in rocce dure o tenere si comportano diversamente

Resistenza rocce dure e fragili

Il materiale
roccioso

- Involuppo di resistenza **non lineare**, curva "**aperta**" rispetto a linea $\sigma_1 = \sigma_3$
- **Elevata fragilità** differenzia nettamente la resistenza in condizioni di **picco** e **residue**



- Fragilità tende a diminuire **solo per valori di σ_3 molto elevati**

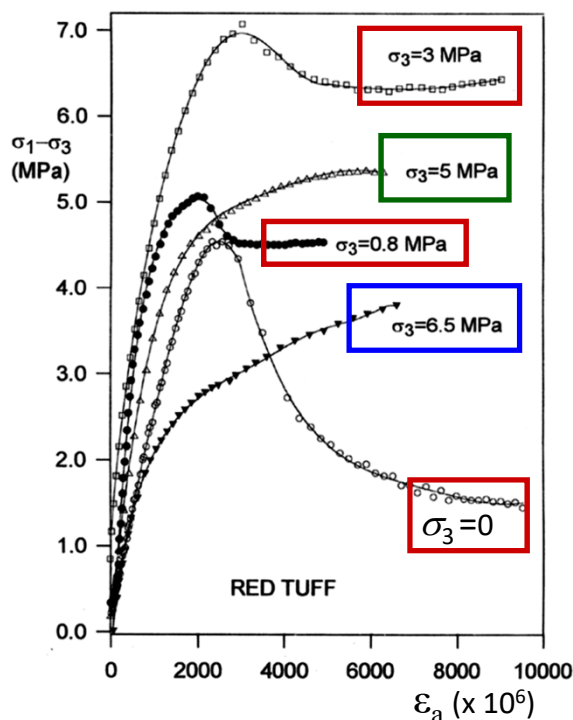
Resistenza rocce tenere

Il materiale
roccioso

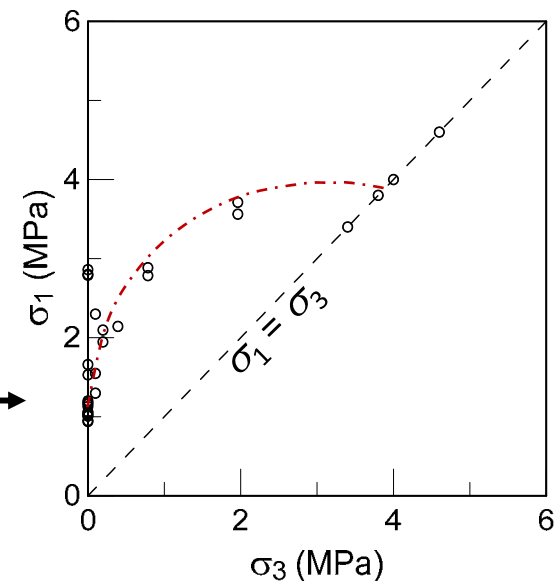
- Inviluppo non lineare e curva intrinseca **chiusa** sulla linea $\sigma_1 = \sigma_3$



Materiale si plasticizza anche in compressione isotropa



← Tufo litoide →



- Fragilità dipende dallo sforzo di confinamento, σ_3 , **anche a bassi valori di σ_3**
- Al crescere di σ_3 , il comportamento sforzi-deformazioni passa da **fragile** a **duttile** e anche **incrudente positivamente**

Un commento sulle curve sforzi-deformazioni

Il materiale
roccioso

Rocce dure

Presenza microfessure



Tratto iniziale a concavità verso l'alto

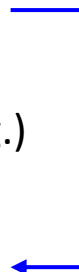
+

Tratto intermedio quasi lineare

+

Tratto finale non lineare (dannegg.)

Modulo elastico 50% UCS (E_{t50})



Rocce tenere

Prevalenza pori isometrici



Curve $\sigma_a - \varepsilon_a$ hanno concavità verso il basso fin da modesti carichi assiali

Rappresentazione risultati

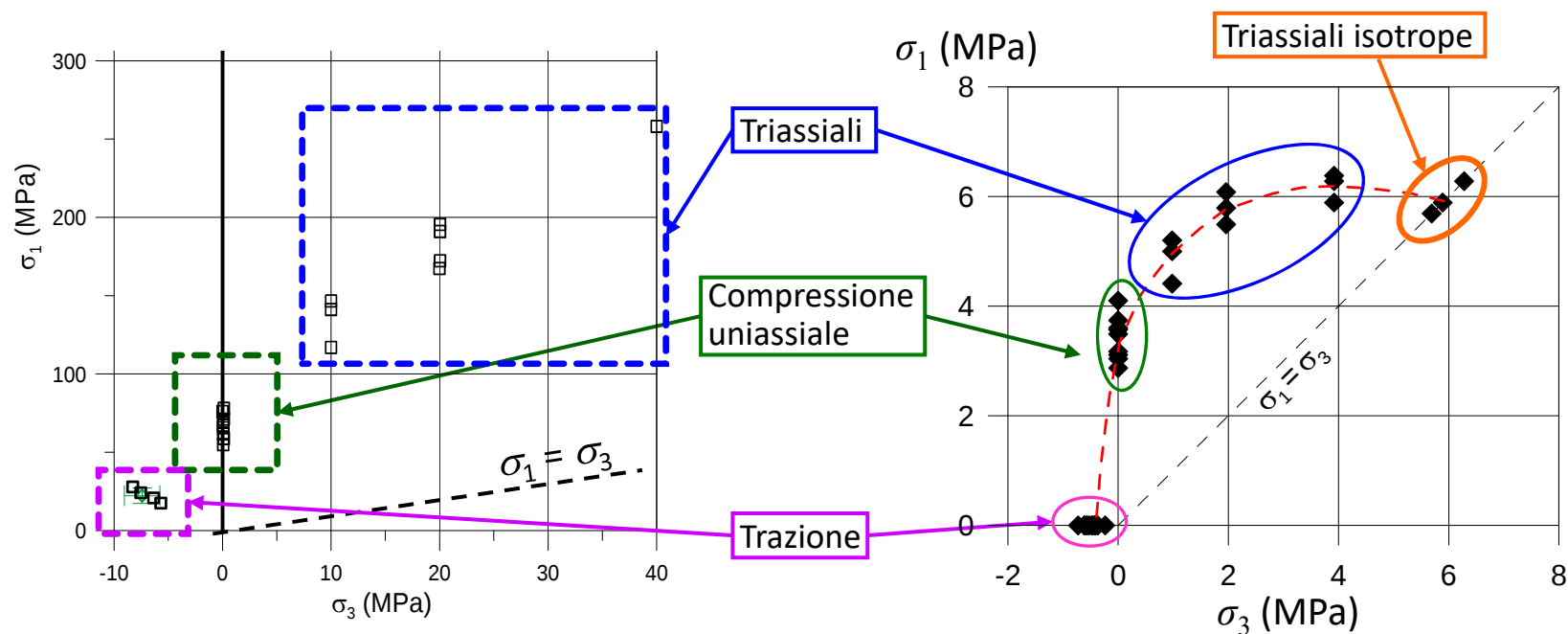
Il materiale
roccioso

■ Dati rocce **dure**:

- piano $\sigma_1 - \sigma_3$
- più raramente piano $\sigma_n - \tau$

■ Dati rocce **tenere** :

- piano $\sigma_1 - \sigma_3$
- piano invarianti $p - q$
- piano $\sigma_n - \tau$



La resistenza a compressione uniassiale (*UCS*)

Il materiale
roccioso

Classifica in base alla resistenza a compressione uniassiale (ISRM, 1984)

CLASSE	RESISTENZA	σ_f (MPa)
A	molto alta	> 200
B	alta	60 ÷ 200
C	media	20 ÷ 60
D	bassa	6 ÷ 20
E	molto bassa	< 6

Rocce dure

Criteri resistenza – criterio di Mohr-Coulomb

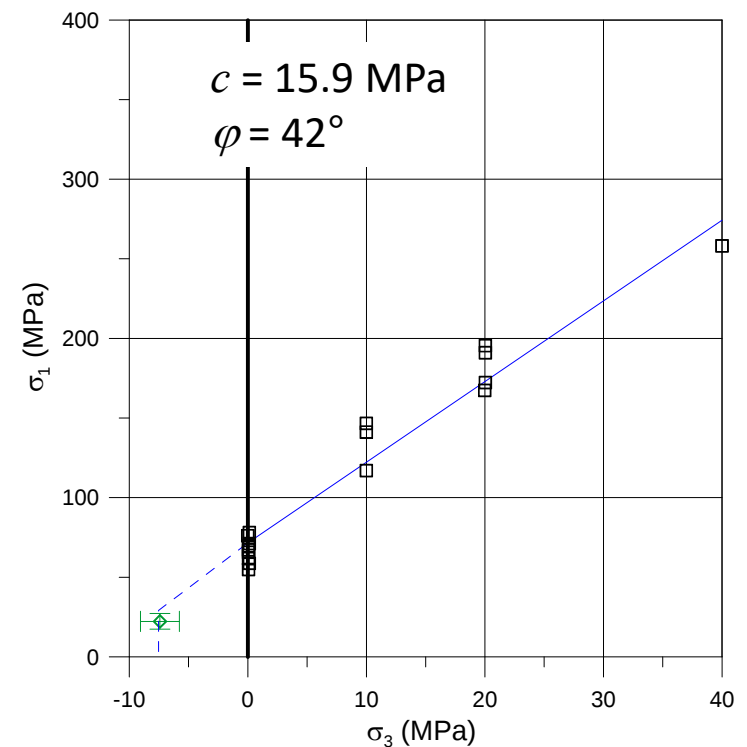
Il materiale
roccioso

- Criterio **teorico lineare** a 2 parametri
- Definito nel piano $\tau - \sigma_n$ ma nelle rocce è rappresentato nel piano $\sigma_1 - \sigma_3$

$$\sigma_1 = 2c \sqrt{N} + N \sigma_3$$

$$\text{Con } N = \frac{1 + \sin \varphi}{1 - \sin \varphi}$$

- Nel campo degli sforzi di trazione la curva si tronca (**tensile cut-off**) per $\sigma_t \sim c/2$



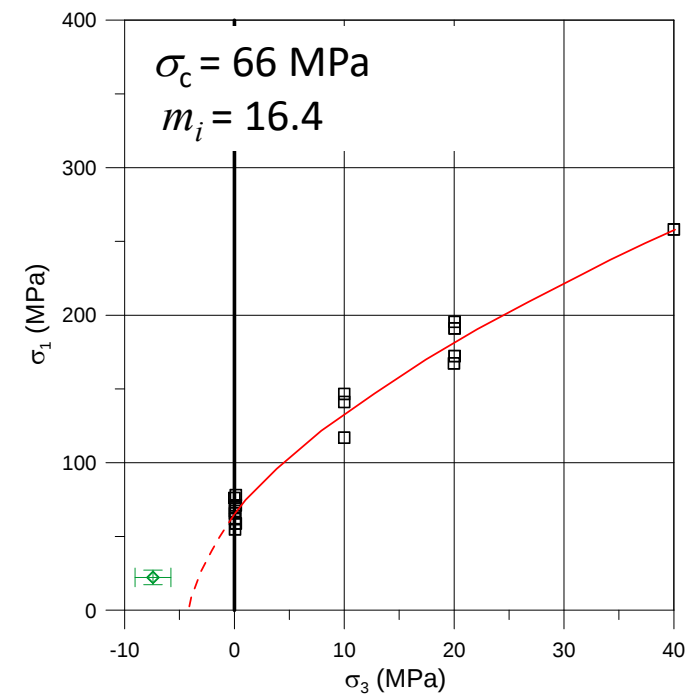
Criteri resistenza – Criterio di Hoek-Brown

Il materiale
roccioso

- Criterio **empirico NON lineare** a 3 parametri definito nel piano $\sigma_1 - \sigma_3$
- Tiene conto della effettiva non linearità dei dati di resistenza

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{(m_i \sigma_{ci} \sigma_3 + s \sigma_{ci}^2)}$$

- s tiene conto dei difetti (i.e. discontinuità):
per il materiale roccioso $s = 1$ (no difetti)
- Nasce per le rocce dure

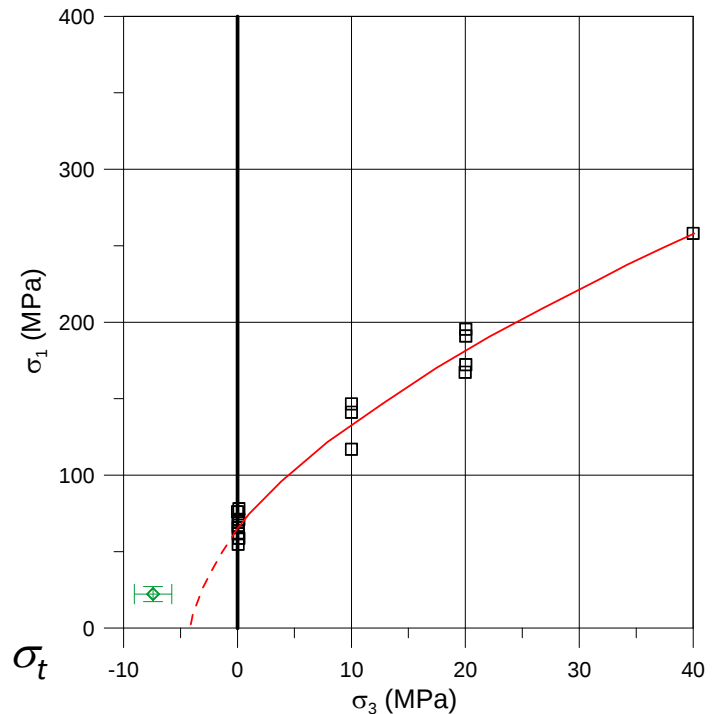


Criteri resistenza – Criterio di Hoek-Brown

Il materiale
roccioso

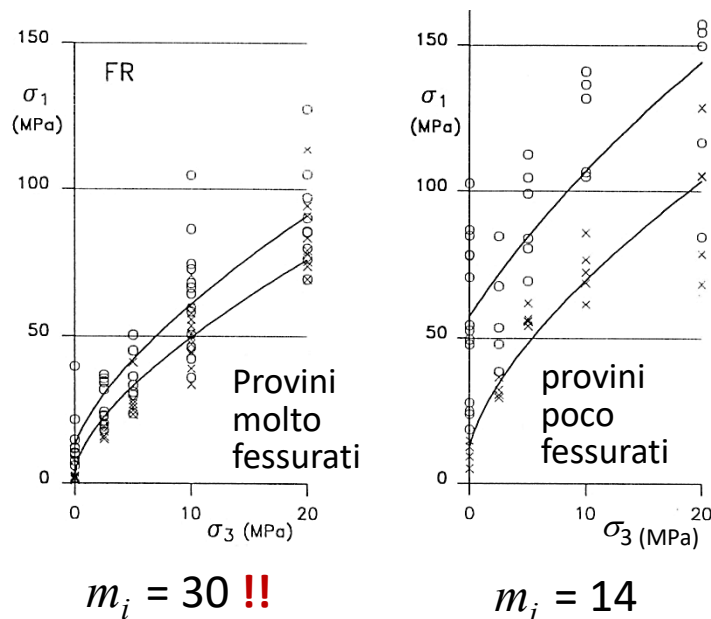
- σ_{ci} : resistenza in **condizioni** uniassiali della roccia intatta (**diversa** da UCS sperimentale)
- m_i : effetto **tensione di confinamento** sulla resistenza della roccia intatta
- m_i e σ_{ci} da regressione dati sperimentali
- Dati prove trazione **indiretta** NON sono generalmente usati nella regressione
- Stima soddisfacente della resistenza a trazione σ_t in condizioni triassiali ($\sigma_1 = \sigma_2 = -\sigma_t$)

$$\sigma_t = \frac{\sigma_{ci}}{m_i} s$$



Materiali rocciosi fessurati

Il materiale roccioso



$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{(m_i \sigma_{ci} \sigma_3 + s \sigma_{ci}^2)}$$

Calcari Grigi (Tommasi et al., 2008)

- Solo assumendo $s < 1$ e un m ricavato di conseguenza si hanno parametri di resistenza realistici
- Se potessimo fare prove triassiali spinte oltre il picco, potremmo ricavare i valori residui per l'ammasso (Ribacchi, 2000)



Parametri di resistenza tipici

Il materiale
roccioso

MOHR-COULOMB

	c (MPa)	N	φ (°)
Marne - Argilliti	4÷16	3.2÷3.7	32÷35
Arenarie	12÷36	4.2÷6.0	38÷46
Filladi	9÷23	3.4÷3.8	33÷36
Calcari	13÷40	4.2÷5.8	38÷45
Gneiss	30÷37	4.2÷5.3	38÷43
Graniti	18÷50	4.2÷8.4	38÷52

HOEK-BROWN

	σ_{ci} (MPa)	m_i
Marne - Siltiti	10÷60	10 (7÷11)
Arenarie	40÷200	14 (7÷22)
Calcari	50÷200	8 (5.5÷14)
Graniti - Granodioriti	100÷300	28 (26÷32)

Stima di *UCS* con prove speditive - point load test

Il materiale
roccioso

Classifica in base alla resistenza al **carico puntuale** (Bieniawski, 1973)

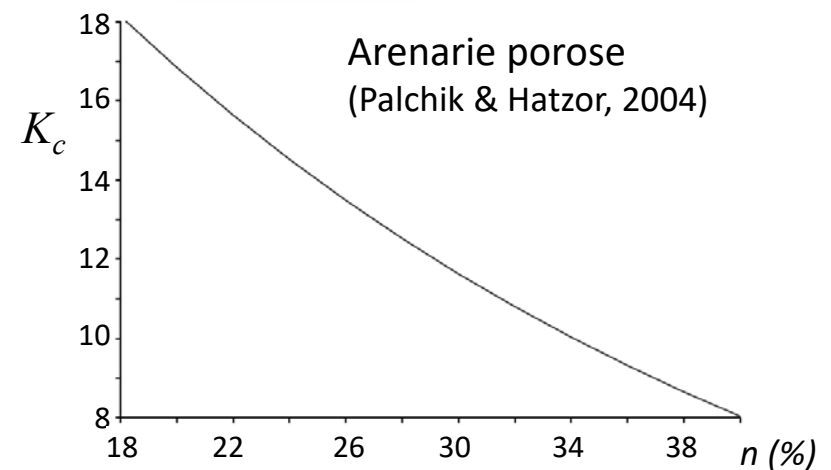
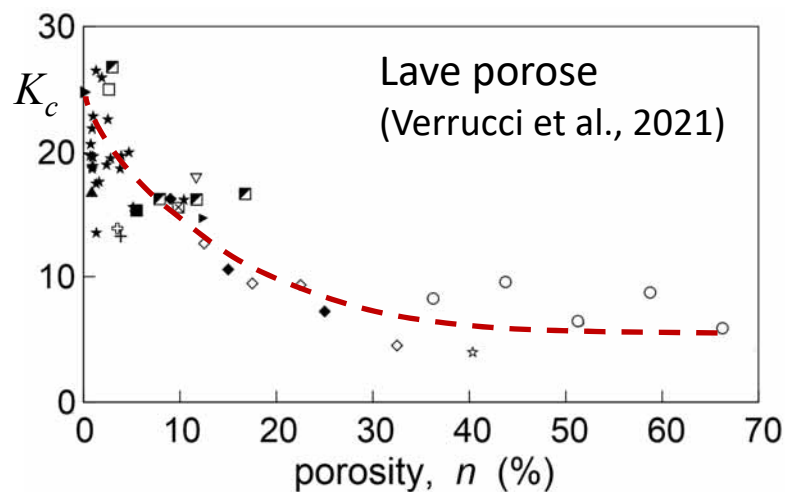
CLASSE	RESISTENZA	$I_{s,50}$ (MPa)	σ_f (MPa)
A	Resistenza molto alta	> 8	> 200
B	Resistenza alta	$4 \div 8$	$60 \div 200$
C	Resistenza media	$2 \div 4$	$20 \div 60$
D	Resistenza bassa	$1 \div 2$	$6 \div 20$
E	Resistenza molto bassa	< 1	< 6

$$\sigma_f = K_c I_{s,50}$$

$$K_c = 22 \div 24$$

(ISRM, 1985)

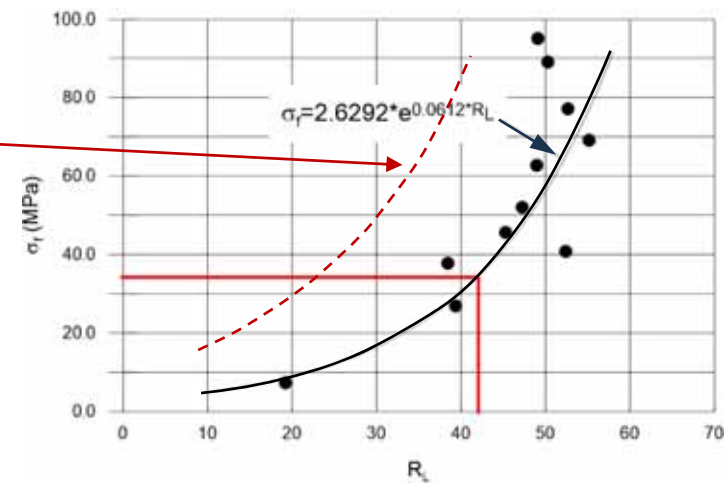
È sempre vero ?!



Stima di UCS con prove speditive - sclerometro

Il materiale
roccioso

- UCS da altezza di rimbalzo R_L da prove con sclerometro tipo L
- Prove su carote (con blocco di acciaio di ancoraggio)
- Stima UCS da abaco / formula di Deere e Miller: $UCS = f(R_L, \gamma)$
- **Curve di conversione** $R_L \Rightarrow UCS$ per un dato materiale da misure in parallelo di R_L e UCS sugli stessi provini
- È possibile ricavare R_L da misure con martello tipo N (ISRM, 2015)

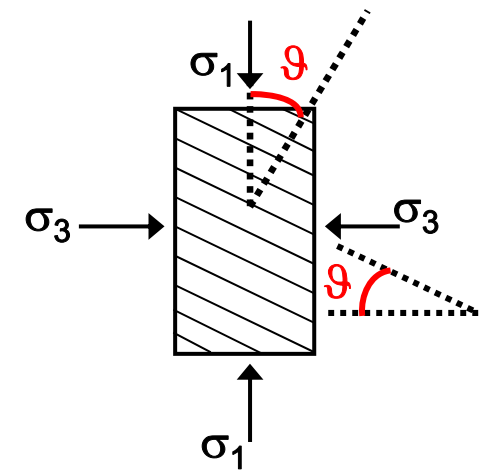
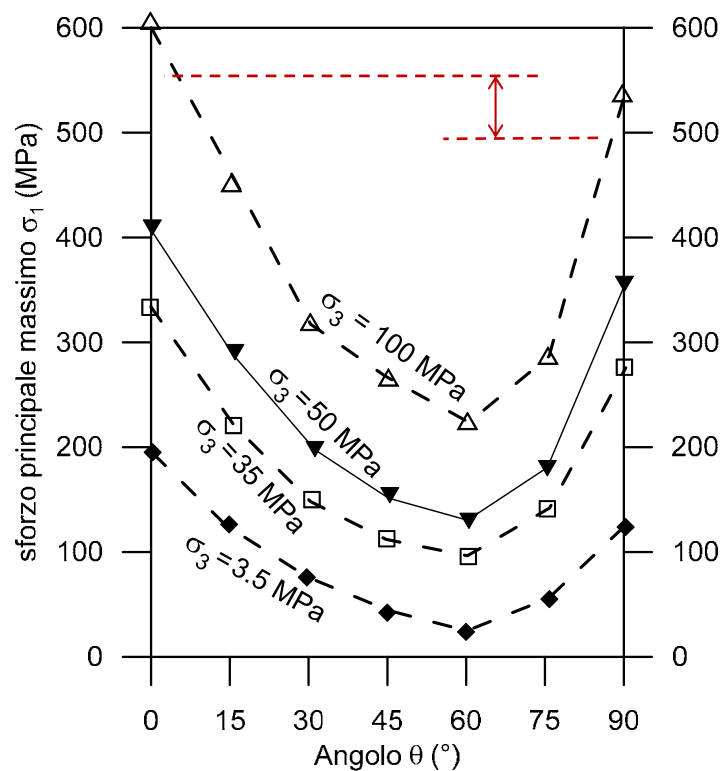


$$R_N = 1.0646 R_L + 6.3673$$

Resistenza rocce anisotrope

Il materiale
roccioso

Resistenza dipende da angolo ϑ tra direzioni principali e giacitura piani deboli

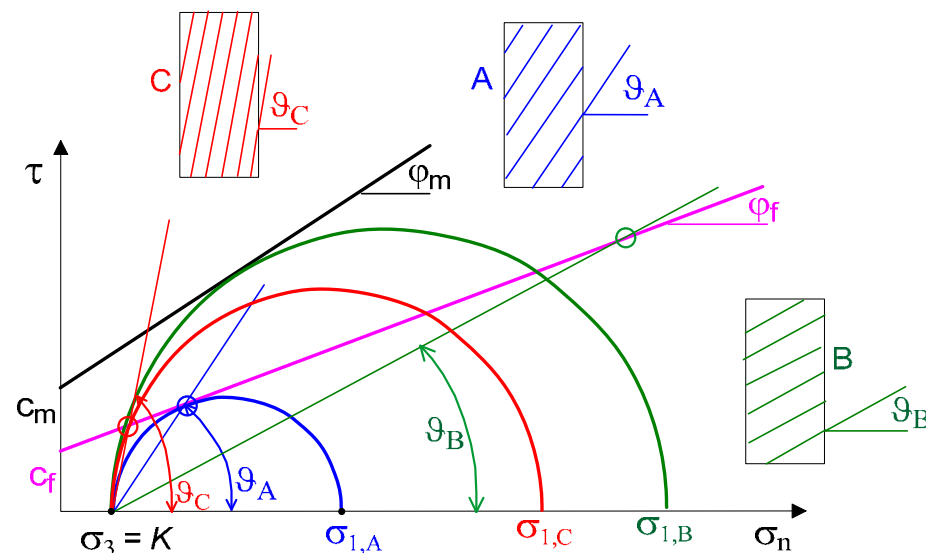
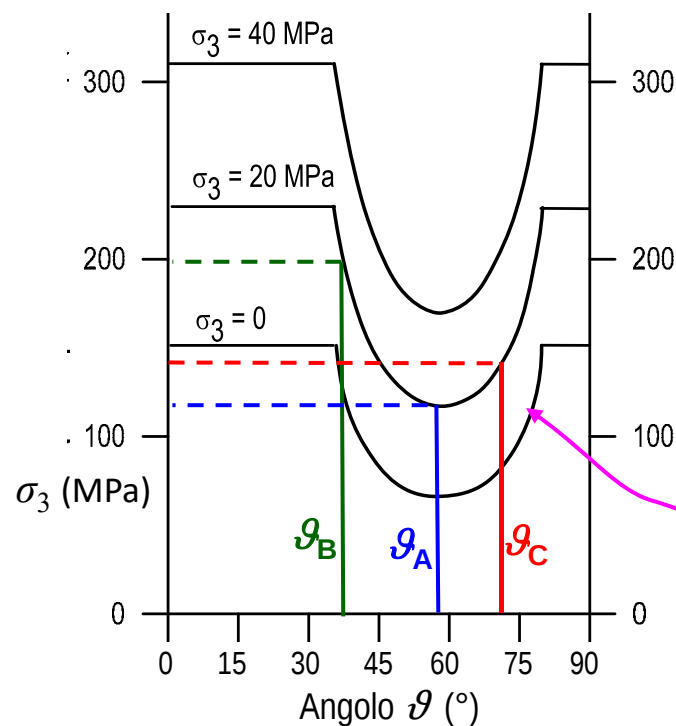


Prove uniassiali e triassiali su provini di fillade con diversi valori di ϑ (Donath 1963)

Resistenza rocce anisotrope - Criterio di Jaeger

Il materiale
roccioso

- Combina due curve intrinseche MC:
matrice rocciosa + **piani scistosità**



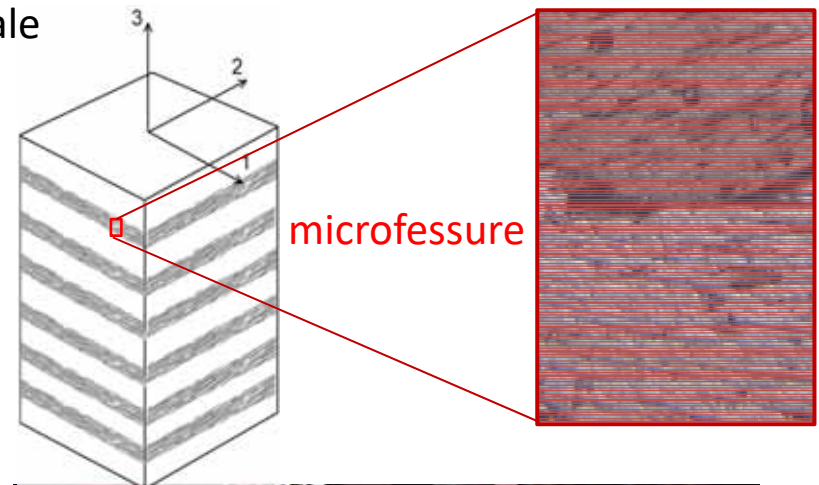
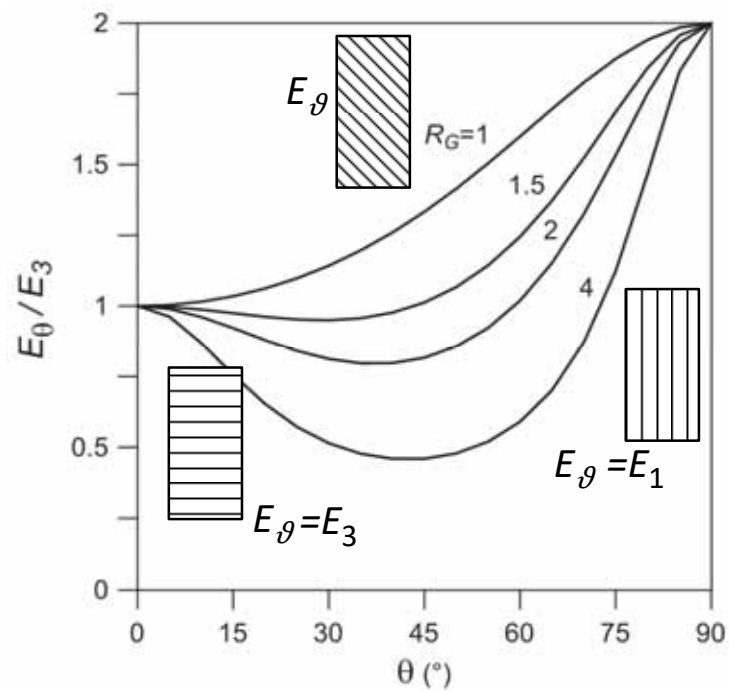
$$\sigma_1 = \sigma_3 + 2 \frac{\sigma_3 + \sigma_3 \tan \varphi_f}{\sin 2\vartheta - \tan \varphi_f (1 + \cos 2\vartheta)}$$

Rigidezza materiali scistosi

Il materiale
roccioso

Modulo semplificato > modulo reale
(ipotesi Saint-Venant)

$R_G = \tilde{G}_{31} / G_{31}$ Modulo reale



Ammassi in rocce dure

Il materiale
roccioso

Blocchi hanno resistenza e
rigidezza **elevate**

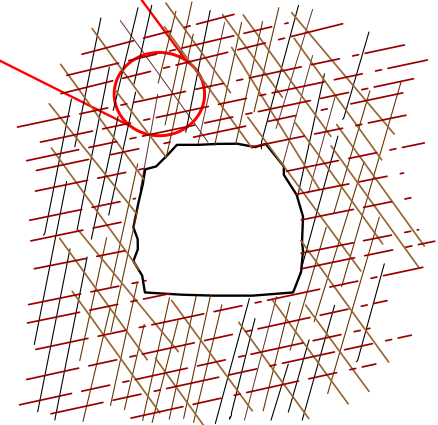
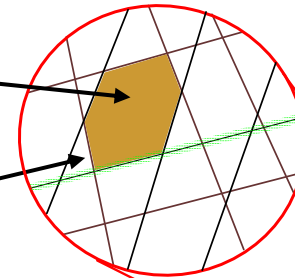
Discontinuità hanno
resistenza e rigidezza **basse**



Resistenza e rigidezza dell'ammasso sono
controllate dalle **discontinuità**

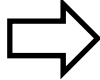
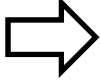


Ammasso si deforma plasticamente per scorrimento
dei blocchi lungo le discontinuità



Ammassi in rocce tenere

Il materiale
roccioso

- Ammassi **fratturati**  La rottura coinvolge **sia le discontinuità che il materiale dei blocchi**
- Ammassi **non fratturati o con rare fratture** (formazioni **recenti**: piroclastiti, calcareniti)  La rottura avviene **solo nel materiale** o coinvolgendo **poche discontinuità**

Quando usiamo la resistenza del materiale roccioso

Il materiale
roccioso

- Nel valutare la resistenza dell'**ammasso** roccioso
 - **Direttamente**, insieme alle caratteristiche delle discontinuità, nel caso si schematizzi l'ammasso come un mezzo discontinuo
 - **Indirettamente**, scalata attraverso l'indice GSI , nel criterio di resistenza dell'ammasso di Hoek-Brown, nel caso si schematizzi l'ammasso come un mezzo continuo equivalente
 - Nelle **classifiche tecniche** (RMR, Q-index)
 - Nel valutare le prestazioni delle TBM
 - Nel valutare il comportamento di strutture artificiali in roccia (es. rockfill, dighe in murature di blocchi di roccia)
- } Alla scala
del blocco

Le discontinuità - distribuzione spaziale

Come si dispongono nello spazio le discontinuità

Distrib. spaz.
discontinuità

- Orientazione
(sistematicità)
- Spaziatura
(intensità dello stato
di fratturazione)
- Estensione/continuità

Orientazione (sistematicità)

Distrib. spaz.
discontinuità

- In galleria orientazione delle discontinuità può essere ricavata da:
 - rilievi tradizionali con bussola
 - rilievi remoti fotogrammetrici o con laser scanner
- Attenzione agli errori di sotto-campionamento di alcuni sistemi, soprattutto con rilievi remoti (fotogrammetria, laser scanner) (vedi AGI, 2024)
- Sistematicità:
 - famiglie distinte (numero),
 - famiglie + giunti con orientazione random,
 - assenza di famiglie → giunti con orientazione random (no sistematismi)
 - assenza di famiglie ma presenza di un criterio di orientazione (lave colonnari, duomi lavici, particolari strutture tettoniche)
- Prevalenza di 1/2 famiglie → anisotropia/gerarchizzazione nelle classifiche tecniche
- Giacitura media + Parametri di dispersione (immersione, inclinazione $\forall$ famiglia)

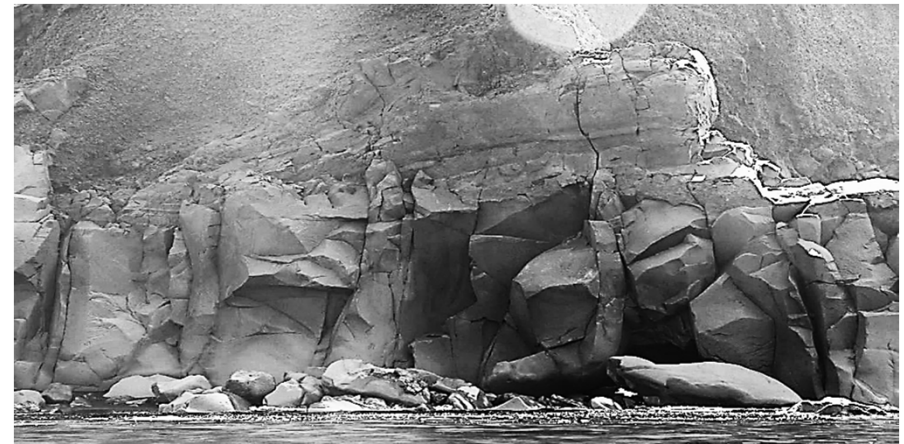
Orientazione (sistematicità)

Distrib. spaz.
discontinuità

- Ammasso con **3 sistemi** di giunti **planari** quasi ortogonali di **uguale importanza**



- Ammasso con giunti **irregolari** orientati **casualmente**



Orientazione (sistematicità)

Distrib. spaz.
discontinuità

- Ammasso con 4 famiglie, 2 prevalenti



- Ammasso con 1 famiglia prevalente



Orientazione (sistematicità)

Distrib. spaz.
discontinuità

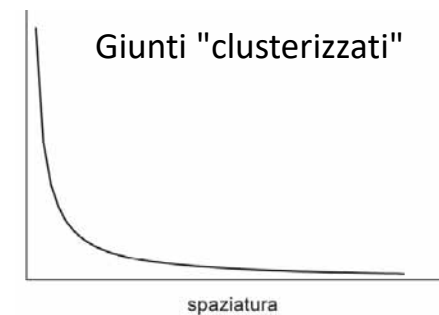
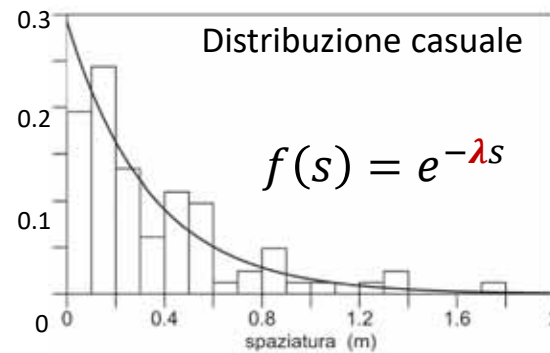
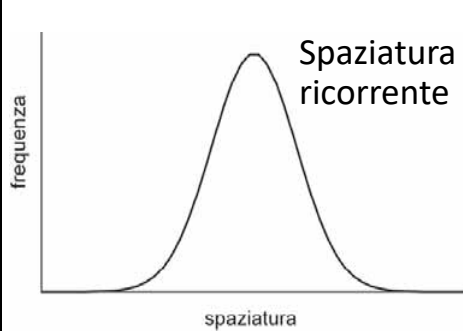
- Zonazione dell'area di lavoro in domini "strutturali" con diversa orientazione
- I domini strutturali possono cambiare anche a scala relativamente piccola



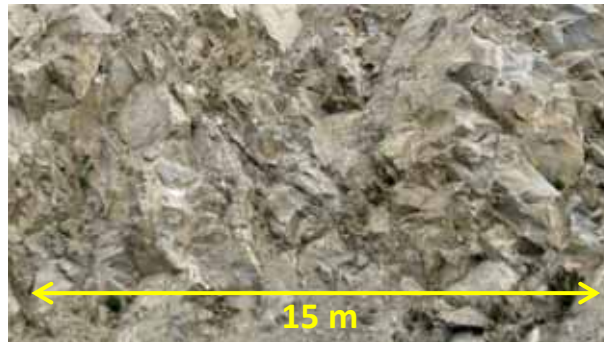
Spaziatura, spaziatura media/frequenza

Distrib. spaz.
discontinuità

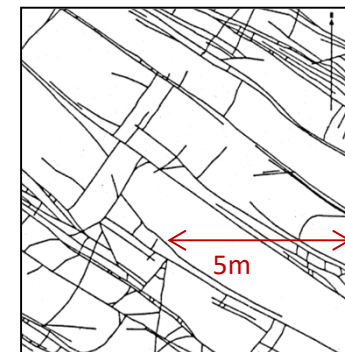
- Spaziatura, s , vista in termini di distribuzione di frequenza (es. Priest & Hudson 1976)
- Varia nei diversi tipi di ammasso e nello stesso ammasso per diversi tipi di discontinuità



Stratificazione, scistosità,
giunti raffreddamento



Rocce cristalline o con stratificazione/
scistosità non prevalenti (massive)



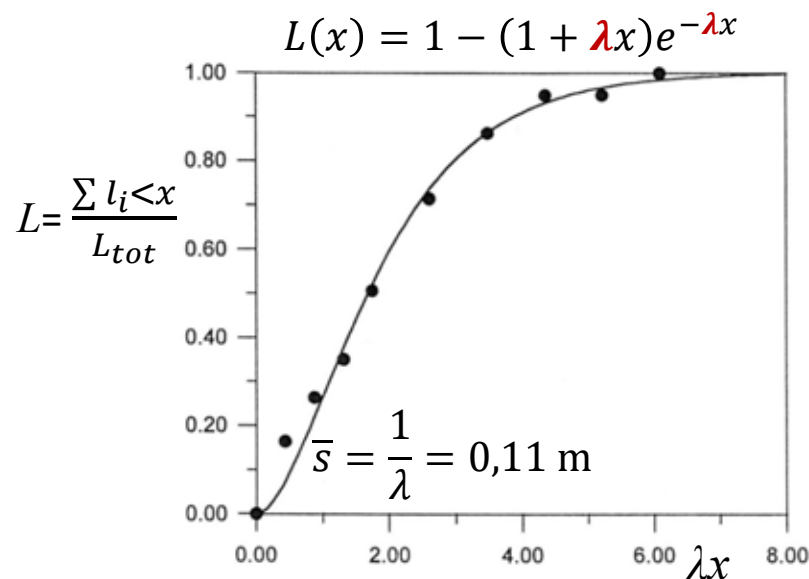
associati a rotture, ciclotemi

Spaziatura media/frequenza, RQD

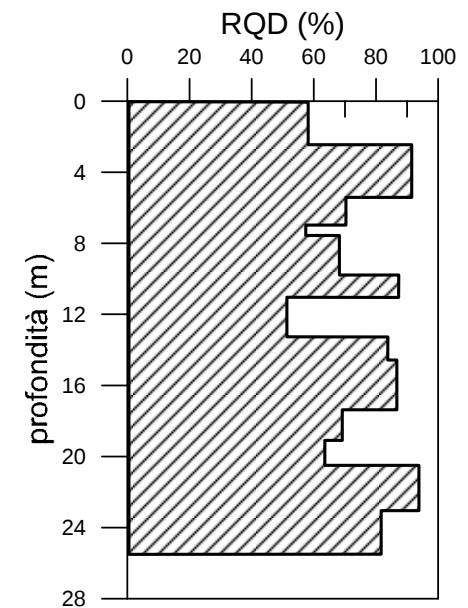
- Riferirsi a **raccomandazioni ISRM (1978)**
- Se possibile determinare valore totale e per famiglia → **gerarchizzazione nel rating**

Termine descrittivo	spaziatura media (m)
Molto ravvicinata	< 0.06
Ravvicinata	0.06 ÷ 0.20
Moderatamente ravvicinata	0.20 ÷ 0.60
Spaziata	0.60 ÷ 2.0
Molto spaziata	> 2.0

Distrib. spaz.
discontinuità

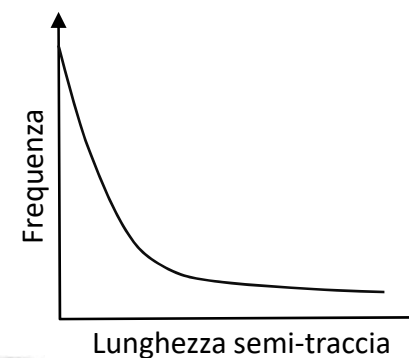


- Spaziatura media e **soprattutto RQD** non sempre descrivono al meglio lo stato di fratturazione

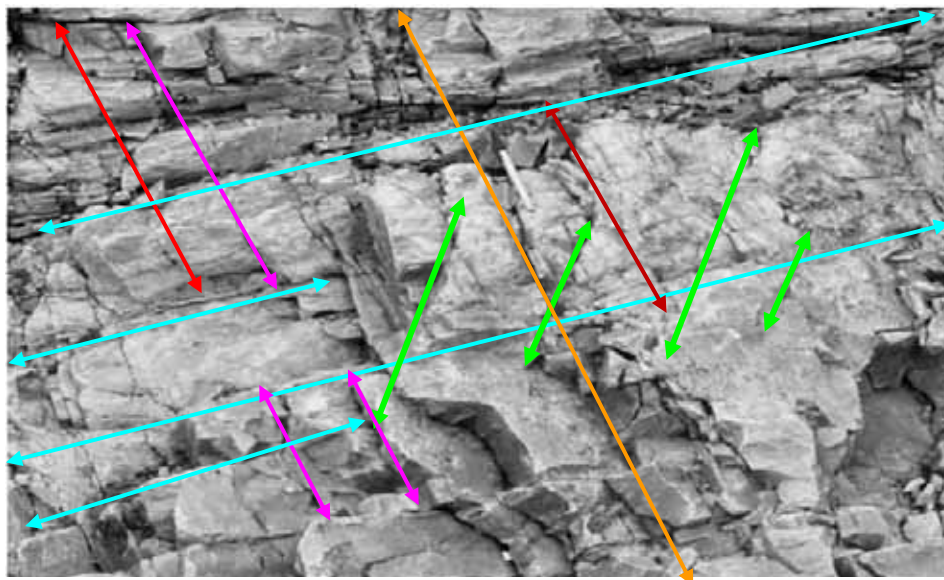


Estensione

- **Estensione** areale è molto difficile da determinare
- Più semplice è determinare la **lunghezza delle tracce**
- Anche per le tracce delle fratture: distribuzioni Poisson



Distrib. spaz.
discontinuità



- Giunti di strato più estesi
- Fratture generalmente estensione minore

Continuità (persistenza)

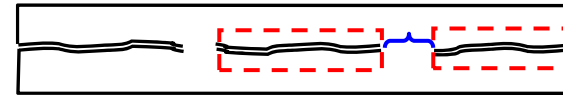
Distrib. spaz.
discontinuità

- Giunti **intermittenti allineati** sullo stesso piano separati da roccia intatta
- Giunti **intermittenti NON** allineati sullo stesso piano separati da roccia intatta
- Giunti con porzioni **ricementate** successivamente

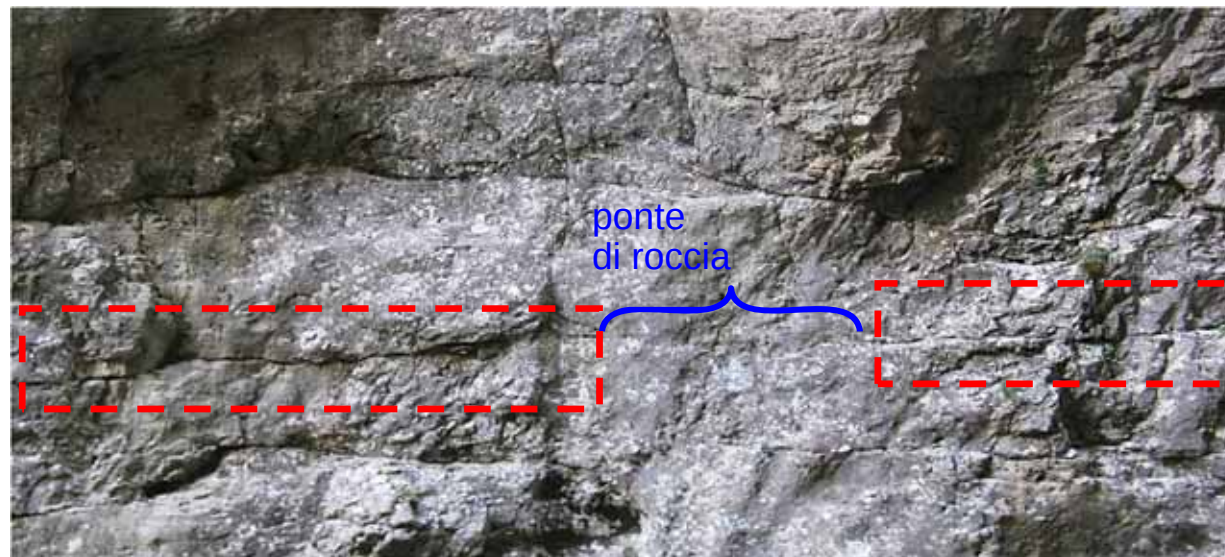
Ponti di roccia

Continuità

- Giunti **intermittenti allineati** sullo stesso piano separati da roccia intatta



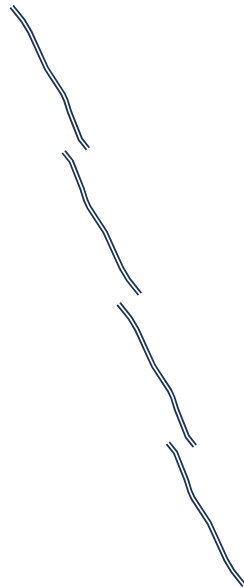
Distrib. spaz.
discontinuità



Continuità

- Giunti **intermittenti** **NON** allineati sullo stesso piano separati da roccia intatta

Distrib. spaz.
discontinuità



Continuità

- Giunti contenenti **porzioni ricementate** successivamente

Distrib. spaz.
discontinuità



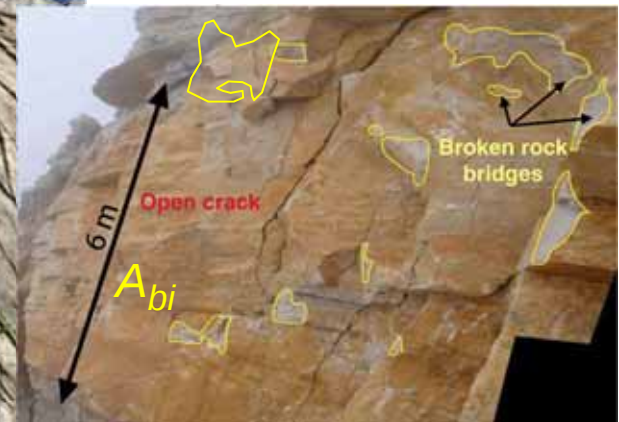
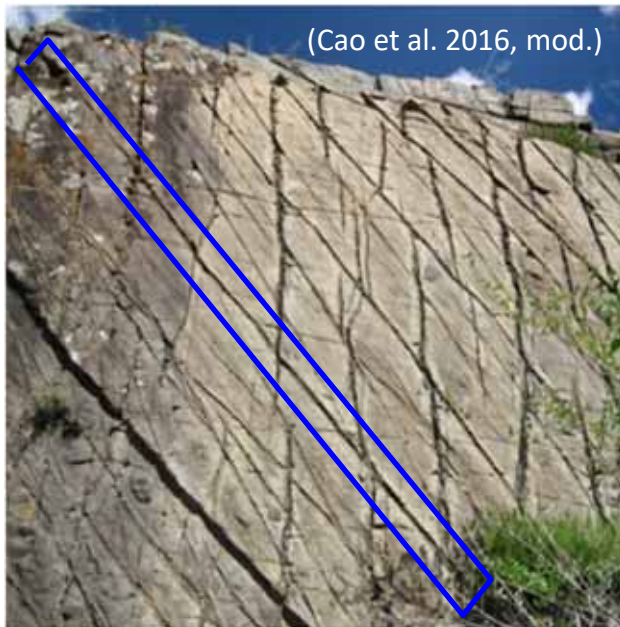
Le discontinuità - comportamento meccanico e idraulico

Giunti con diverso comportamento meccanico-idraulico

Caratteristiche delle superfici che determinano comportamenti nettamente diversi

- Ponti di roccia
 - Assenti (giunti continui) $\Rightarrow$ coesione e resistenza trazione **nulle**
 - Presenti (giunti discontinui) $\Rightarrow$ **coesione, resistenza a trazione**

Comp. mecc.
e idraulico
discontinuità



(Levy, 2011)

Giunti con diverso comportamento meccanico-idraulico

Comp. mecc.
e idraulico
discontinuità

- **Senza** riempimento



Comportamento
meccanico/idraulico legato
all'interazione tra superfici
di roccia e all'apertura



- **Con** riempimento
NON lapideo

a grana
grossa

a grana
fine



Comportamento
meccanico/idraulico
legato all'interazione
roccia-riempimento o
al solo riempimento



Fattori “chiave” del comportamento, giunti NON riempiti

Comp. mecc.
e idraulico
discontinuità

■ Giunti **senza** riempimento

Giunti **continui**

- Scabrezza/ondulazioni
- Resistenza pareti
- Alterazione pareti

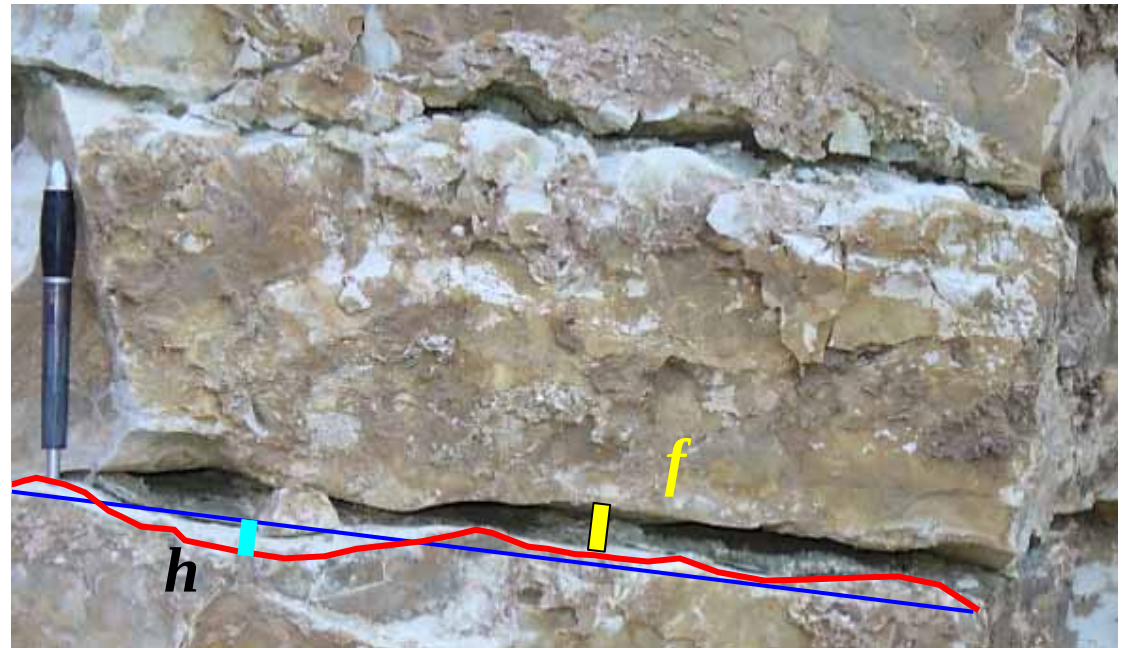
Giunti **discontinui**

- $R_b = \frac{\sum A_{b_i}}{A_{tot}}$ area ponti
area tot. giunto
- **Resistenza** materiale ponti

Fattori “chiave” del comportamento, giunti riempiti

Comp. mecc.
e idraulico
discontinuità

- Giunti **con** riempimento
 - Altezza asperità, h
 - Spessore, f , riempimento
 - Resistenza riempimento



La scabrezza dei giunti, un parametro di scala

Comp. mecc.
e idraulico
discontinuità

- Scabrezza a scala del provino
- Scabrezza a media scala/ondulazioni con bassa λ
- Ondulazioni a grande scala
- Scabrezza a piccolissima scala



La scabrezza dei giunti, un parametro di scala

Comp. mecc.
e idraulico
discontinuità

- Scabrezza a scala del provino
- Scabrezza a media scala/
ondulazioni con bassa λ
- Ondulazioni a grande scala
- Scabrezza a piccolissima scala



La scabrezza dei giunti, un parametro di scala

Comp. mecc.
e idraulico
discontinuità

- Scabrezza a scala del provino
- Scabrezza a media scala/ondulazioni con bassa λ
- Ondulazioni a grande scala
- Scabrezza a piccolissima scala



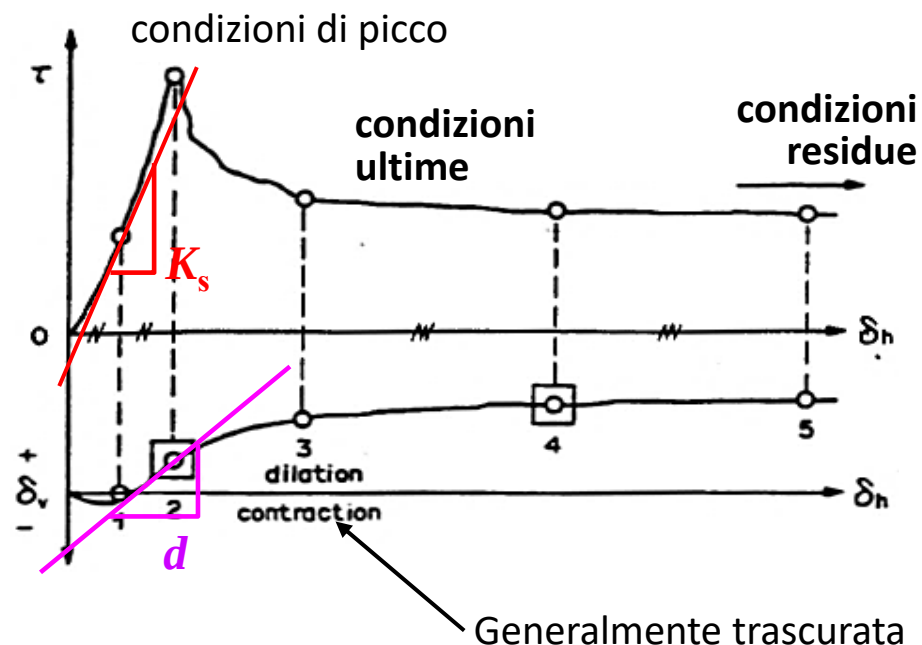
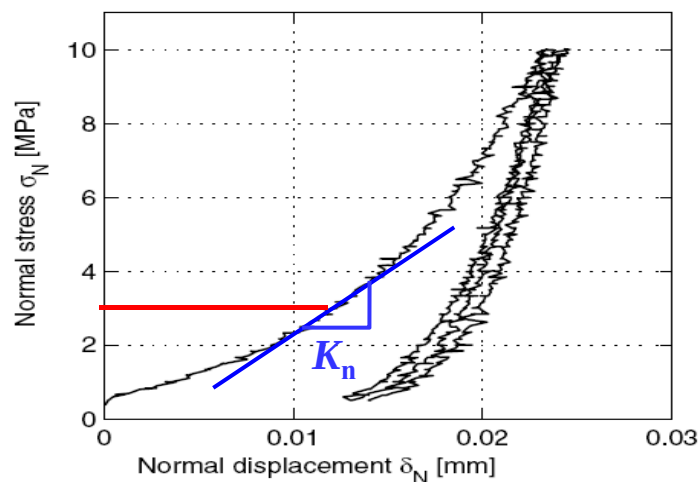
Comportamento meccanico giunti continui non riempiti

Comp. mecc.
e idraulico
discontinuità

Parametri di resistenza al taglio

di picco ultimi residui

Dilatanza d

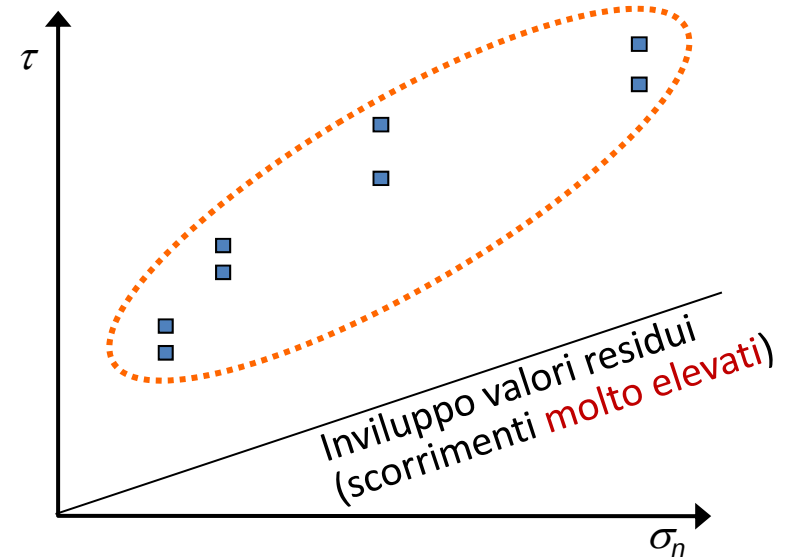
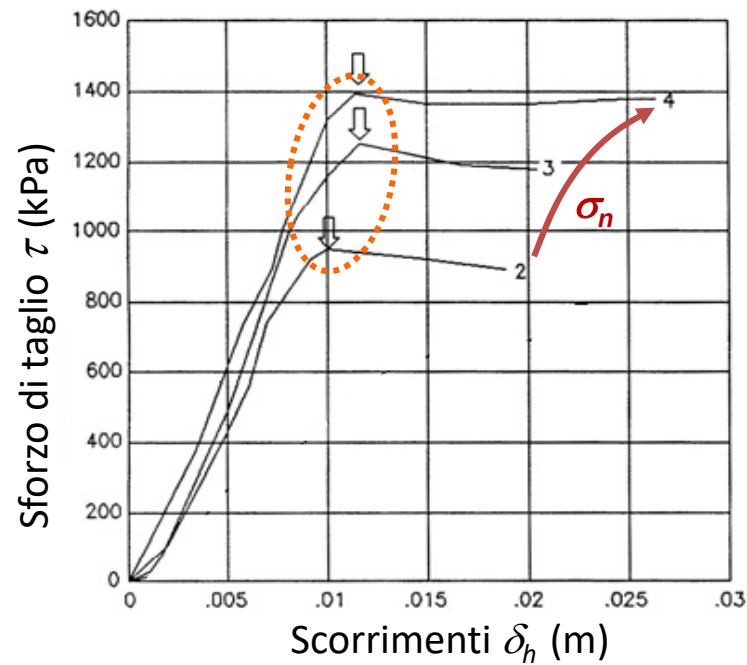


Rigidezza normale, K_N , e al taglio, K_S

Comportamento meccanico giunti continui non riempiti

Resistenza
al taglio
discontinuità

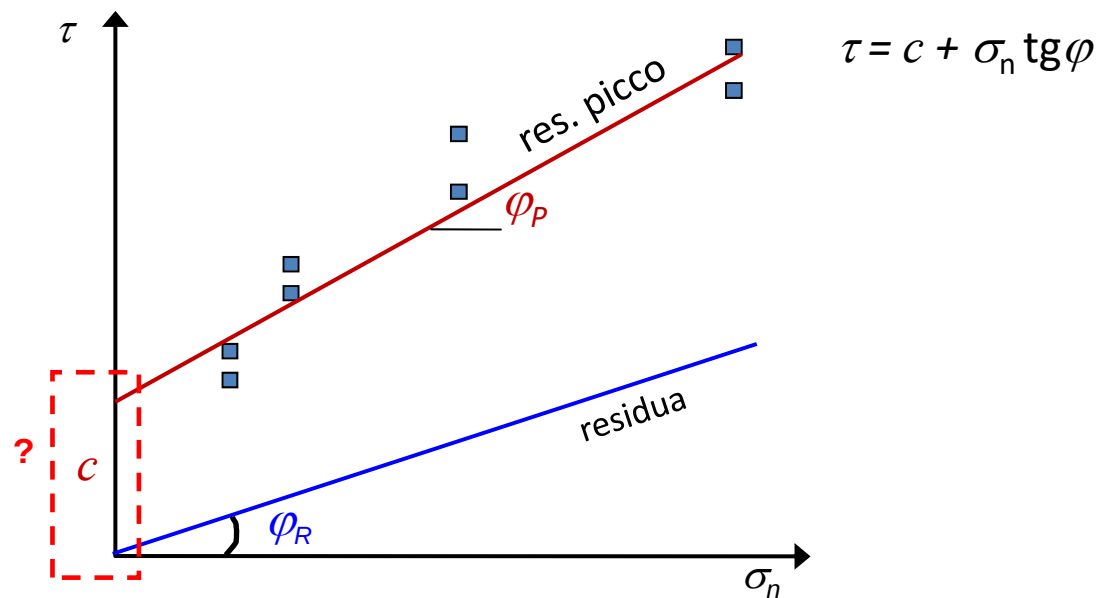
Resistenza al taglio di giunti continui senza riempimento



Resistenza al taglio dei giunti continui NON riempiti

Criteri resistenza giunti continui NON riempiti: **Mohr-Coulomb**

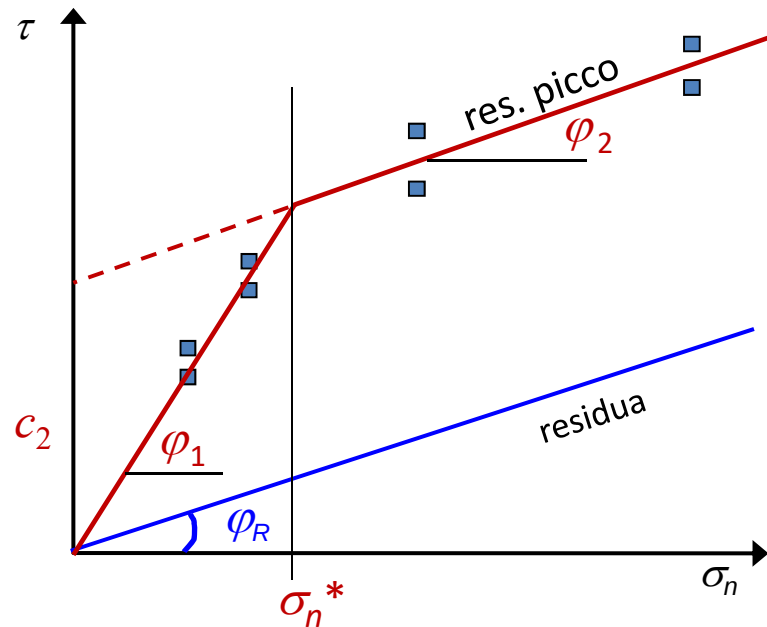
Resistenza
al taglio
discontinuità



Resistenza al taglio dei giunti continui NON riempiti

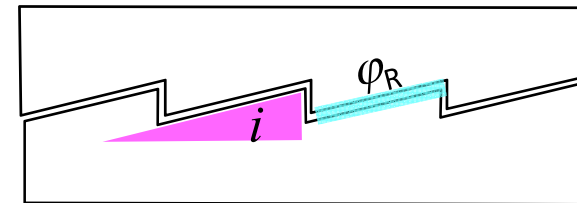
Criteri resistenza giunti continui NON riempiti: **Bi-lineare**

Resistenza
al taglio
discontinuità



$$\begin{cases} \tau = \sigma_n \operatorname{tg} \varphi_1 & 0 < \sigma_n < \sigma_n^* \\ \tau = c_2 + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi_2 & \sigma_n > \sigma_n^* \end{cases}$$

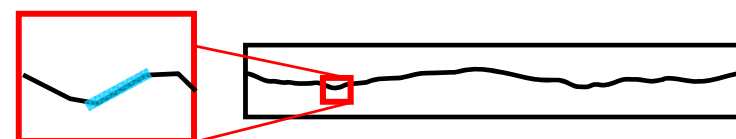
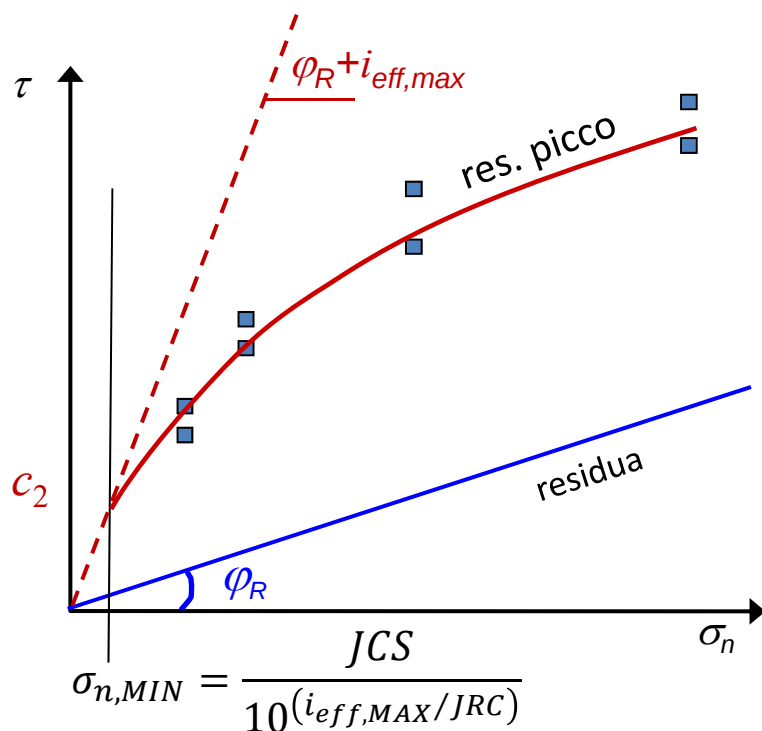
$$\varphi_2 = \varphi_R ; \quad \varphi_1 = i + \varphi_R$$



Resistenza al taglio dei giunti continui NON riempiti

Criteri resistenza giunti continui NON riempiti: non lineare, Barton-Bandis (B-B)

Resistenza
al taglio
discontinuità



$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg}(\phi_R + i_{eff})$$

Attrito lungo
le asperità

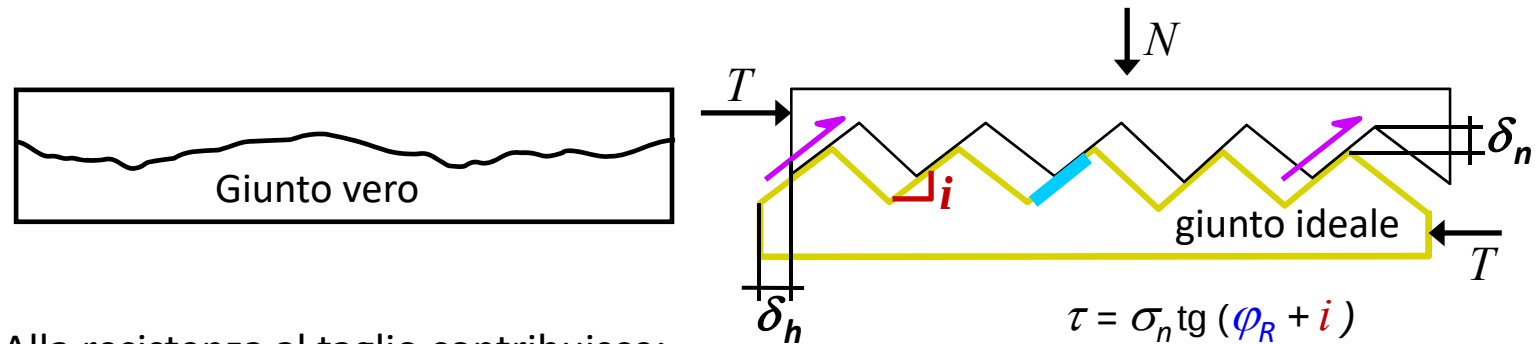
Scavallamento
delle asperità

Inclinazione asperità
varia con σ_n

Resistenza
asperità

Giunti continui NON riempiti - significato mecc. criterio B-B

Resistenza
al taglio
discontinuità



- Alla resistenza al taglio contribuisce:
 - attrito (φ_R) lungo le asperità
 - inclinazione i delle asperità, fino a che non si rompono

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg}(\varphi_R + i)$$

- Nei giunti reali: migliaia di asperità con diverso i
- Quelle efficaci nel dare la resistenza sono quelle inclinate di i_{eff}

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg}(\varphi_R + i_{eff})$$

- Quando i_{eff} cresce
 - resistenza aumenta
 - rottura asperità più facile

$$\Rightarrow i_{eff} = JRC \log\left(\frac{JCS}{\sigma_n}\right) = 10^\circ - 15^\circ$$

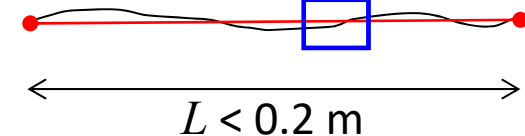
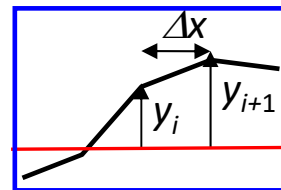
Giunti continui NON riempiti - considerazioni su *JRC*

- Confronto con profili di riferimento
- Calcolato a ritroso da prove di taglio diretto e tilt test
- Da correlazioni con parametri statistici (Z_2 , R_p , $\theta_2 \dots$) calcolati su profili digitali



$$JRC = 32.2 + 32.47 Z_2, \Delta x = 1 \text{ mm}$$

$$Z_2 = \left[\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n-1} \left(\frac{y_{i+1} - y_i}{\Delta x} \right)^2 \right]^{1/2}$$



Resistenza
al taglio
discontinuità

Giunti continui NON riempiti - considerazioni su φ_b e JCS

- JCS : da altezza rimbalzo r (sclerometro L)

- φ_R : **ridotto** rispetto ad angolo attrito di base φ_b

Superficie del giunto **alterata** o rivestita da **patine**

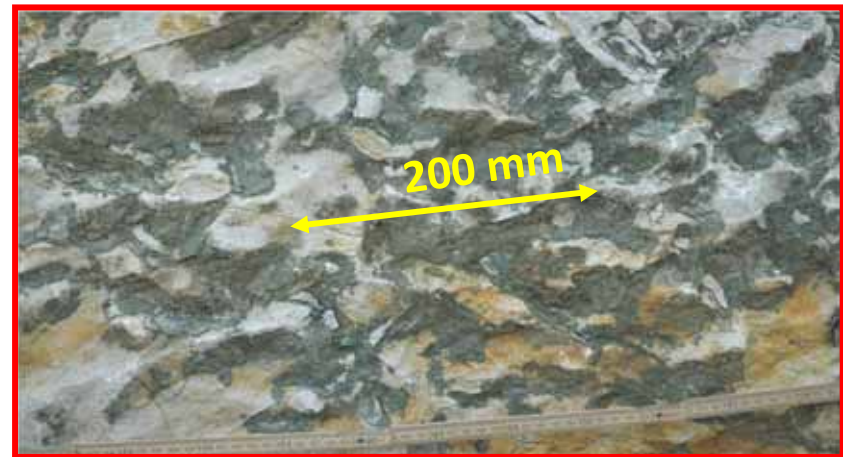
$$\varphi_R = (\varphi_b - 20) 20 \left(\frac{R}{r} \right)$$

← altezza rimbalzo materiale roccioso

Resistenza
al taglio
discontinuità

- Va posta maggiore attenzione su φ_b (Hencher & Richards, 2015):

- microscabrezza
- patine lapidee lisce/striate o coesive molto consistenti
- φ_b è associato alla componente **non dilatante** della resistenza al taglio



Giunti continui NON riempiti - effetto scala

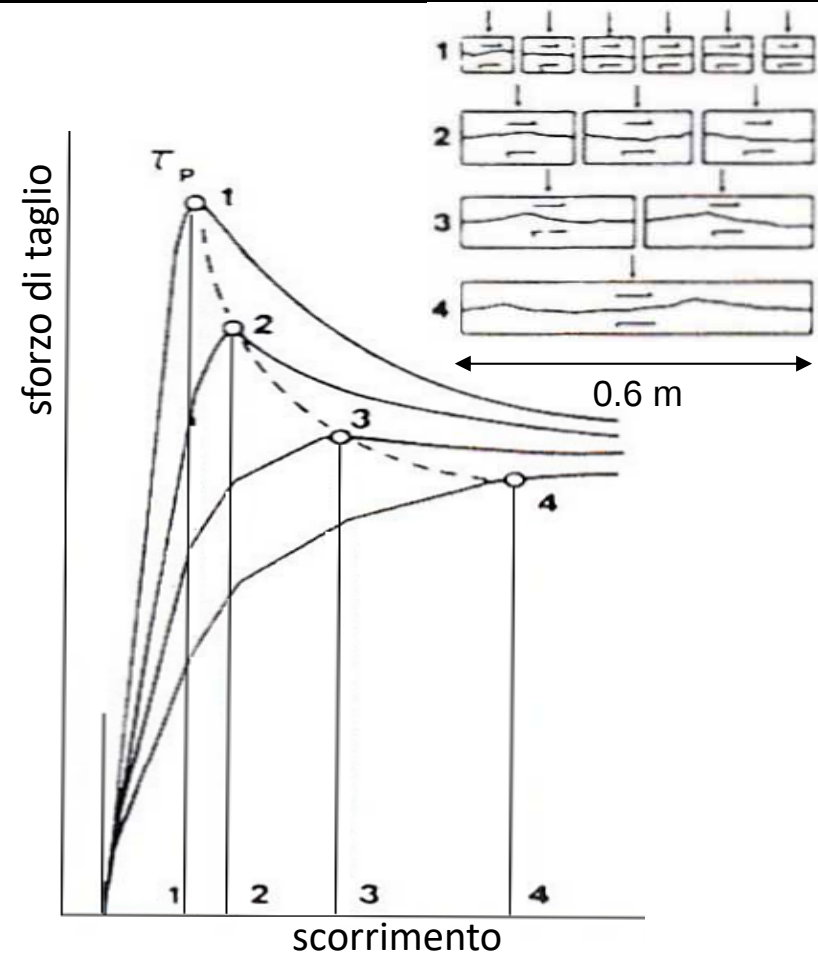
Al crescere della lunghezza del giunto:

- **Resistenza e fragilità diminuiscono**
- Spostamento di picco aumenta



- **Geometria e resistenza** asperità perdono importanza
- **Attrito lungo asperità** diventa prevalente

Resistenza
al taglio
discontinuità



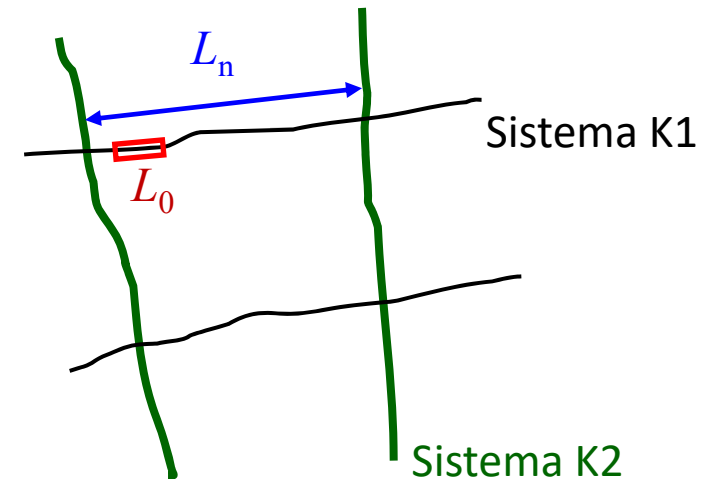
Giunti continui NON riempiti - effetto scala

Resistenza
al taglio
discontinuità

$$\frac{JRC_n}{JRC_0} = \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.02 JRC_0}$$

$$\frac{JCS_n}{JCS_0} = \left(\frac{L_n}{L_0} \right)^{-0.03 JRC_0}$$

Barton & Bandis (1990)



La lunghezza L_n da utilizzare per scalare i parametri di resistenza dei giunti K1 è quella tra le intersezioni con due giunti consecutivi del sistema K2

Resistenza giunti NON riempiti DISCONTINUI

- Resistenza materiale dei ponti c_b e σ_{tb}

- $R_b = \frac{\sum A_{bi}}{A_{tot}}$ area ponti
area tot. giunto

- Resistenza giunto
 $c_g = c_b R_b$ $\sigma_{t,g} = \sigma_{t,b} R_b$

- I ponti aumentano la rigidezza e la **fragilità** del giunto

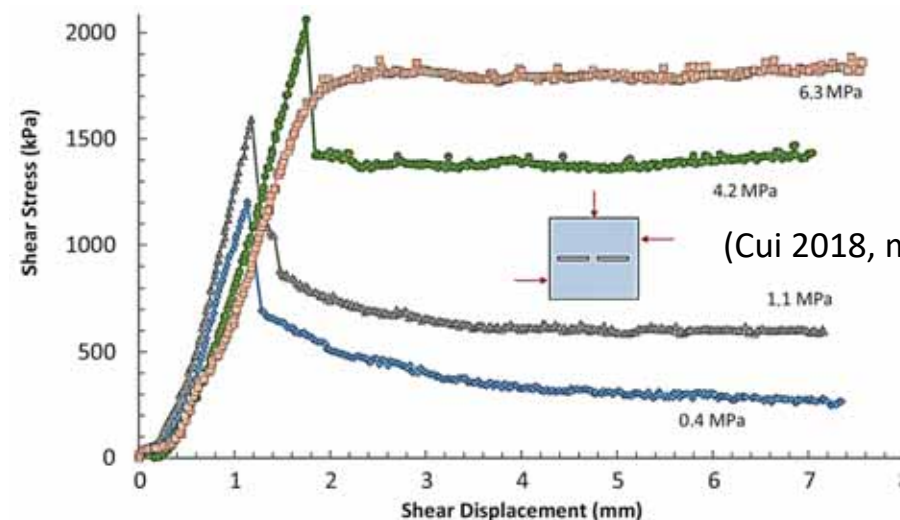


Fragilità del materiale roccioso

meccanismo	Volume(m ³)	R_b	c_b (MPa)	$\sigma_{t,b}$ (MPa)
sliding	117	0.003	4.3	1.3
sliding	48	0.002	10.7	3.2
sliding	24	0.002	6.6	2.0
sliding	3500	0.008	12.4	3.8
sliding	230	0.002	9.0	2.7
sliding	90	0.006	2.7	0.8

laboratorio: 23 ± 3 , 7 ± 3

*ponti in **calcare**
(Frayssines &
Hantz, 2009)*



(Cui 2018, mod.)

Resistenza
al taglio
discontinuità

Giunti riempiti

Resistenza
al taglio
discontinuità

- Pur con aspetti tuttora non chiari, la resistenza al taglio del giunto (τ_{giunto}) dipende da:

- $\frac{\text{spessore riempimento}}{\text{altezza asperità}} = \frac{f}{h}$

- resistenza al taglio del riempimento (τ_{riemp})

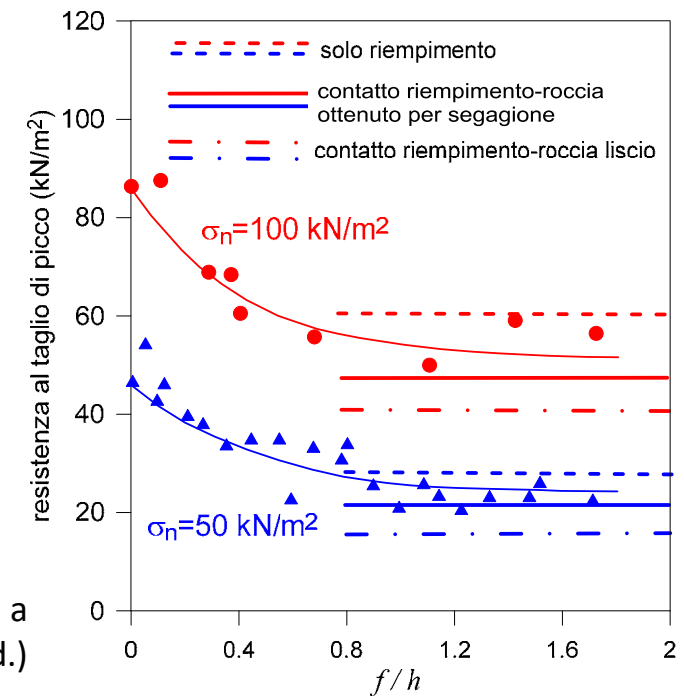
- **scabrezza interfaccia** roccia-riempimento)

- In giunti scabri in prima approssimazione:

- se $f < 2h$ $\tau_{giunto} > \tau_{riemp}$

- se $f > 2h$ $\tau_{giunto} \leq \tau_{riemp}$

$$\tau_{riemp} = c_{riemp} + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi_{riemp}$$



Prove su giunti con **profilo reale** e riempimento a **grana fine inerte** (Papaliangas et al. 1992, mod.)

Giunti riempiti

Resistenza
al taglio
discontinuità

- In realtà si osserva sperimentalmente che:
 - per riempimento **argilloso**, roccia perde influenza per $(f/h)_{\text{crit}} \sim \mathbf{0,6}$
 - per riempimento a **grana grossa**, roccia perde influenza per $(f/h)_{\text{crit}} = \mathbf{1,2 - 1,5}$
- Per giunti con riempimento argilloso consistente molto sottile:
 - Si può utilizzare l'espressione di Barton
 - Si può assumere l'angolo φ_R del giunto pari a quello del riempimento in condizioni residue (l'iso-orientamento dei minerali argillosi si ha per piccoli spostamenti)

$$\varphi_{R, \text{giunto}} = \varphi_{R, \text{riemp}}$$

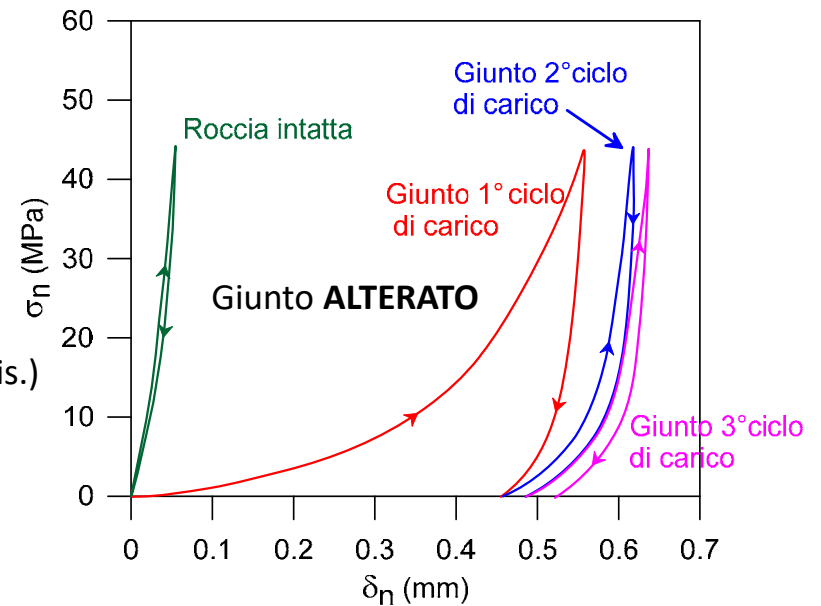
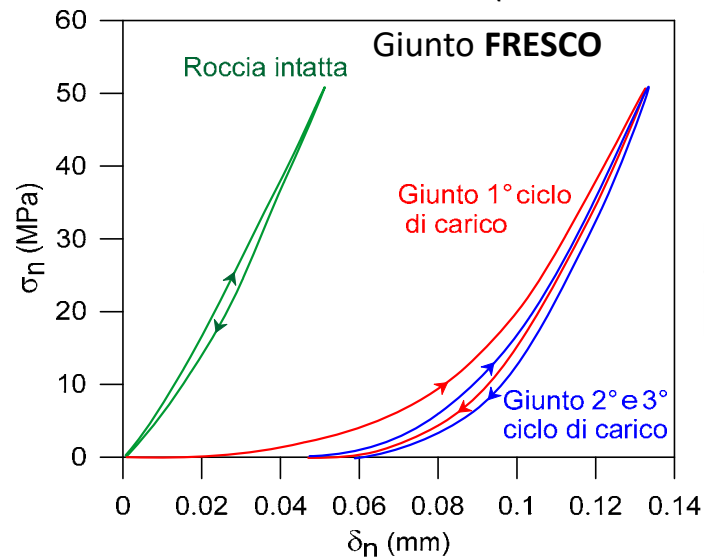
Rigidezza giunti NON riempiti e continui

Rigidezza
discontinuità

Rigidezza normale dipende da:

- apertura iniziale (e_0)
- scabrezza (JRC)
- alterazione e rigidezza roccia (JCS)
- labbra combacianti o meno

(Bandis et al. 1983, ridis.)



$$K_{N0} = 0.02 \frac{JCS_0}{e_0} + 1.75 JRC_0 - 7.15$$

$$e_0 [\text{in mm}] = \frac{JRC}{5} \left(0.2 \frac{\sigma_f}{JCS_0} - 1 \right)$$

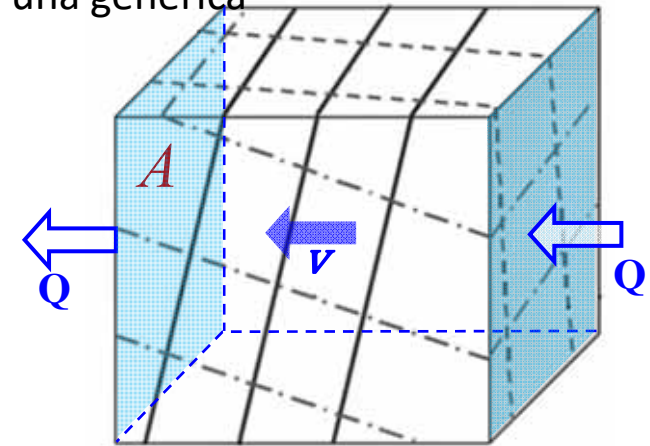
Permeabilità discontinuità e ammassi

Caratteristiche
idrauliche
discontinuità

- La **velocità di filtrazione** v dell'acqua che attraversa una generica **sezione filtrante** dell'ammasso dipende da:

- gradiente idraulico i
- permeabilità k_{amm}

$$v = -k_{amm} i$$
$$Q = -k_{amm} i A$$



- k dipende da:

- permeabilità **delle discontinuità**: **apertura**, **scabrezza** e **riempimento**

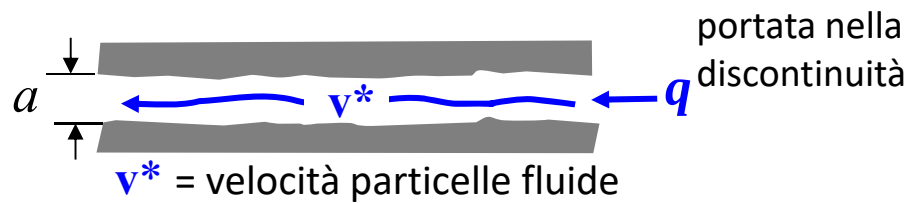
- **struttura** dell'ammasso
 - spaziatura
 - orientazione
 - estensione

- permeabilità del materiale roccioso (solo rocce molto porose)

Permeabilità singola discontinuità

Caratteristiche
idrauliche
discontinuità

Discontinuità non riempita



in micron !

apertura idraulica
(funzione scabrezza)

$$b = \frac{JRC^{2.5}}{\left(\frac{a}{b}\right)^2}$$

$$v^* = - \frac{1}{12} b^2 \frac{\gamma_w}{\mu_w} i \rightarrow q = b k_{disc} i$$

$$q = - \frac{1}{12} b^3 \frac{\gamma_w}{\mu_w} i$$

legge flusso cubica

Discontinuità riempita

$$k_{disc} = k_{fill} \rightarrow q = b k_{fill} i$$

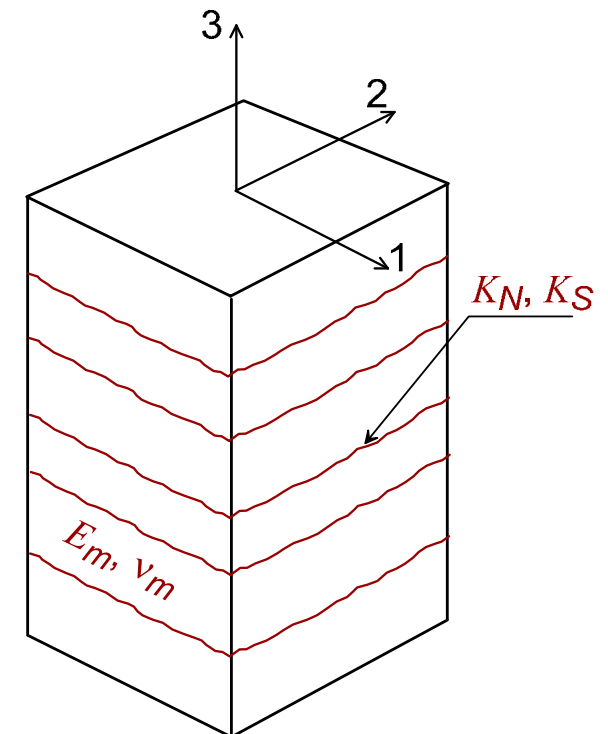
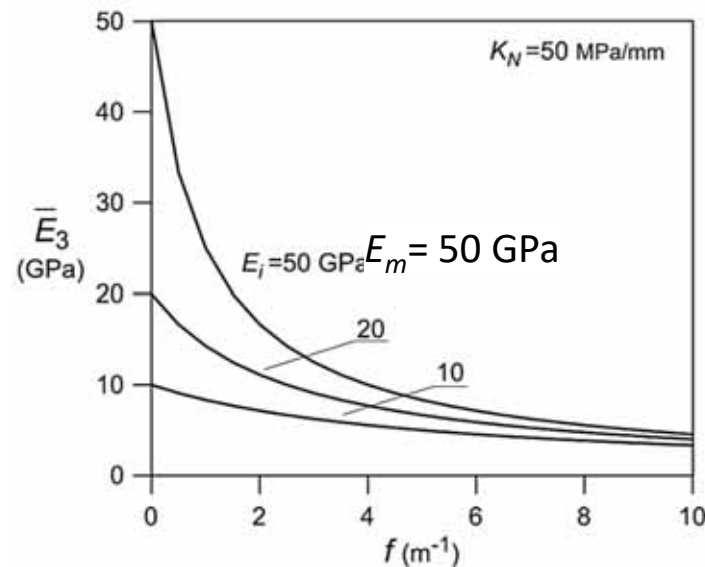
L'ammasso roccioso- comportamento meccanico e idraulico

Rigidezza ammasso con un sistema di discontinuità

- **Famiglia** di discontinuità di uguale rigidezza K_N e K_S e frequenza f

$$\overline{E}_1 = E_m \quad \frac{1}{\overline{E}_3} = \frac{1}{E_m} + \frac{f}{K_N} \quad \frac{1}{\overline{G}_{31}} = \frac{2(1+\nu)}{E_m} + \frac{f}{K_S}$$

$$\overline{\nu}_{31} = \overline{\nu}_{21} = \nu$$



Rigidezza
ammasso
roccioso

Rigidezza ammasso alternanza di strati diversi

Alternanza di strati di diversa rigidezza (Es. argilliti-arenarie, argilliti-calcarei)

Caso generale

$$\bar{E}_1 = \sum_i f r_i E_{m_i}$$

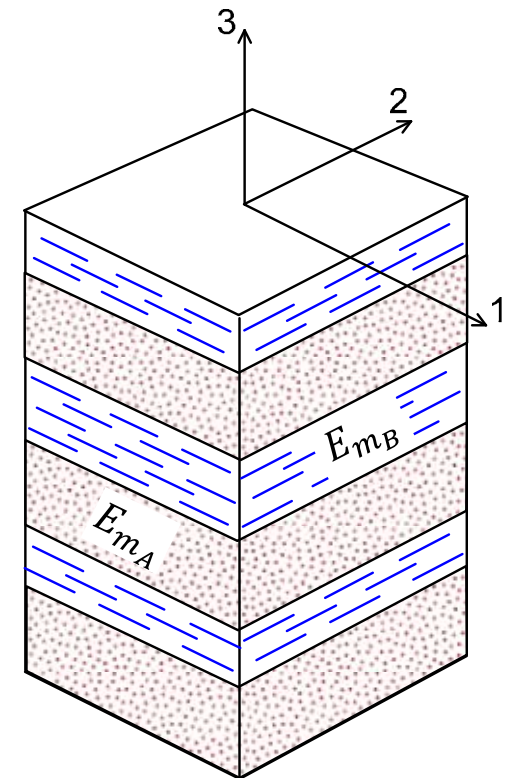
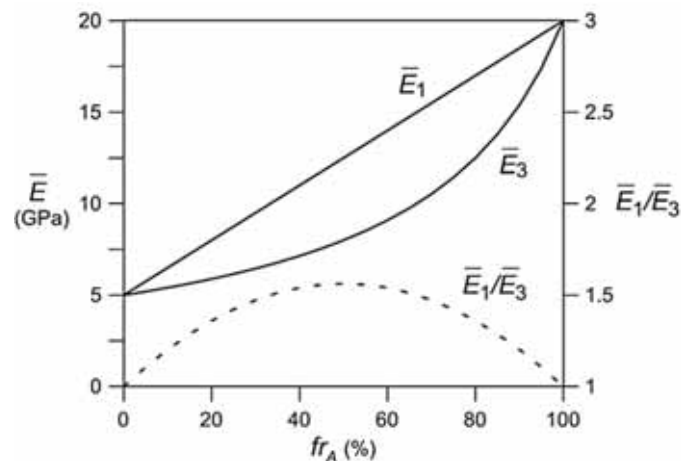
$$\frac{1}{\bar{E}_3} = \sum_i \frac{f r_i}{E_{m_i}}$$

$$\bar{G}_{31} = \frac{\bar{E}_3}{2(1 + \nu_{31})}$$

Caso a 2 materiali

$$\bar{E}_1 = f r_A E_{m_A} + f r_B E_{m_B}$$

$$\frac{1}{\bar{E}_3} = \frac{f r_A}{E_{m_A}} + \frac{f r_B}{E_B}$$



Rigidezza
ammasso
roccioso

Rigidezza ammasso roccioso isotropo

Rigidezza
ammasso
roccioso

- **Rigidezza ammasso** dipende:
 - nelle rocce **dure** soprattutto dal numero di discontinuità e dalla loro rigidezza
 - nelle rocce **tenere** anche dalla rigidezza del materiale
- Negli ammassi **allentati** c'è una dipendenza dal ciclo di carico

- In ammassi omogenei e isotropi con $\sigma_{ci} > 100 \text{ MPa}$ E_{amm} si può stimare da :

$$\left. \begin{array}{l} - GSI \\ - \text{stato di disturbo} \end{array} \right\} E_{amm} = \left(1 - \frac{D}{2}\right) 10^{(GSI-10)/40} \quad \text{Materiale roccioso non interviene!}$$

- In ammassi omogenei e isotropi con $\sigma_{ci} < 100 \text{ MPa}$ E_{amm} **dipende anche da σ_{ci}**

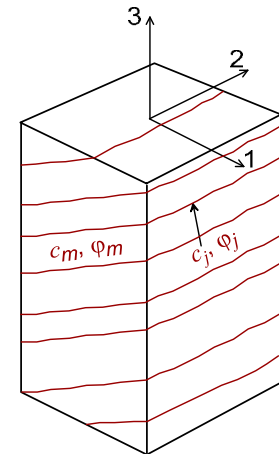
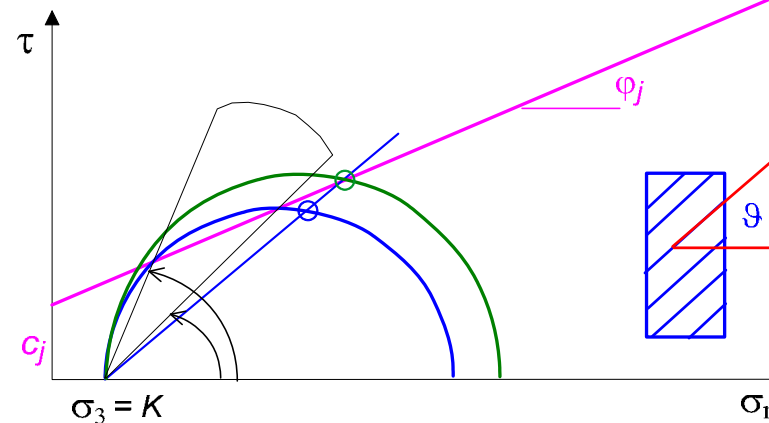
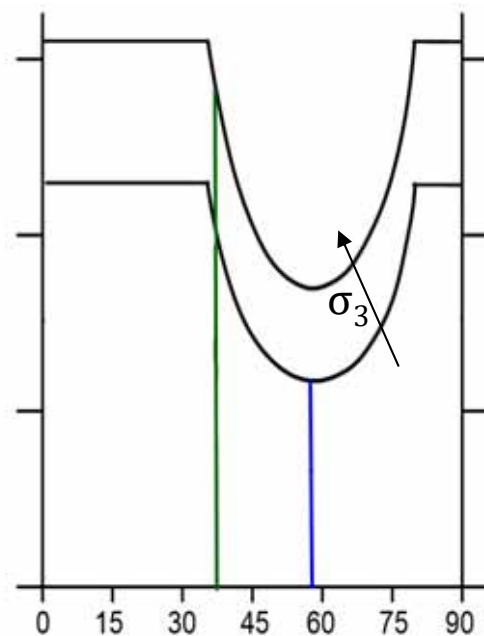
$$E_{amm} = \left(1 - \frac{D}{2}\right) \left(\frac{\sigma_{c,i}}{100}\right)^{0.5} 10^{(GSI-10)/40}$$

(Hoek et al. 2002)

Resistenza rocce anisotrope - Criterio di Jaeger

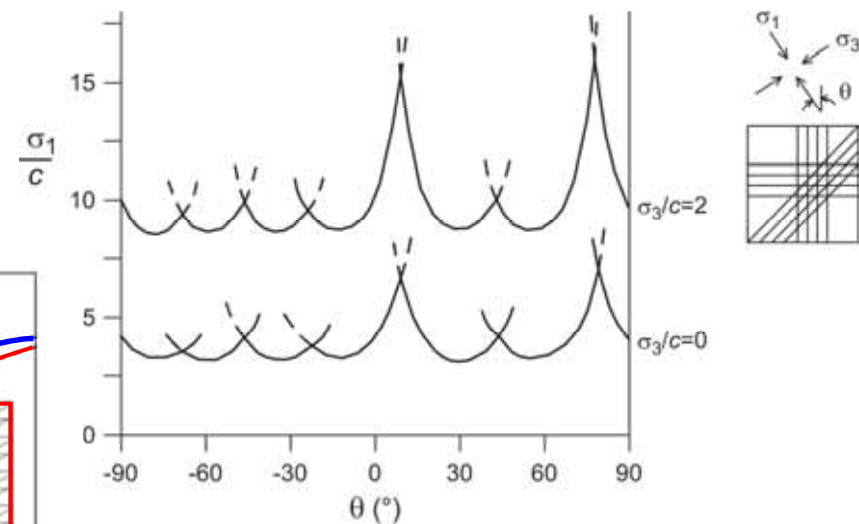
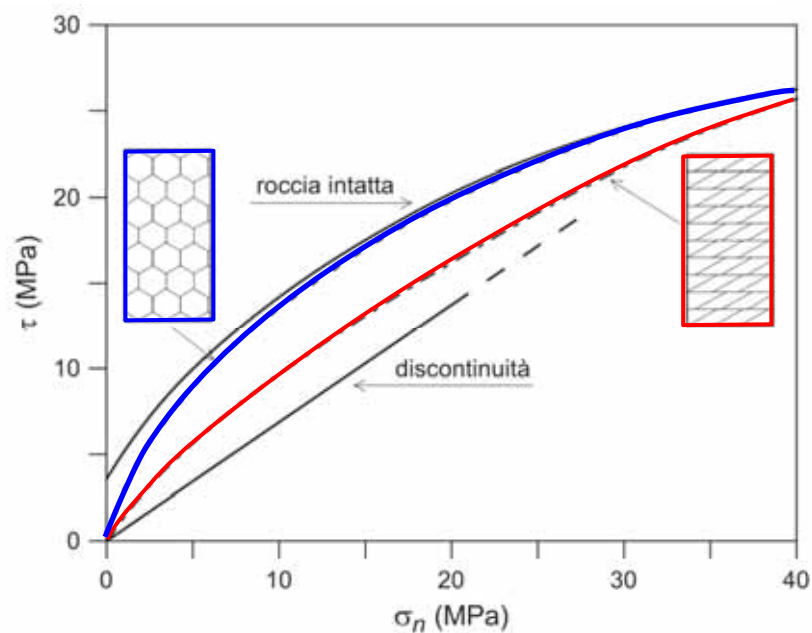
- Mezzo con un solo sistema di discontinuità è fortemente anisotropo (trasversalmente isotropo)

Resistenza
ammasso
roccioso



Resistenza ammasso roccioso

- All'aumentare delle famiglie l'anisotropia si riduce



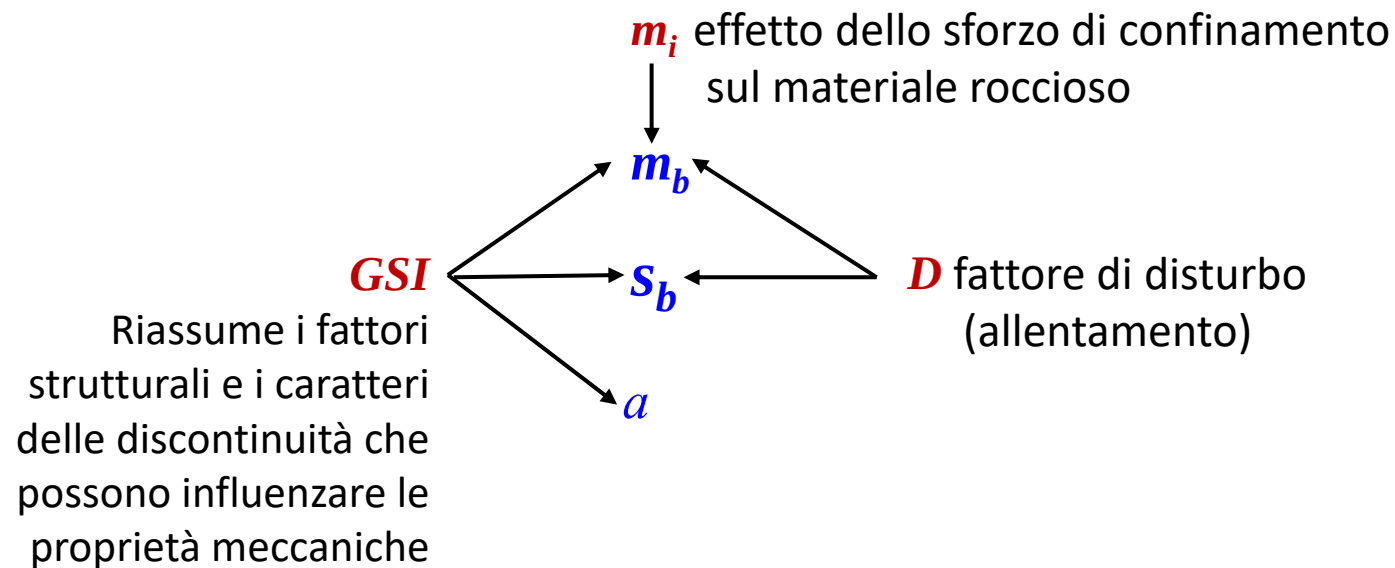
Resistenza
ammasso
roccioso

Resistenza ammasso roccioso, criterio Hoek-Brown

- Per **mezzi isotropi** e **omogenei** si può utilizzare il criterio di Hoek-Brown

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

Resistenza
ammasso
roccioso



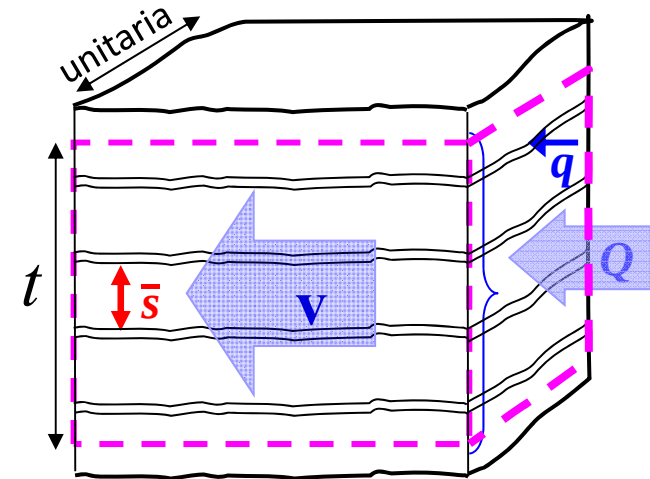
Resistenza ammasso roccioso, condizioni residue

Resistenza
ammasso
roccioso

- La stima della resistenza residua presenta forti incertezze
- Con il criterio di **Mohr-Coulomb** si può assumere:
 - $c_r = (0.5 \div 0.1) c_p$
 - φ_r poco inferiore a φ_p
- Con il criterio di **Hoek-Brown** si può assumere (Ribacchi, 1993, 2001):
 - $s_{b,res} = 0.04 s_{b,picco}$
 - $m_{b,res} = 0.67 m_{b,picco}$
- Hoek et al. (2002) propongono di assumere $D = 1$ nel criterio H-B ma è **troppo pessimistico**

Permeabilità ammasso con un sistema di discontinuità

Famiglia di discontinuità di uguale apertura



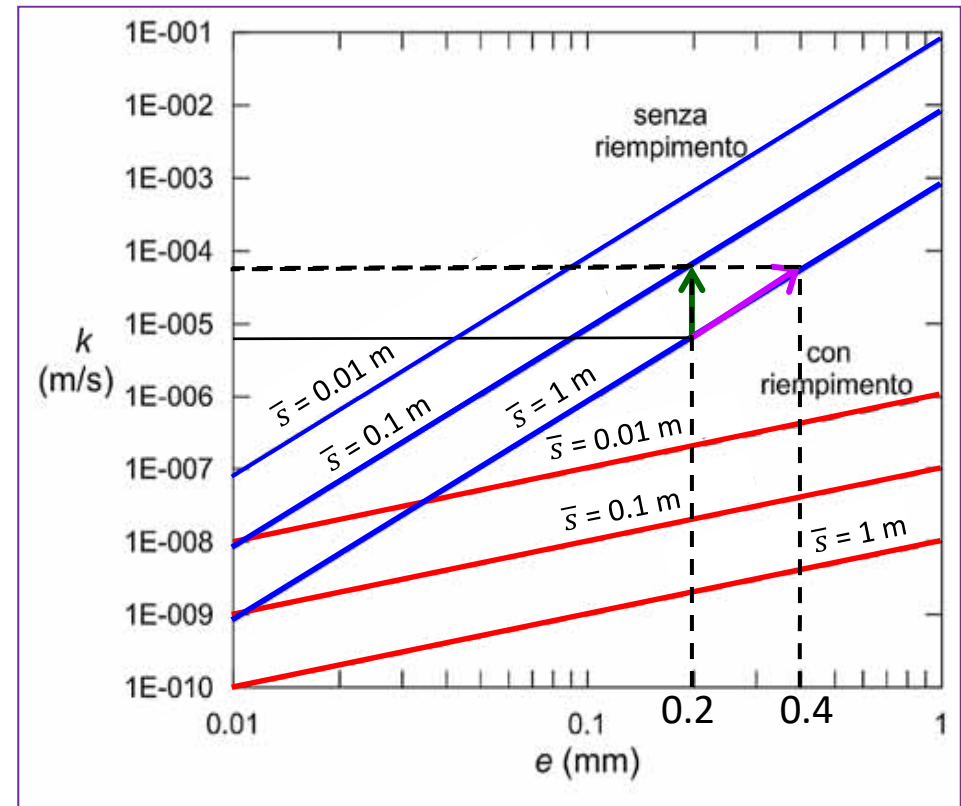
$$Q = vA = q \frac{1}{s} t \begin{cases} v = -\frac{1}{12} b^2 b \frac{1}{s} \frac{\gamma_w}{\mu_w} i \text{ no riemp.} \\ v = -k_{fill} b \frac{1}{s} \frac{\gamma_w}{\mu_w} i \text{ con riempim.} \end{cases}$$

Caratt.
Idrauliche
ammasso
roccioso

Permeabilità ammasso con un sistema di discontinuità

- Influenza relativa della **spaziatura** e dell'**apertura** sulla permeabilità di un singolo sistema di giunti
 - per giunti **riempiti**
 - per giunti **senza riempimento**

Caratt.
Idrauliche
ammasso
roccioso



Permeabilità ammasso con più famiglie

Come integrare i contributi delle diverse famiglie

Mezzo discontinuo

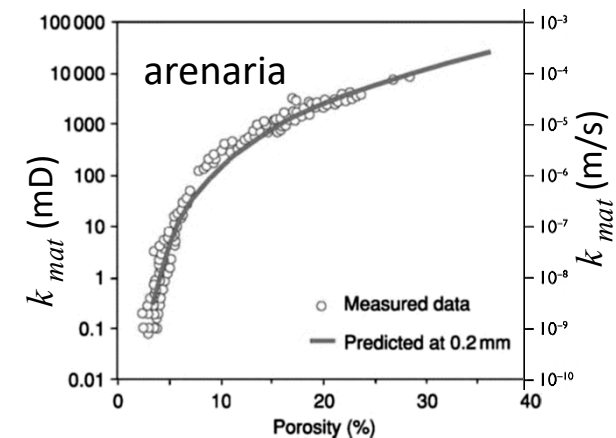
- Discontinuità definite nel modello **esplicitamente**
- Discontinuità seguono legge di flusso cubica
- Si assegnano le permeabilità alle diverse famiglie

Mezzo continuo equivalente

- Calcolo tensori di ogni famiglia riferiti alla **stessa terna**
- Tensore globale permeabilità come somma tensori delle singole famiglie*
- È possibile aggiungere il flusso nel materiale

* Permeabilità e direzioni principali sono gli autovalori e autovettori del tensore

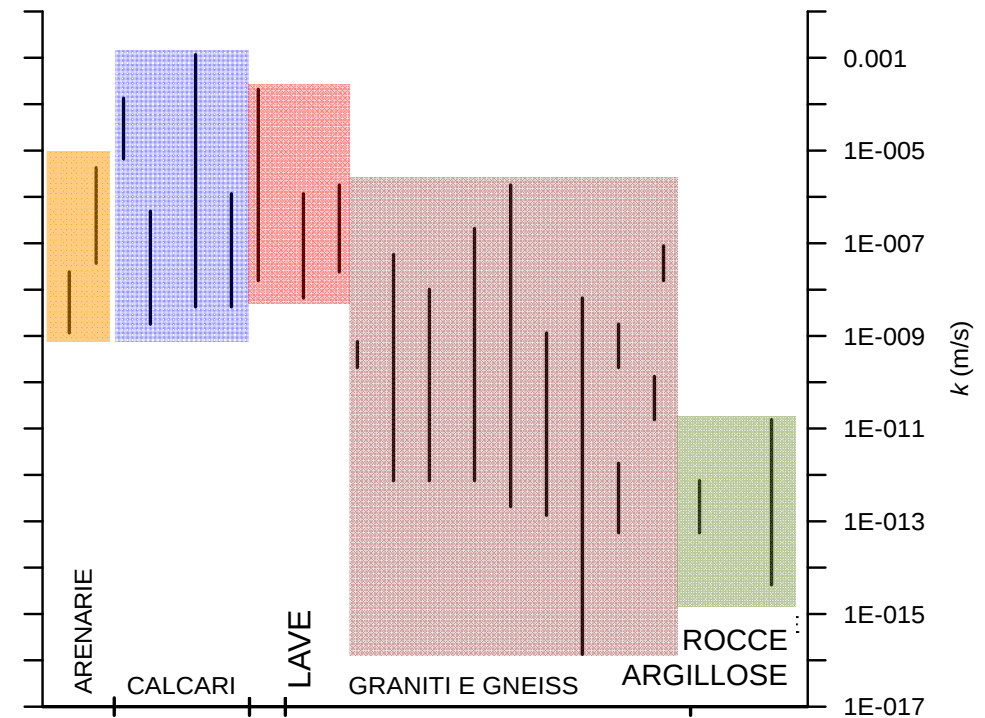
Caratt.
Idrauliche
ammasso
roccioso



Permeabilità ammasso

Caratt.
Idrauliche
ammasso
roccioso

- **Arenarie**: contributo permeabilità materiale
- **Calcari**: elevate aperture giunti con flusso canalizzato
- **Lave**: aumento intersezione giunti per fratturazione non orientata
- **Graniti/gneiss**: possibile influenza alterazione



Permeabilità e stato di sforzo

Variazioni stato di sforzo **efficace** indotto dalle opere di ingegneria



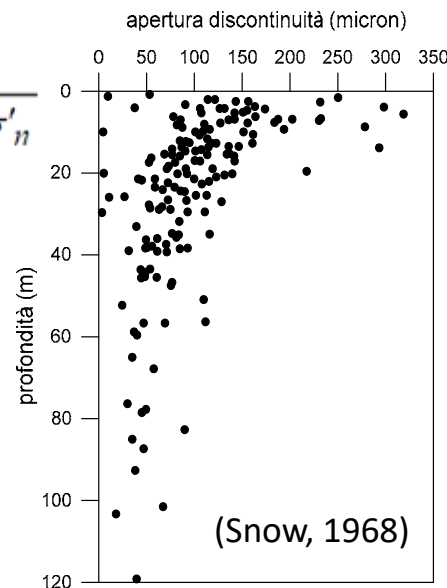
Δ permeabilità > 1 ordine di grandezza

Singola discontinuità (Barton, 1985)

- **chiusura** per $\Delta\sigma'_n$

$$b_0 - b = \frac{\sigma'_n \delta_{n \max}}{K_{N0} \delta_{n \max} + \sigma'_n}$$

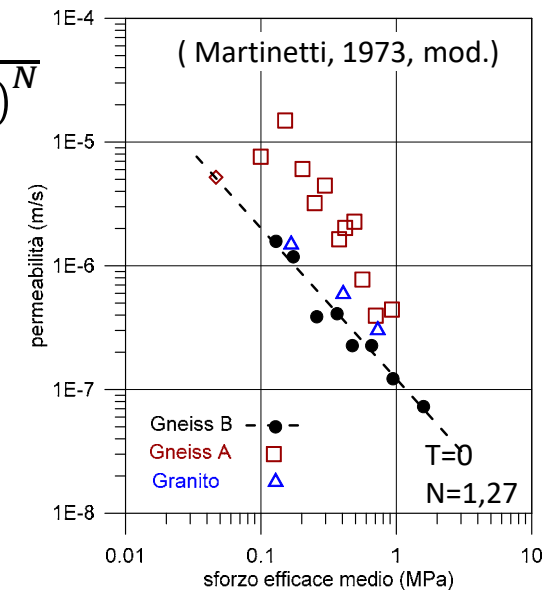
- **apertura** per $\Delta\tau$ (dilatanza)



Ammasso

(es. Morgenstern & Guthrie, 1972)

$$k = \frac{A}{(\sigma'_m + T)^N}$$



Caratt.
Idrauliche
ammasso
roccioso

Quale modello di ammasso roccioso

Quale mezzo rappresenta meglio l'ammasso -1

- Continuo
- Discontinuo
- Continuo equivalente a un discontinuo



- Distribuzione spaziale delle discontinuità
- Dimensioni dell'opera o meglio del problema (Region Of Interest)

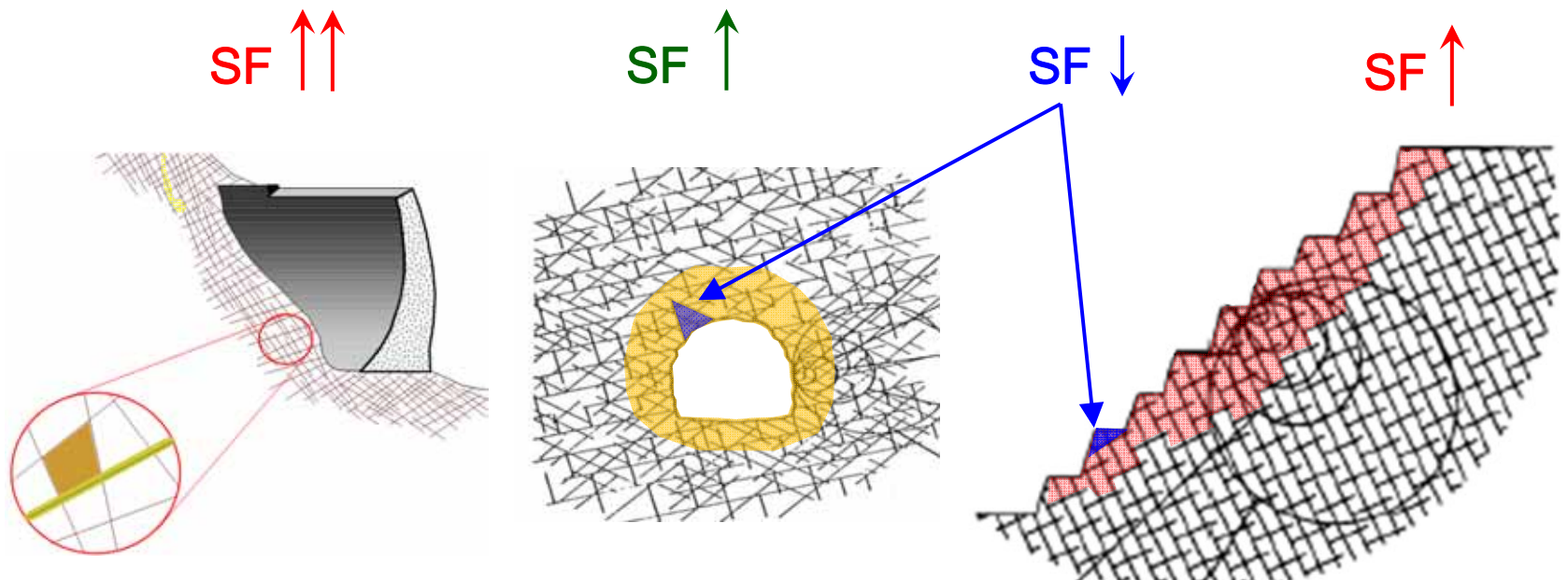


$$\frac{\text{Dimensioni dell'opera}}{\text{Spaziatura discontinuità}} = \text{Fattore di scala, } SF$$

Modello di
ammasso

Quale mezzo rappresenta meglio l'ammasso -1

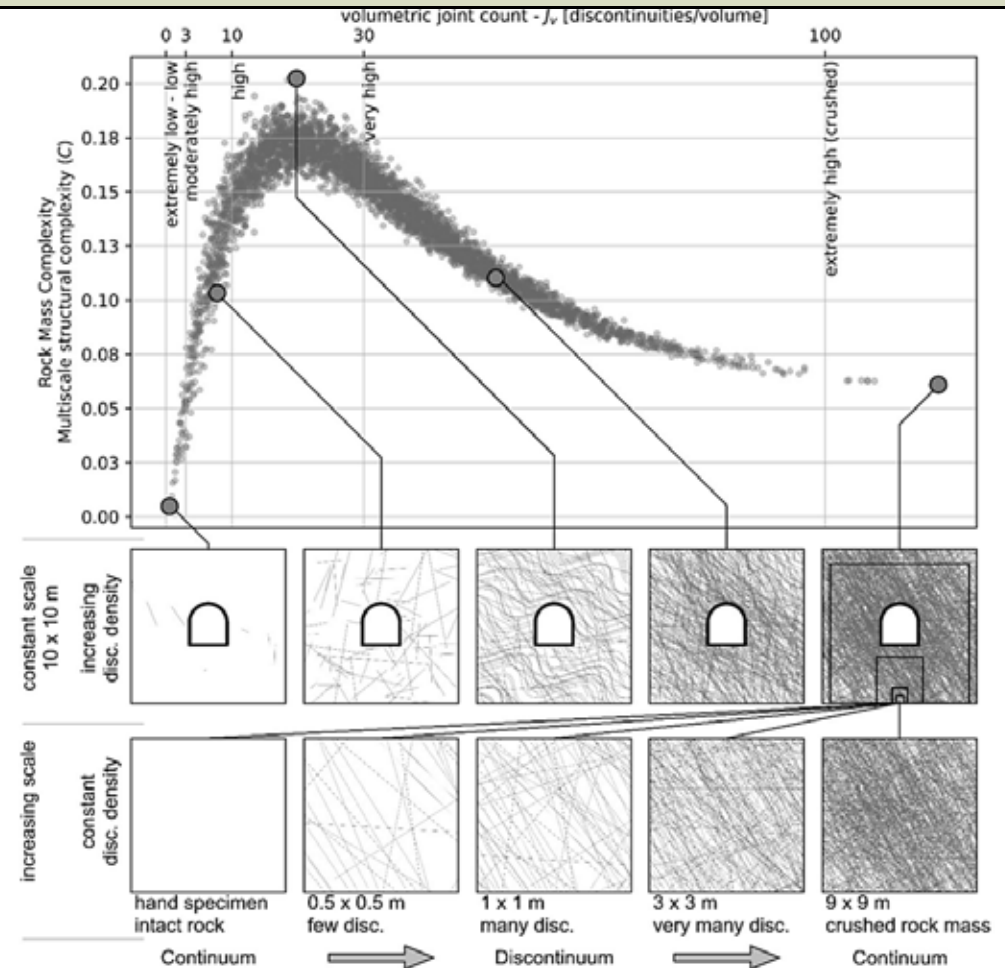
- Il Fattore di scala:**
- Varia a seconda dell'opera
 - Nella stessa opera in funzione del problema



Modello di
ammasso

Quale mezzo rappresenta meglio l'ammasso -1

- Indice di complessità (parametro statistico strutturale) dell'ammasso roccioso come indicatore del passaggio da modello continuo a discontinuo e viceversa



Modello di
ammasso

Quale mezzo rappresenta meglio l'ammasso - 2

- Famiglie di discontinuità **confrontabili** in termini di **frequenza** e comportamento meccanico

⇒ Mezzo **isotropo**

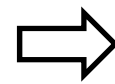
- Famiglia di discontinuità più frequenti / deboli (resist.+rigid.)
- Alternanze di materiali a diverso comportamento meccanico

⇒ Mezzo **anisotropo**

Modello di
ammasso

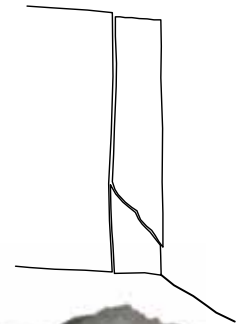
Mezzo continuo

- Le discontinuità sono **molto spaziate o assenti**



Resistenza ammasso = Resistenza **materiale roccioso**

- Rocce tenere molto recenti: - Piroclastiche
- Calcareniti/calcilutiti



Modello di
ammasso



Calcarenite Sicilia



Tufo litoide



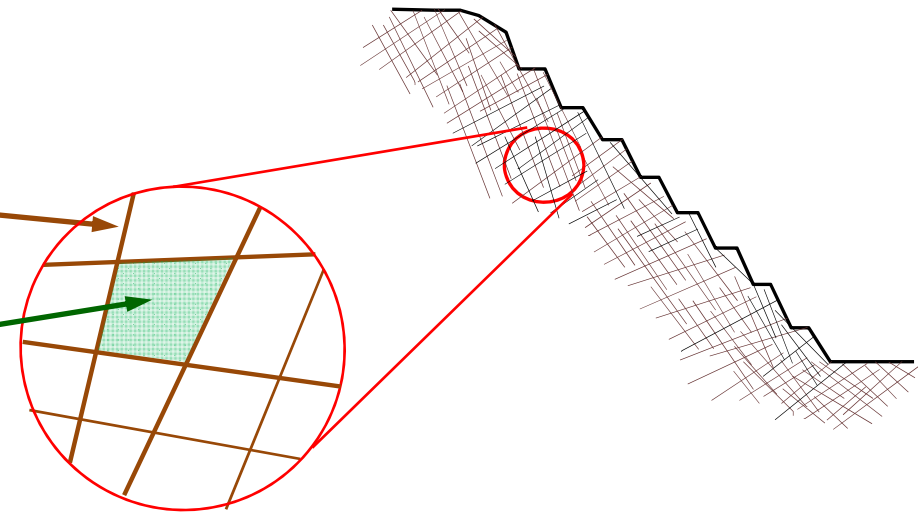
Mezzo discontinuo

- Le discontinuità sono rappresentate **esplicitamente**:
 - con la loro posizione, orientazione ed estensione
 - con i loro parametri di resistenza e rigidezza

- I blocchi possono essere

- rigidi
 - deformabili
- } $\forall$ discontinuità
 $\tau_f(\sigma_n), K_n, K_s, d$

$\forall$ blocco
 $E, \sigma_1 = f(\sigma_3)$



Modello di
ammasso

Mezzo discontinuo - come introdurre le discontinuità

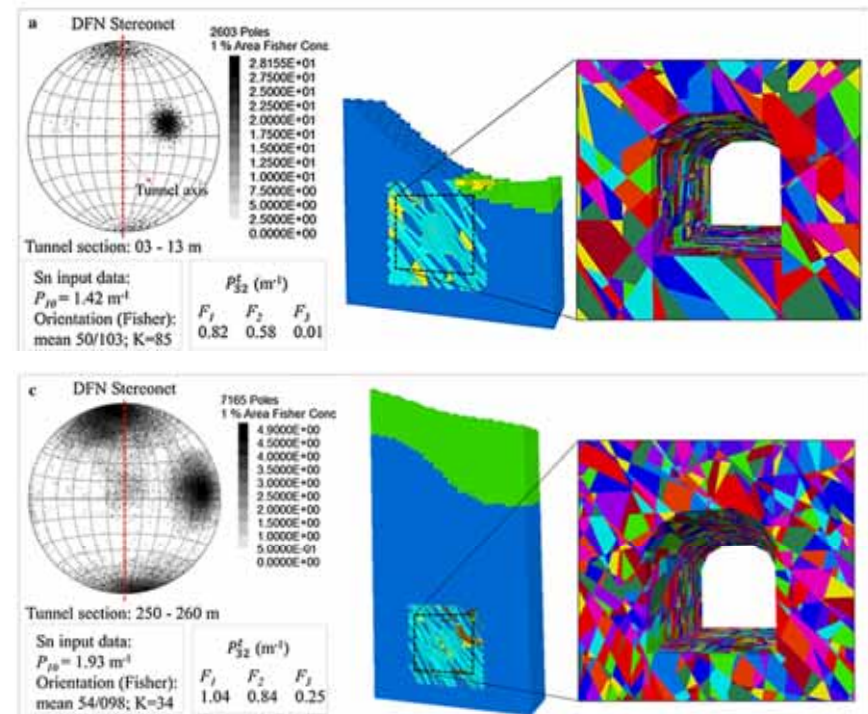
- Sistemi di discontinuità "regolari":
 - spaziatura/orientazione media
 - persistenza media
 - estensione = dim. modello
- Tenendo conto della variabilità statistica di spaziatura, orientazione ed estensione



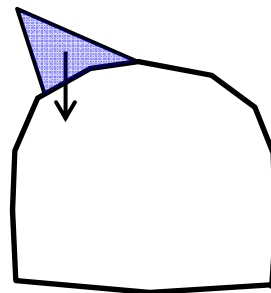
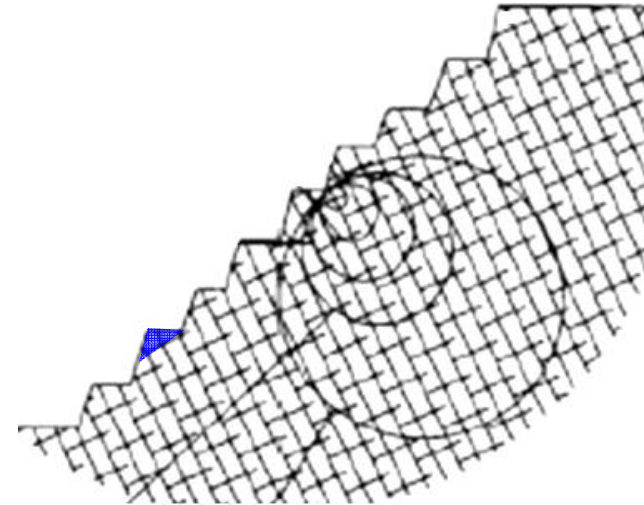
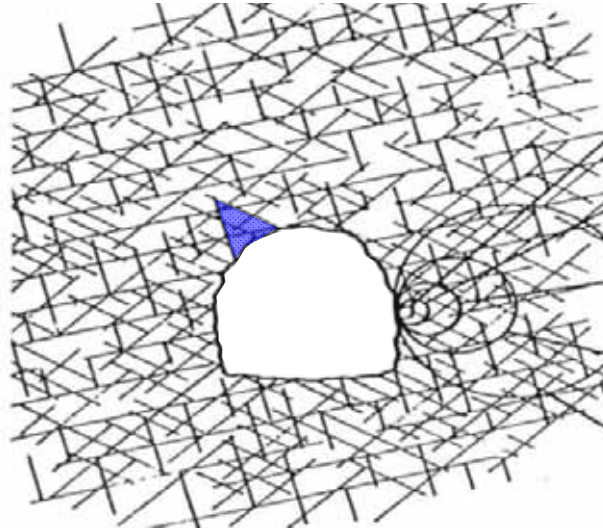
DFN (*Discrete Fracture Network*)

Modello di
ammasso

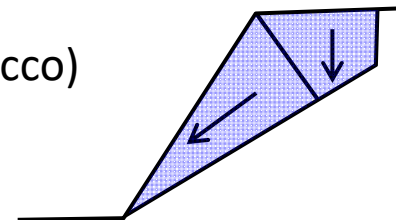
(Pazzotto Cacciari & Massao Futai, 2017)



Quale mezzo discontinuo (problema di scala)



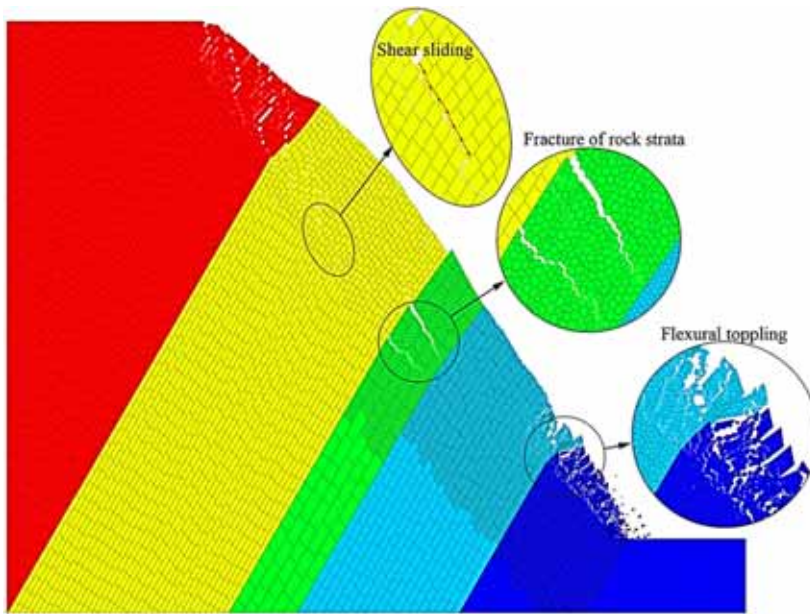
Il problema coinvolge poche
discontinuità
(1 blocco $\rightarrow$ qualche blocco)



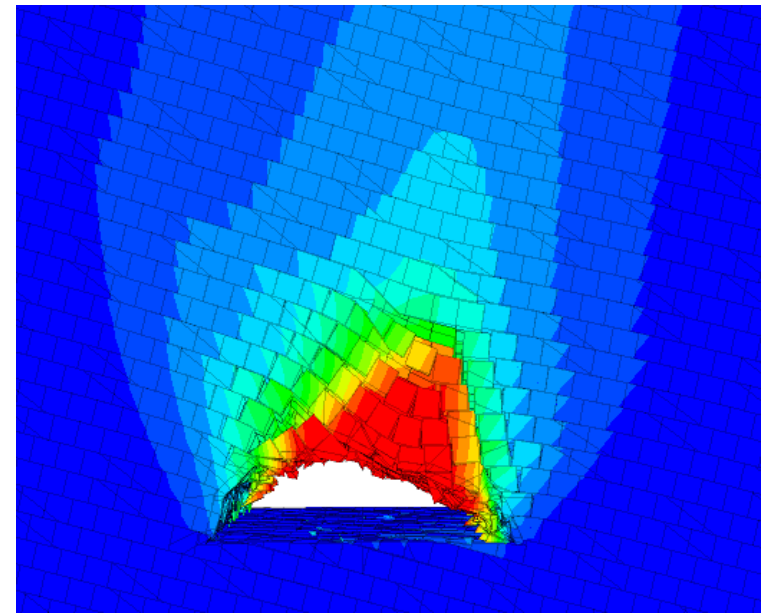
Modello di
ammasso

Mezzo discontinuo (problema di scala)

- I movimenti sono controllati da un elevato numero di discontinuità



(Gao et al., 2020)



(Jakubowski & Phan, 2024)

Modello di
ammasso

Mezzo continuo equivalente

- Le discontinuità sono portate in conto modificando i parametri di rigidezza, resistenza e permeabilità dell'ammasso
 - nel continuo **isotropo**, attraverso indici (*GSI*, *RMR*)
 - Nel continuo **anisotropo**, si modificano le matrici di rigidezza dell'ammasso che terranno conto dei parametri delle singole discontinuità (rigidezza oppure apertura/riempimento, rispettivamente, per il singolo giunto) e la spaziatura delle famiglie
 - Nel continuo **anisotropo**, si adottano criteri separati per i sistemi di discontinuità (**spalmati omogeneamente**) e si verificano gli sforzi lungo i sistemi e nel materiale (**matrice**)



Attenzione a cosa mettiamo nella matrice!!!

Modello di
ammasso