



GEAM – ASSOCIAZIONE GEORISORSE E AMBIENTE

Torino, 9/10 2009

Giornata di studio su cattura e stoccaggio geologico dell'anidride carbonica

Caratterizzazione geomeccanica per lo stoccaggio della CO₂

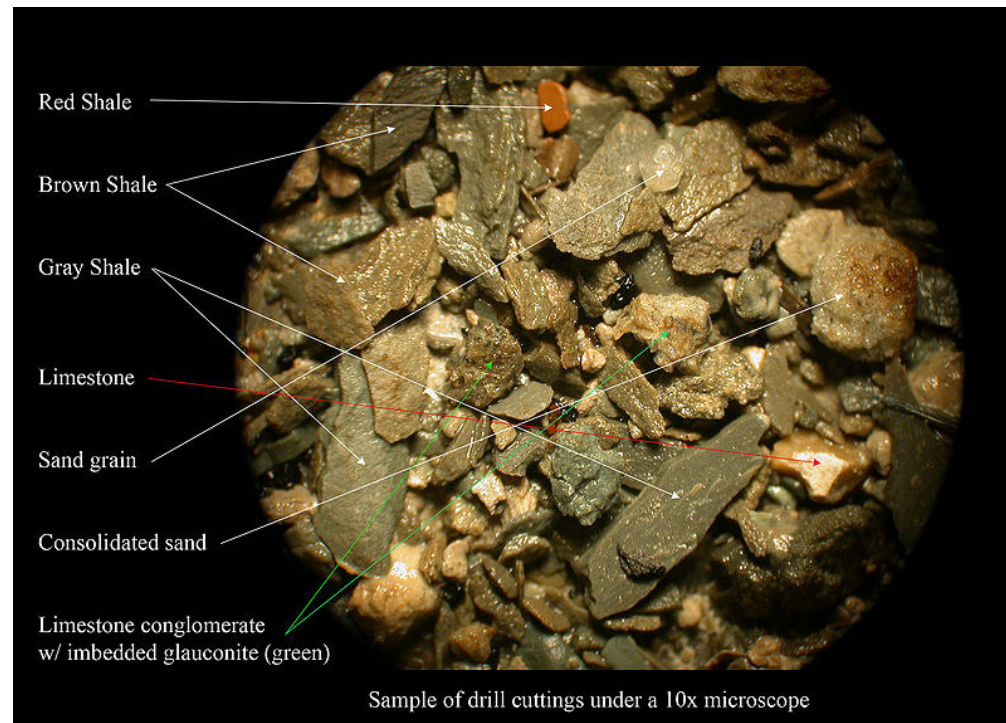
Gian Paolo Giani * & Chiara Deangeli**

* Università degli studi di Milano

** Politecnico di Torino

La meccanica delle rocce a grande profondità applica i principi della meccanica per studiare il comportamento di un mezzo poroso, discontinuo, eterogeneo e anisotropo, le cui proprietà variano con lo stato tensionale.

Sample of drill cuttings of shale while drilling an oil well in Louisiana Sand grain = 2 mm. in dia.



Sample of drill cuttings under a 10x microscope

Rocce sedimentarie



Argilliti . Sono depositi caratterizzati da marcata fissilità lungo i piani di stratificazione dovuta soprattutto all'orientazione dei minerali argillosi, parallela ai piani di stratificazione. Hanno permeabilità estremamente bassa, permettendo di costituire una buona trappola per gli idrocarburi.



Arenarie. Sono rocce sedimentarie composte da clasti aventi dimensione delle sabbie. Il termine è usato per sabbie cementate o rocce costituite da sabbie quarzitiche. La porosità e la permeabilità relativamente alte fanno sì che siano rocce serbatoio.

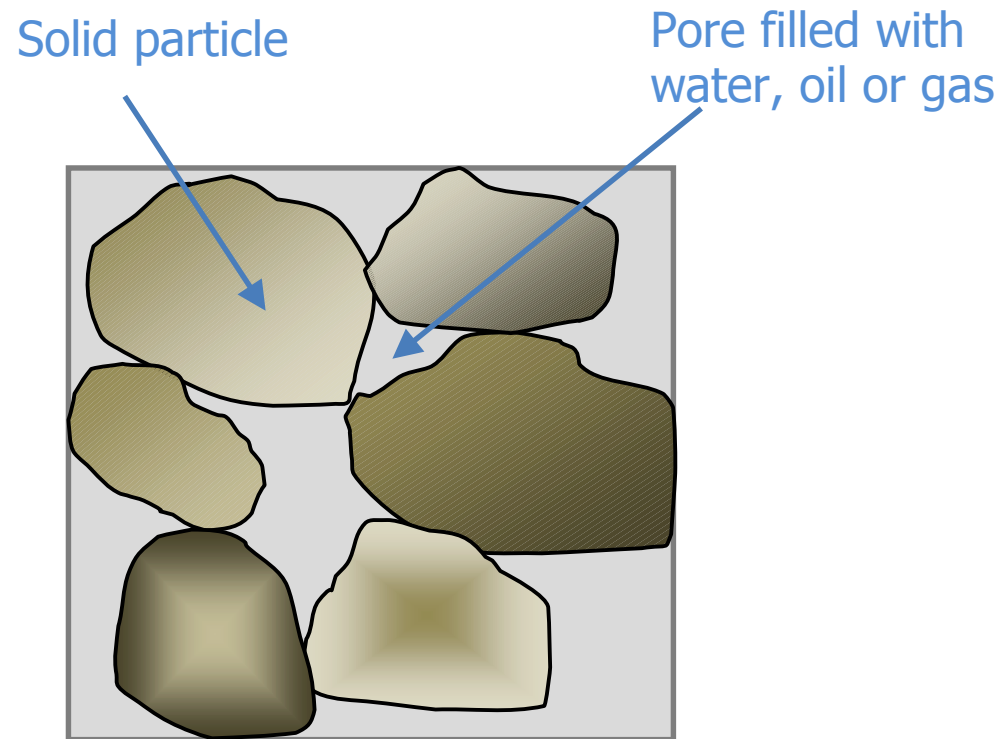


Calcarei. Sono rocce carbonatiche sedimentarie prevalentemente costituite da calcite di origine chimica o detritica

Concetti di base

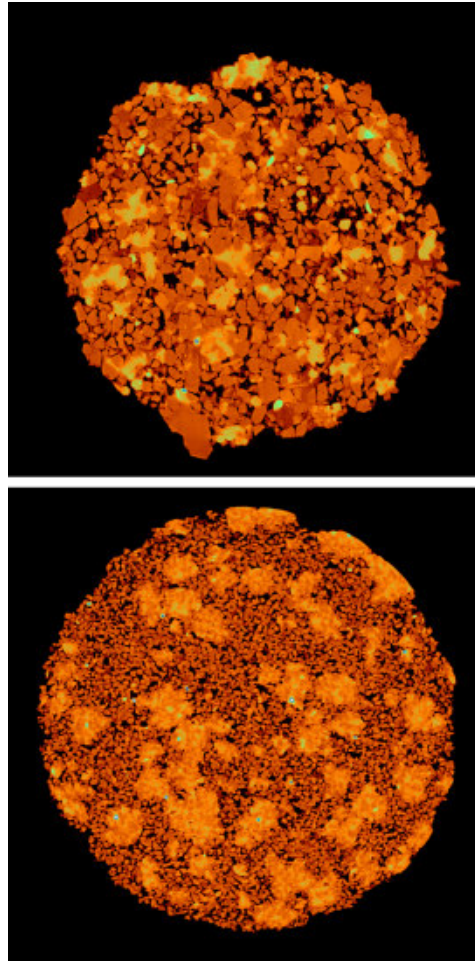
La meccanica delle rocce ad elevata profondità sfrutta anche i principi della meccanica dei terreni.

Il mezzo è poroso e trifase. La fase liquida può contenere olio, la fase gassosa può contenere metano. Diventa fondamentale il principio degli sforzi efficaci.



Rocce sedimentarie: un materiale multifase

Solid grains + water, oil, gas

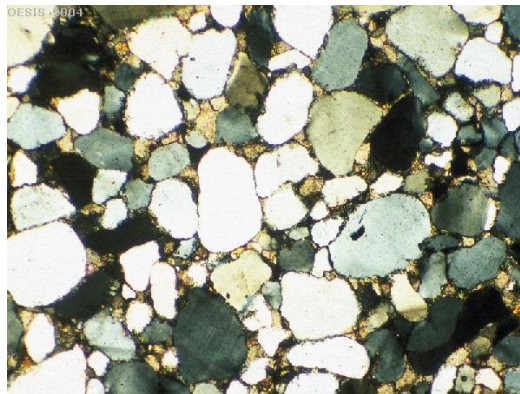


Le rocce sono eterogenee a tutte le scale (dal micron al chilometro)

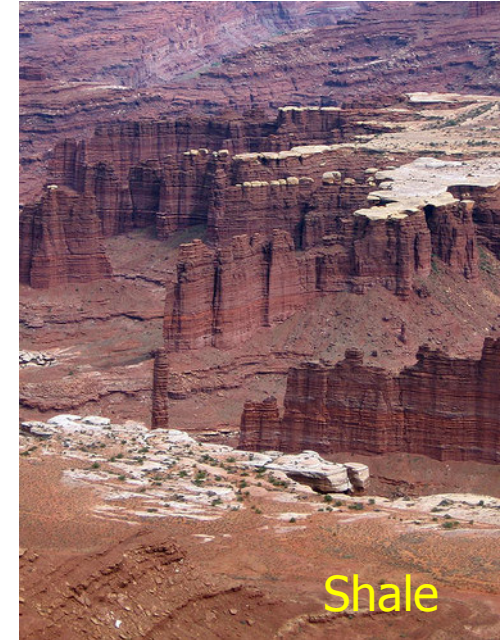
Ammasso roccioso

Matrice

Grani



Ammassi rocciosi



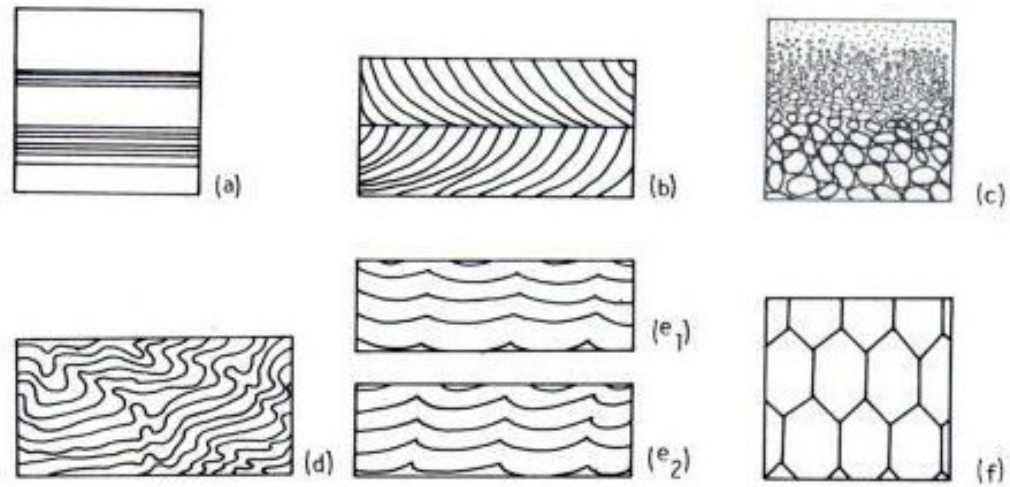


Figure 3.1. Depositional features of **sedimentary** rocks: a) Regular **bedding**; b) Current **bedding**; c) Graded **bedding**; d) Slump **bedding**; e₁) Top wave ripple marks; e₂) Bottom current ripple marks; f) Sun cracks (after Duncan, 1969).

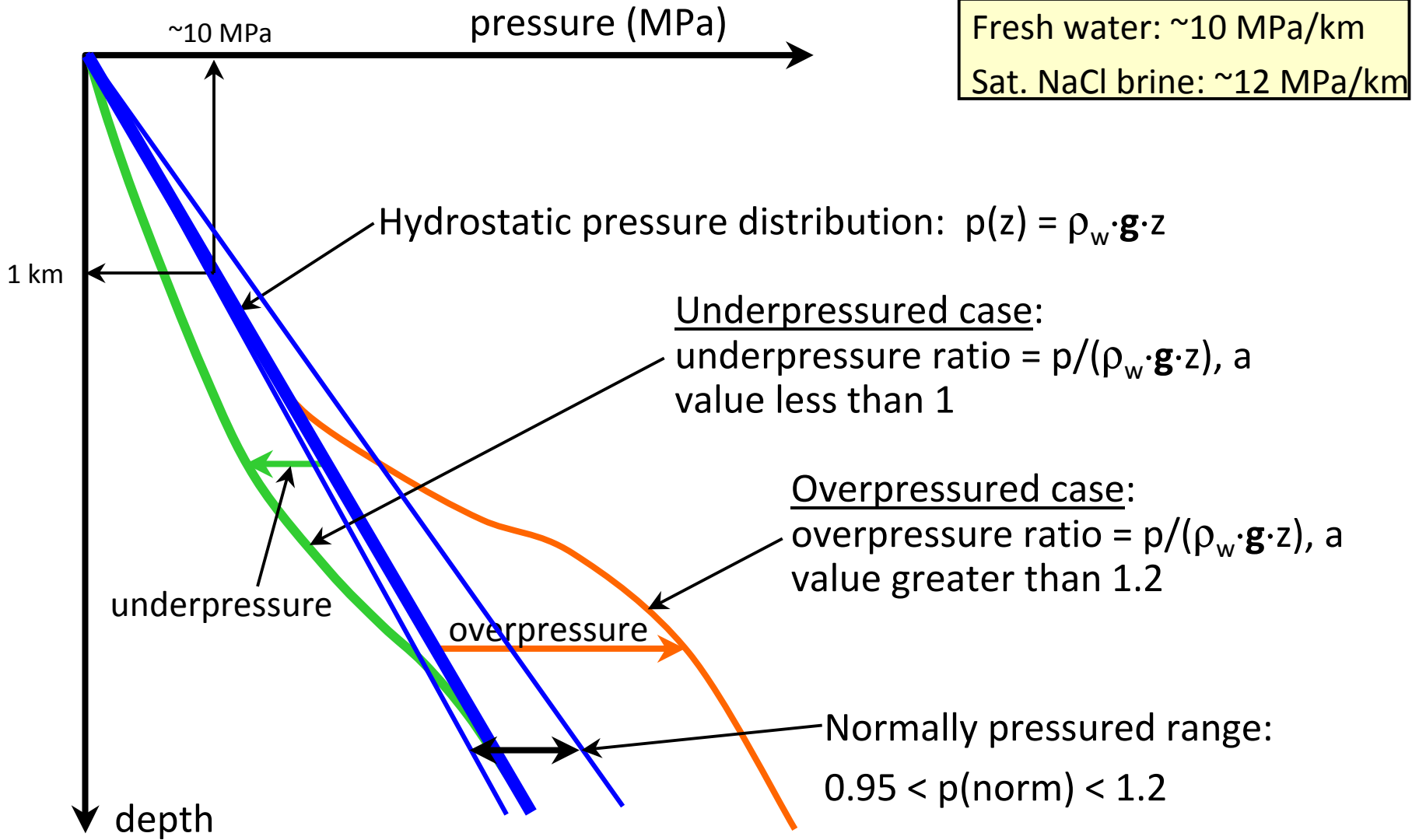


Stati tensionali in bacini sedimentari

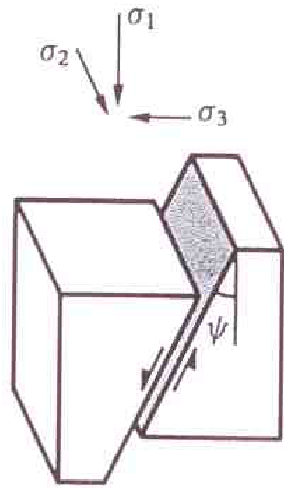
Un bacino di questo genere può essere soggetto a **subsidenza sedimentaria, variazioni del livello del mare e sforzi tettonici**, oltre che a fenomeni di erosione, variazioni dell'ambiente sedimentario, della velocità di sedimentazione, soluzione e precipitazione di materiale cementante etc.

Queste attività geologiche e questi eventi non provocano soltanto variazioni delle proprietà meccaniche dell'ammasso roccioso, ma anche delle condizioni di contorno in termini di stato tensionale iniziale e pressione interstiziale.

Pressione dell'acqua interstiziale

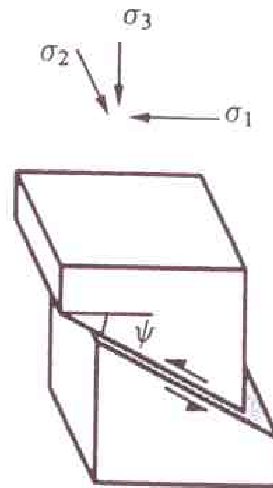


Tipi di faglie in relazione agli sforzi tettonici



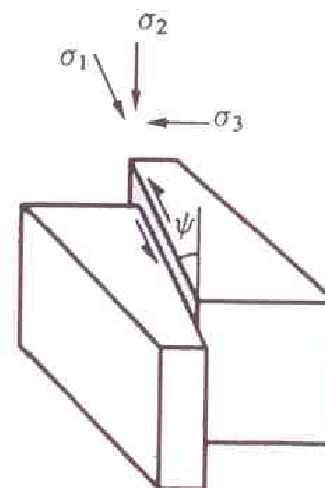
σ_1 vertical

Faglia normale



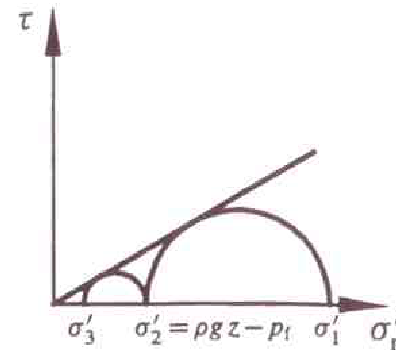
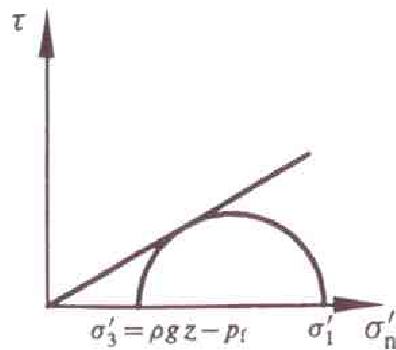
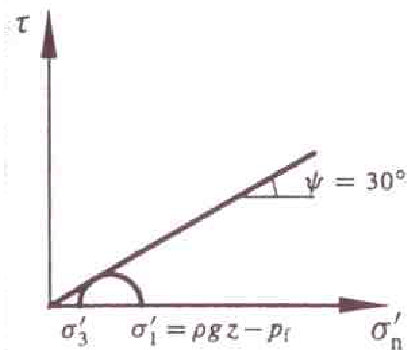
σ_3 vertical

Faglia inversa



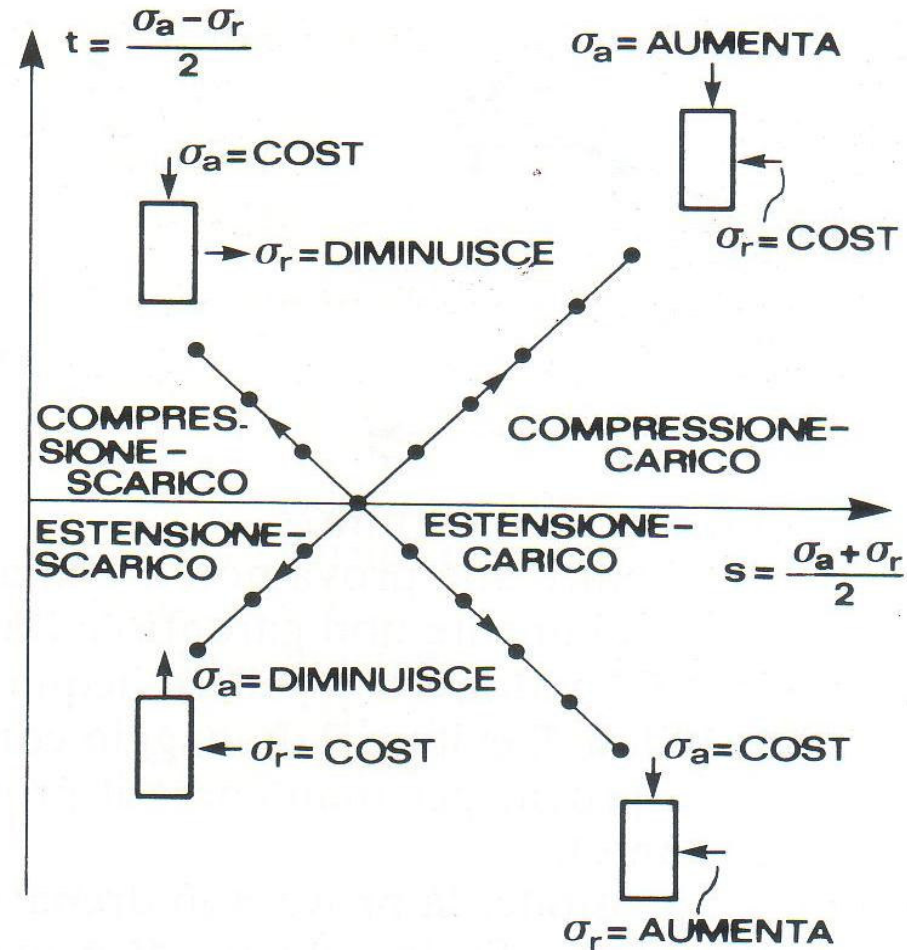
σ_2 vertical

Faglia trascorrente



Prove di laboratorio per rocce a grande profondità

Le prove triassiali possono essere svolte seguendo un percorso di carico differente in modo da seguire lo stato tensionale indotto, per esempio, dalla realizzazione di un pozzo



Prove triassiali

- Determinazione delle costanti pseudo - elastiche e dei parametri di resistenza a taglio
 - Borehole instabilities, breakouts, failure
 - Reservoir shear and induced seismicity
 - Casing shear and well collapse
 - Reactivation of old faults, creation of new ones
 - Hydraulic fracture in soft, weak reservoirs
 - Loss of cohesion and sand production
 - Bit penetration

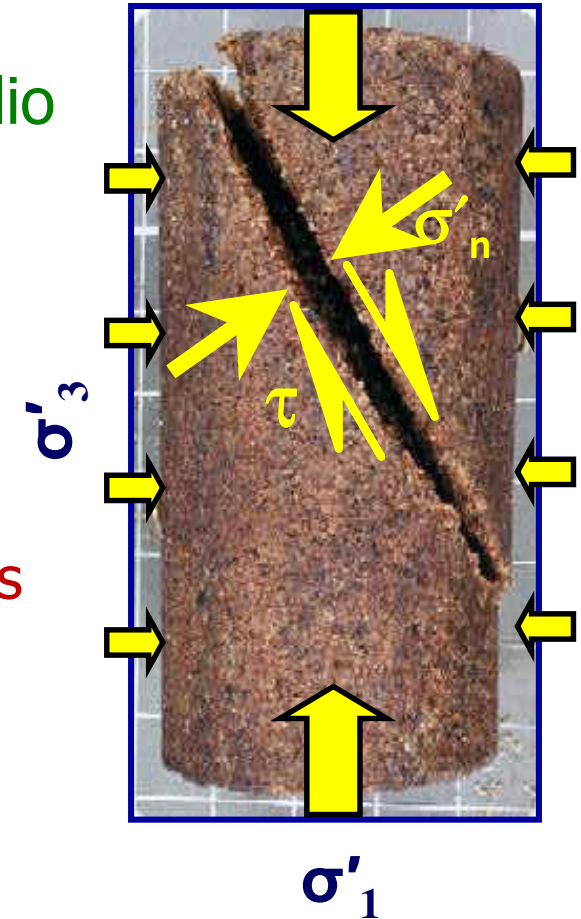
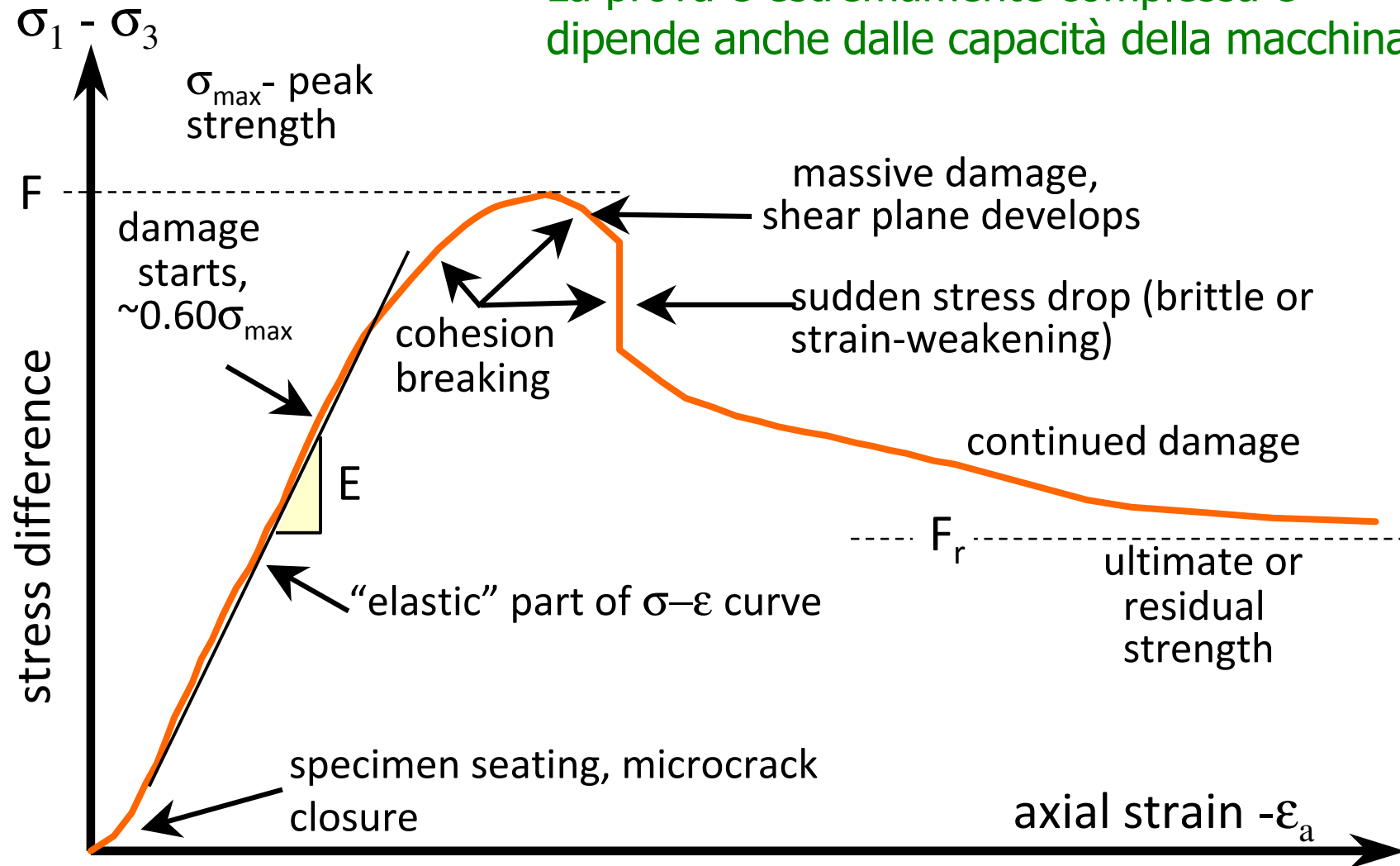


Diagramma sforzo deviatorico – deformazione assiale di una prova triassiale

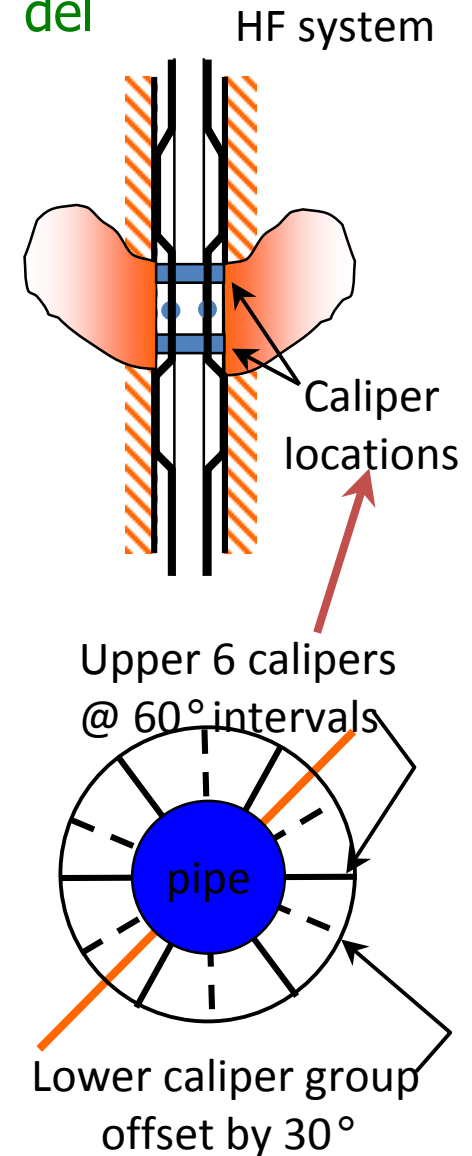
La prova è estremamente complessa e
dipende anche dalle capacità della macchina



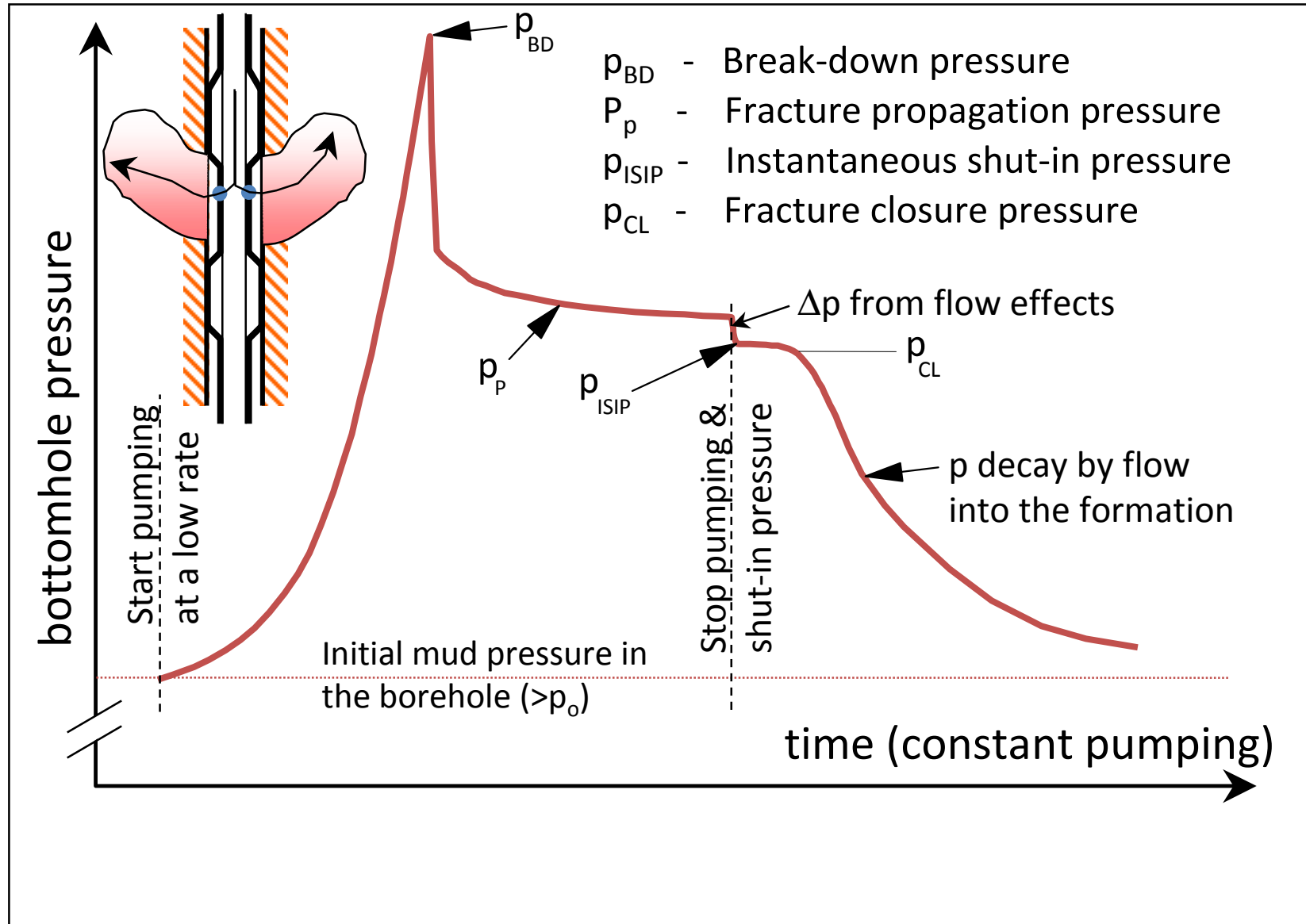
I metodi per la misura dello stato tensionale, qui descritti, applicano essenzialmente la fratturazione idraulica

Fratturazione idraulica in pozzo, in cavità isolata contenente discontinuità perpendicolari all'asse del pozzo, dove viene iniettata acqua in pressione

- La cavità può essere attrezzata con estensimetri;
- Può essere misurata l'espansione del foro (build-up);
- Si può determinare l'orientazione delle fratture quando questa si propaga;
- Note, grazie alle misure estensimetriche, le deformazioni radiali $\varepsilon_r(\theta)$, è possibile stimare E e ν , applicando la teoria dell'elasticità;
- Si può controllare la geometria della cavità e la sua eventuale asimmetria;
- E' evidentemente una misura molto costosa.

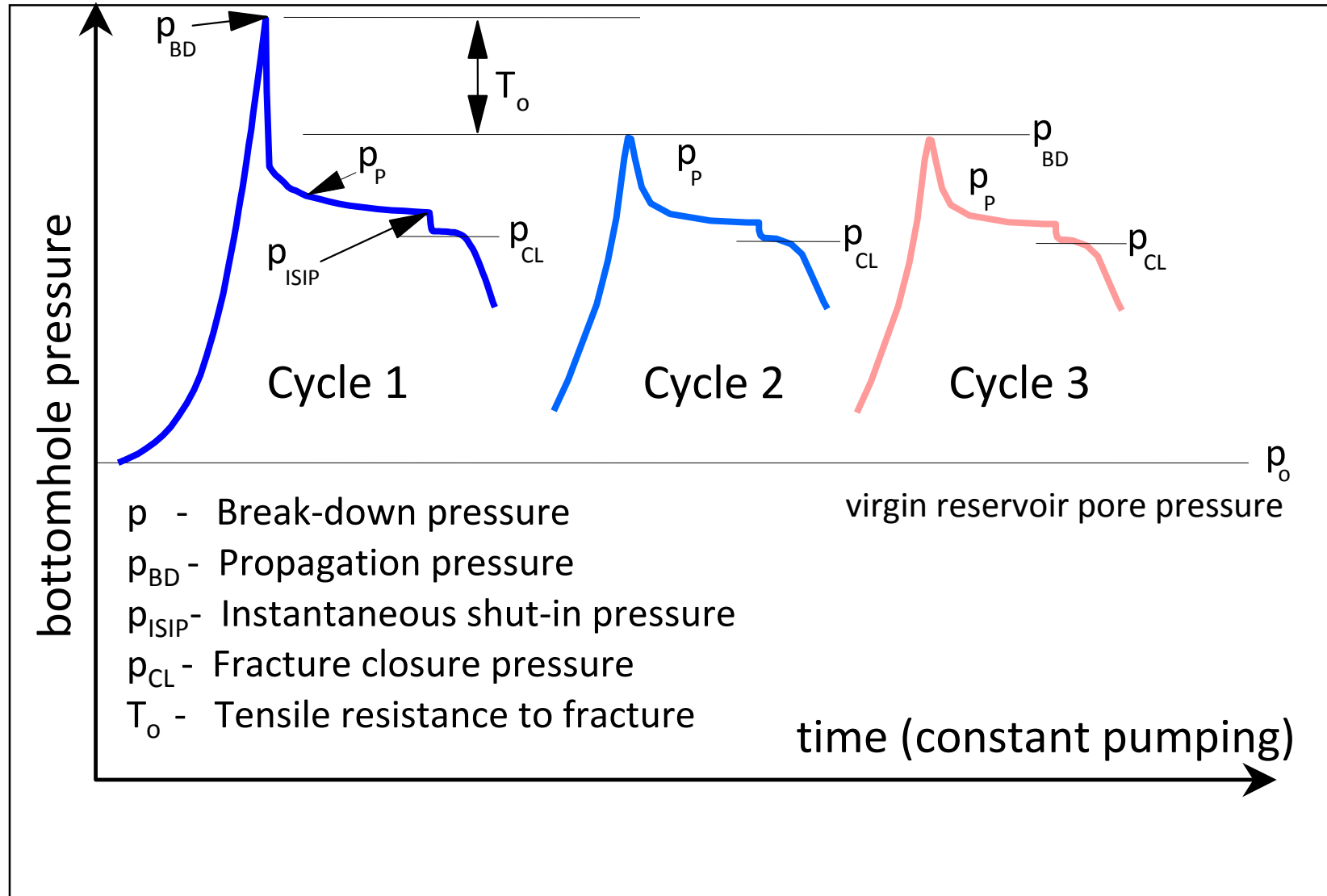


Ciclo di fratturazione idraulica



Cicli ripetuti di fratturazione idraulica

Quando si innesca la frattura, a portata costante, si ha una caduta di pressione, poi, dopo un tratto a pressione più o meno costante, si ha una nuova istantanea caduta di pressione fino a un valore che rappresenta la tensione minima nel piano orizzontale



La meccanica delle rocce viene impiegata nella CCS per assicurare il sicuro stoccaggio della CO₂ in serbatoi di fluidi profondi

Lo stoccaggio della CO₂ con iniezione pressurizzata o ripressurizza serbatoi di fluidi profondi. E' necessario verificare la stabilità dei pozzi e del tetto dei serbatoi da fenomeni di rottura fragile in faglie, con incrementi locali di permeabilità che provocano la fuga di fluidi ricchi di CO₂ dal serbatoio

Meccanismo di intrappolamento del biossido di carbonio (4 Fasi)

Il gas, raccolto in impianti che si trovano vicino alle centrali termiche e trasformato allo stato liquido e trasportato da un carbonodotto fino a profondità superiori a 800 metri e a pressioni superiori a 70 atmosfere viene pompato da un pozzo scavato per questo scopo in un serbatoio.

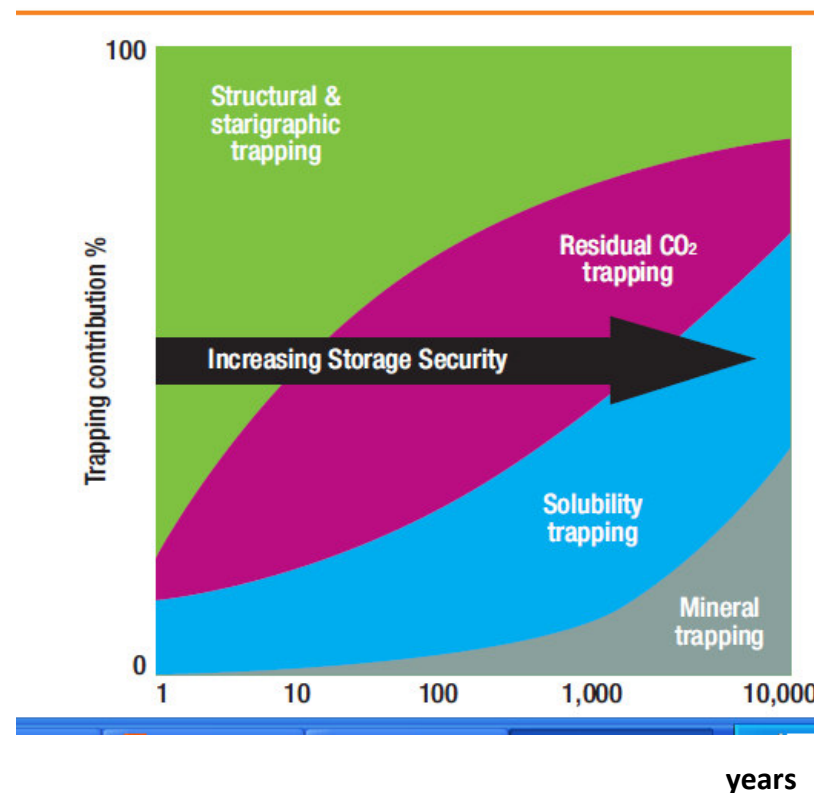
Quando il gas liquido filtra nella roccia tende a salire, muovendosi attraverso i pori, fino a raggiungere il tetto della formazione sovrastante dove resta intrappolato perché quella roccia è impermeabile. Questa prima fase è definita con il termine **strutturale**.

Nella seconda fase, detta **residuale**, una significativa frazione di biossido di carbonio che migra dal pozzo all'interno della formazione rocciosa permeabile viene trattenuta e immobilizzata dalle forze capillari.

L'anidride carbonica che si scioglie nell'acqua che permea le rocce non mantiene per lungo tempo una fase gassosa e quindi le forze, dovute al suo minor peso, si annullano. Questo fenomeno, che è tanto più rapido quanto più le rocce sono saturate, viene chiamato **intrappolamento per dissoluzione**.

L'ossido di carbonio sciolto in acqua è debolmente acido e può reagire con minerali che costituiscono la roccia. Tutto ciò determina la conversione del biossido di carbonio in minerale carbonatico stabile, che rappresenta la forma più permanente di stoccaggio geologico. Questa fase è detta **minerale**.

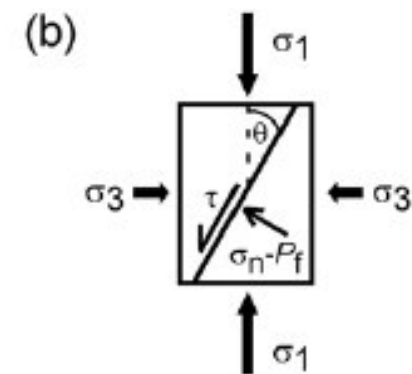
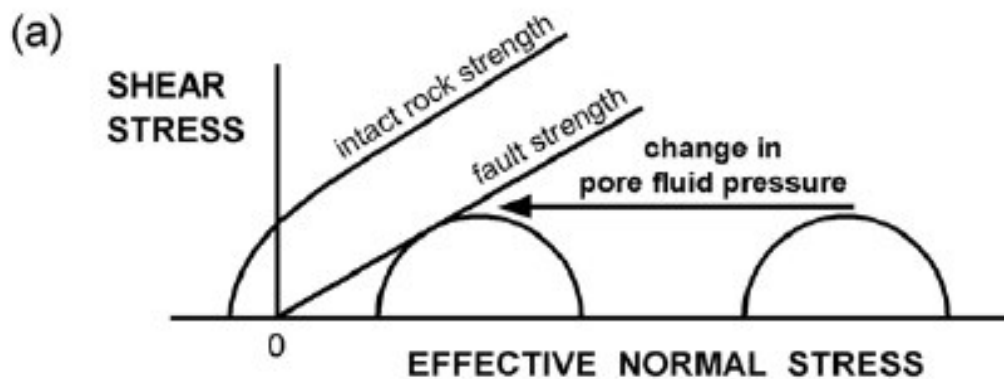
Il processo di intrappolamento dell'anidride carbonica avviene in un tempo stimabile nell'ordine dei 10.000 anni.



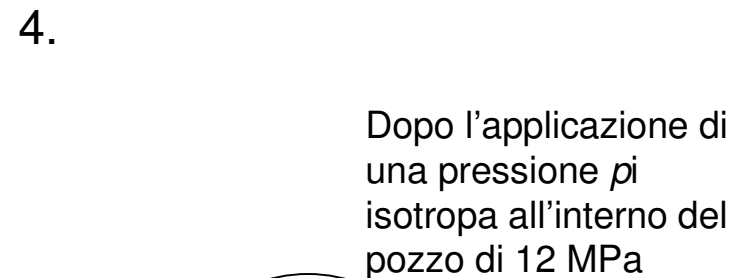
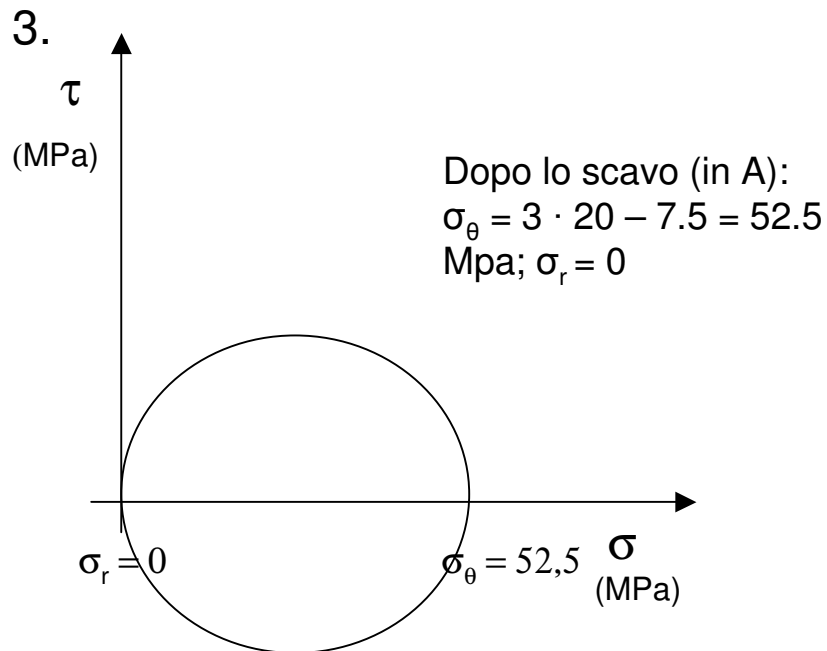
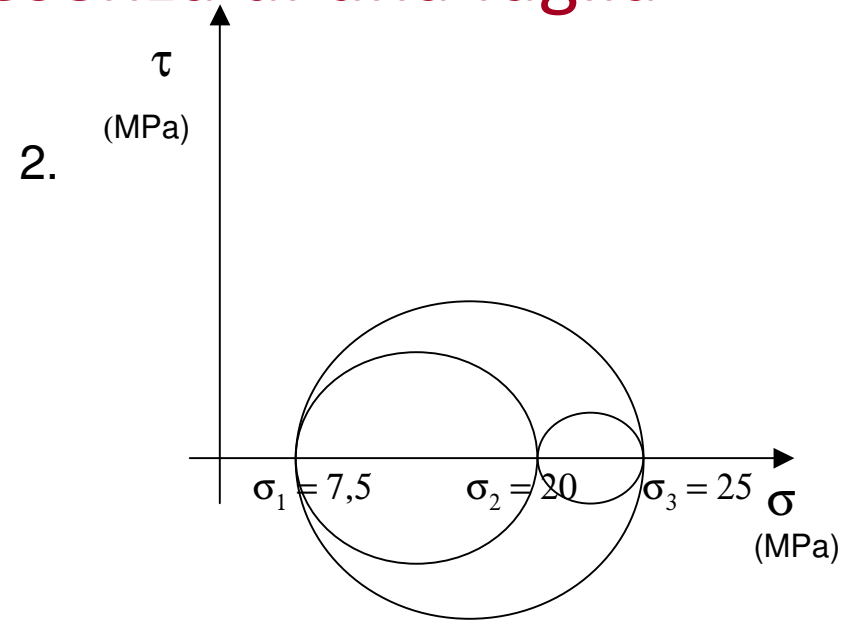
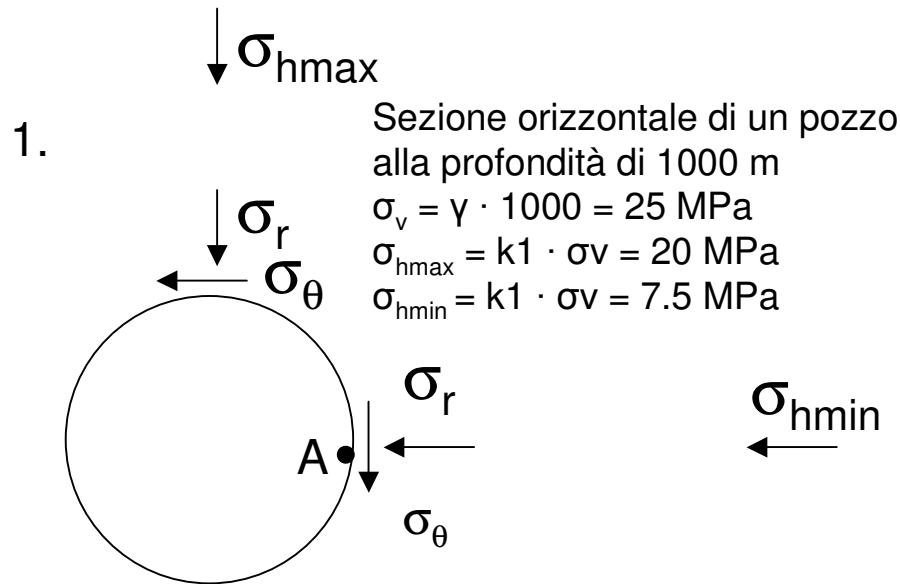
La pressione interstiziale diminuisce le pressioni efficaci e può determinare plasticità o rottura

La figura rappresenta gli involucri di rottura nella roccia e nella discontinuità. La presenza di pressioni interstiziali può portare alla rottura se il piano in cui agiscono le tensioni normali e di taglio sulla discontinuità è quello tangente all'involucro di rottura

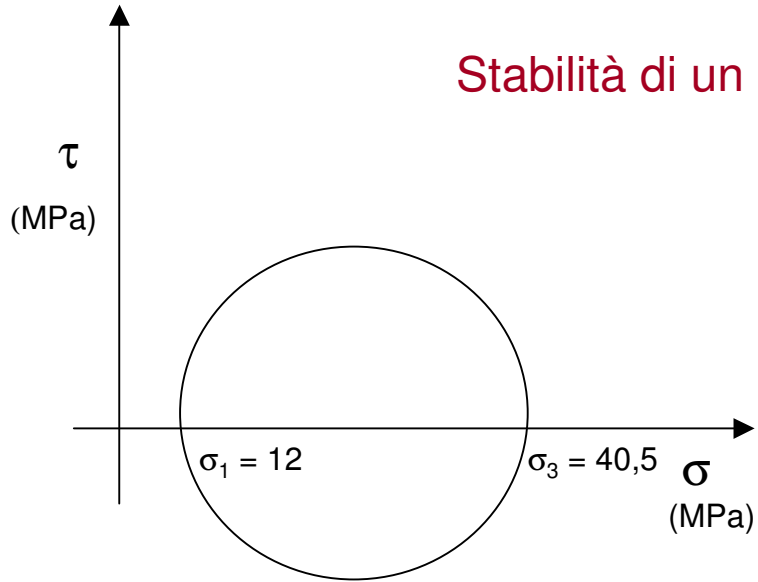
- Effetto dell'aumento della pressione del fluido sulla stabilità della faglia
- Tensioni agenti sul piano di faglia



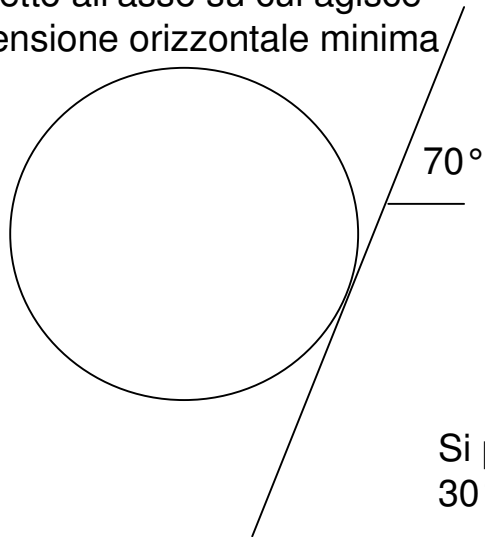
Stabilità di un pozzo in presenza di una faglia



Stabilità di un pozzo in presenza di una faglia

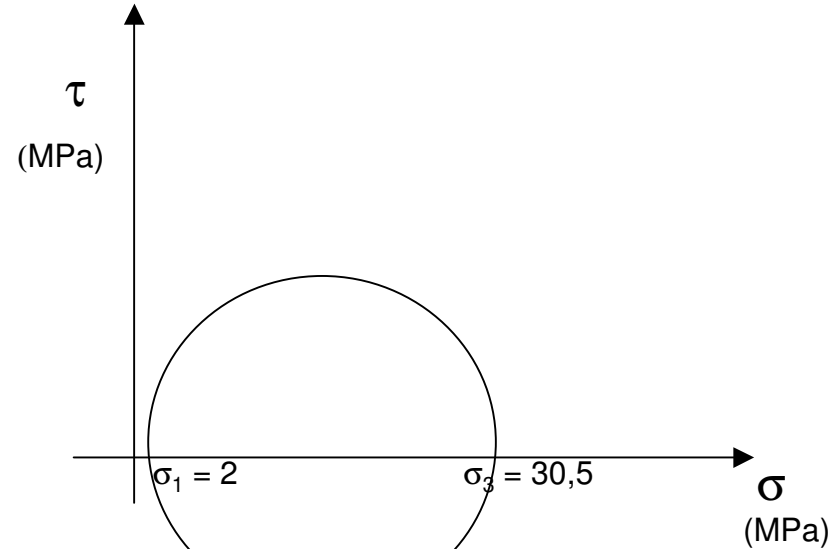


Nell'ipotesi che ci sia una faglia avente un'inclinazione α di 70° rispetto all'asse su cui agisce la tensione orizzontale minima

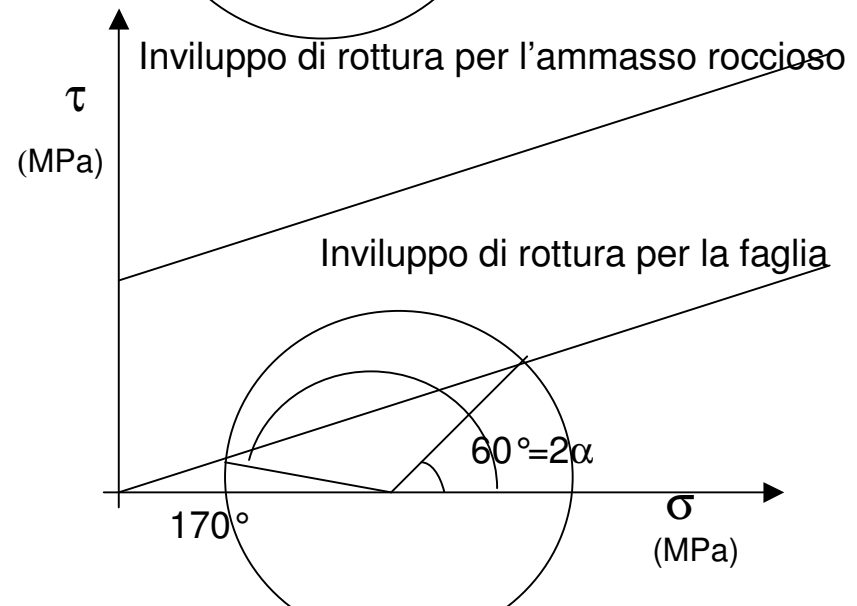


Si può avere rottura se:
 $30^\circ \leq \alpha \leq 85^\circ$

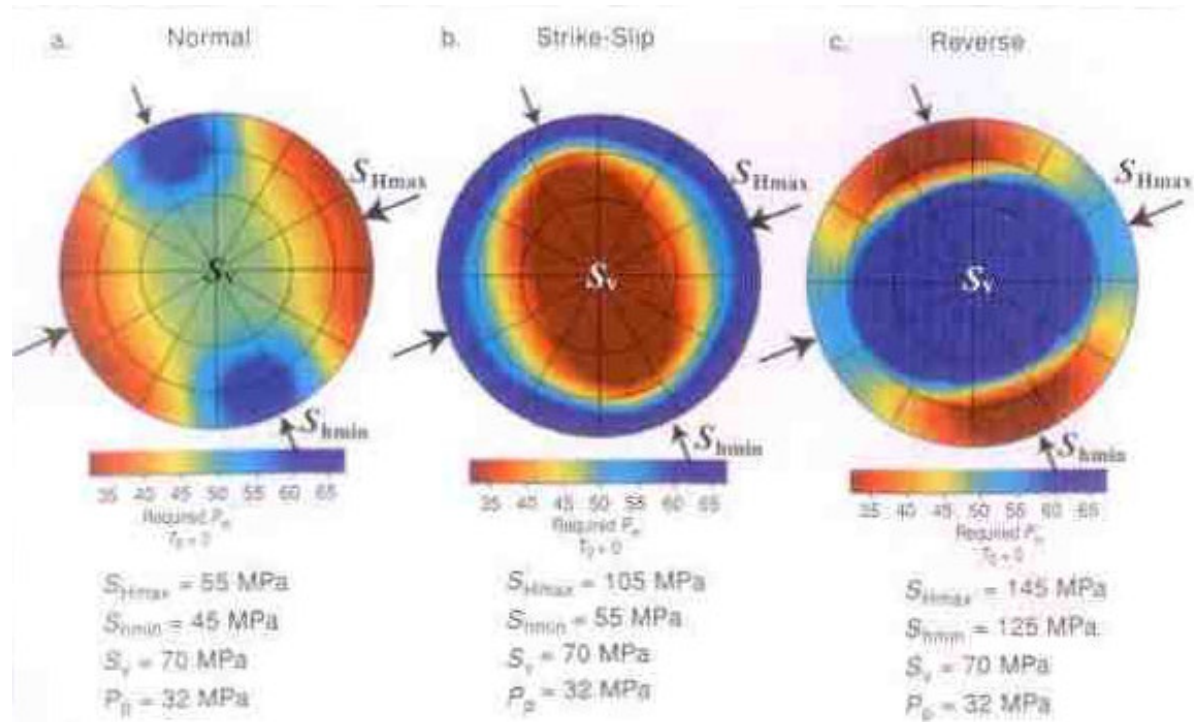
5. Esprimendosi in termini di pressioni efficaci
 $u = \gamma w \cdot z = 10 \text{ MPa}$



6.

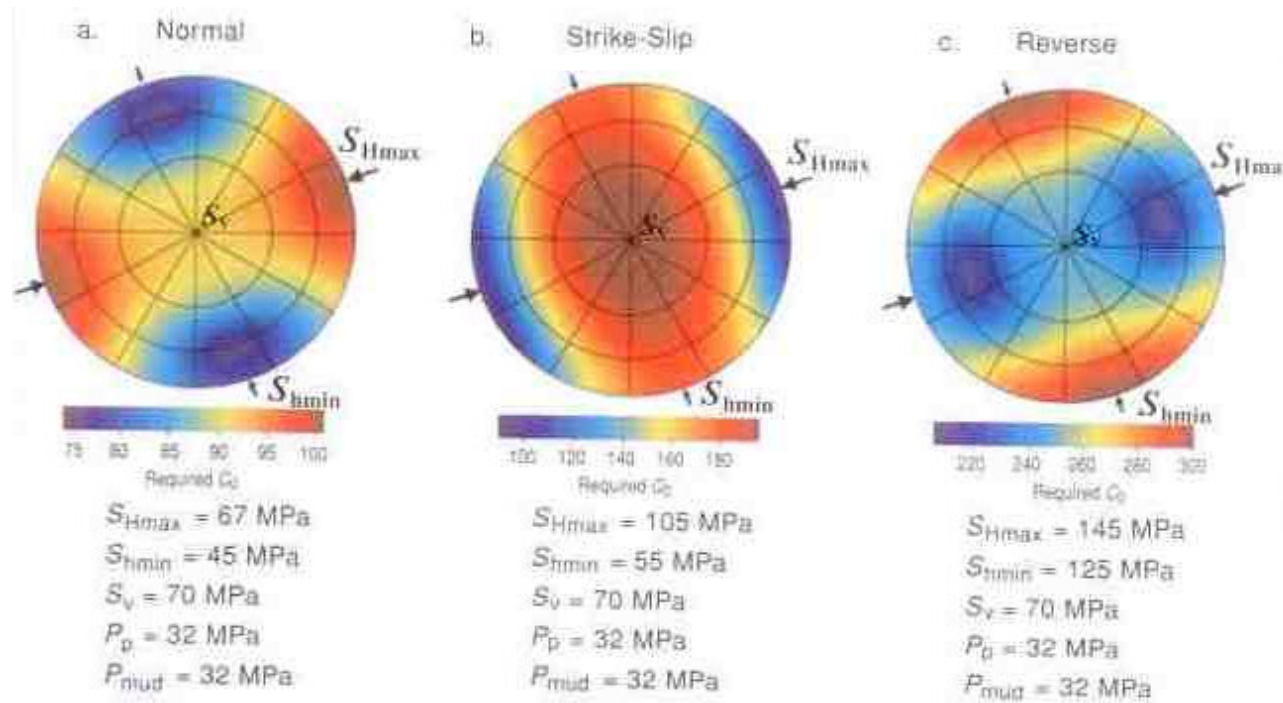


Tendenze per l'inizio di fratture di trazione in pozzi nel caso di diversi regimi di sforzi per faglie normali, trascorrenti e inverse.



La grandezza degli sforzi, della pressione dei pori e il peso del fango sono assegnati per ognuno dei 3 casi, il colore indica la resistenza della roccia T_0 richiesta per prevenire la frattura (Zoback, 2007)

Tendenze per l'inizio del "breakout" in pozzi nel caso di diversi regimi di sforzi per faglie normali, trascorrenti e inverse.



La grandezza degli sforzi, della pressione dei pori e il peso del fango sono assegnati per ognuno dei 3 casi, il colore indica la resistenza della roccia C_0 richiesta per prevenire la frattura (Zoback, 2007)

Modellazione numerica dello stoccaggio della CO₂

Il problema dello stoccaggio della CO₂ indotto con l'iniezione del gas allo stato fluido e ad alta pressione in acquiferi impermeabili, come quelli salini profondi o in giacimenti di gas, olio o carbone può essere studiato con modelli numerici del flusso multifase accoppiato con quello termico e con le deformazioni di una roccia porosa fratturata.

Il modello (Rutqvist et al. 2002) usa due codici di calcolo accoppiati tra loro (TOUGH2 e FLAC3D)

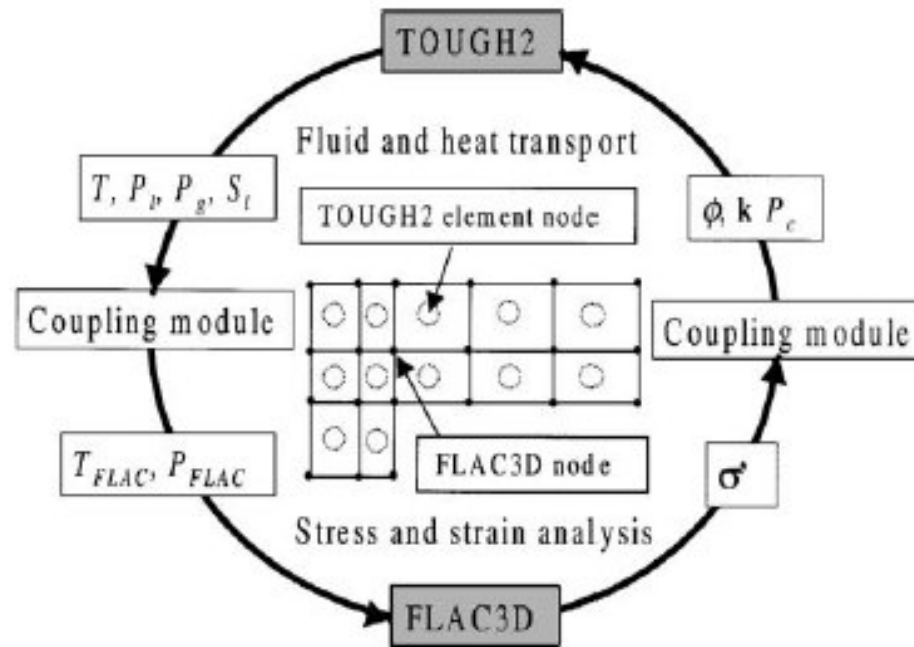


Fig. 1. Schematic of linking TOUGH2 and FLAC3D for a coupled THM simulation.

Il modello assume una legge non lineare di variazione delle proprietà idrauliche con la pressione per un acquifero in un mezzo poroso sedimentario e un tufo vulcanico fortemente fratturato

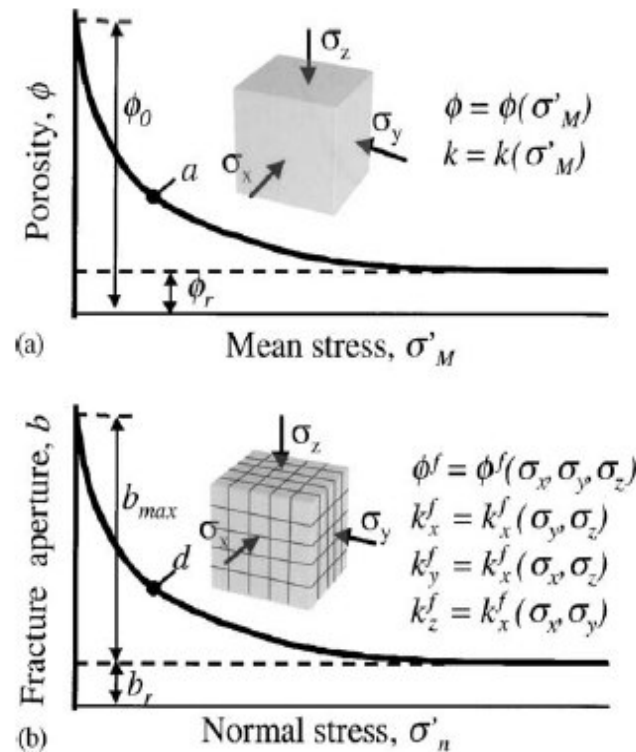


Fig. 3. Conceptual models and basic nonlinear coupling functions for (a) porous sedimentary aquifer rock and (b) highly fractured volcanic tuff.

Dati di ingresso e schema del dominio modellato

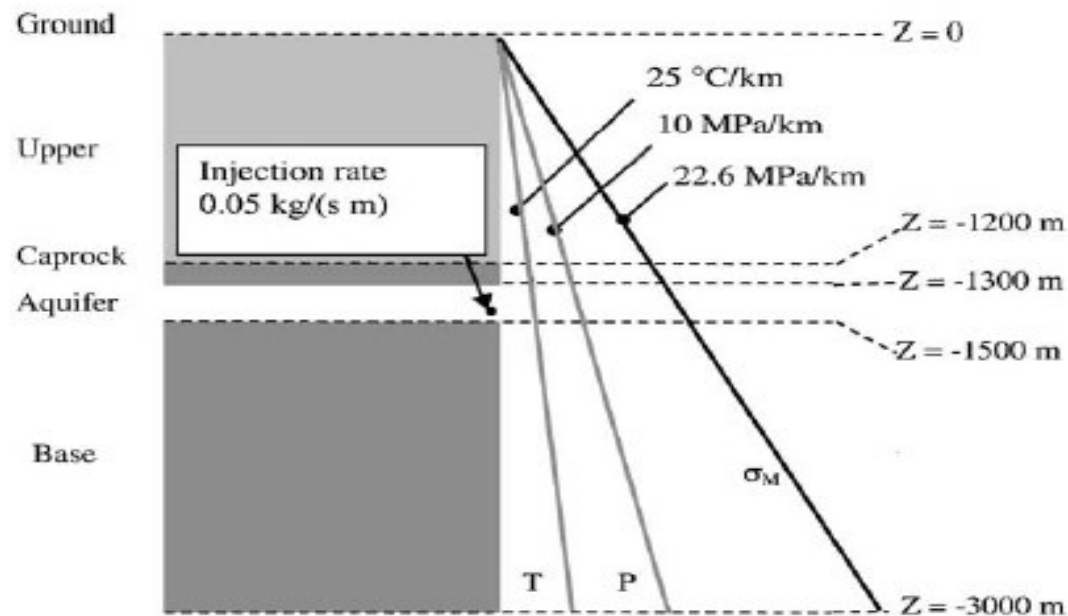


Fig. 4. Geometry and initial conditions for simulation of high pressure CO₂ injection into a brine aquifer. The model is extended laterally far enough to be infinite acting during a 10-year injection period.

Pressioni di iniezioni calcolate in funzione del tempo nelle condizioni di dipendenza e indipendenza della permeabilità dalle tensioni (in alto). Distribuzione spaziale nel tempo della CO₂ all'interno dell'acquifero salino

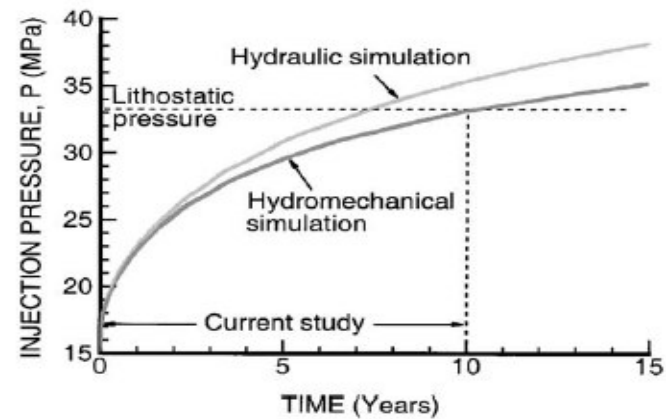


Fig. 5. Calculated injection pressure as a function of time with and without consideration of stress dependent permeability.

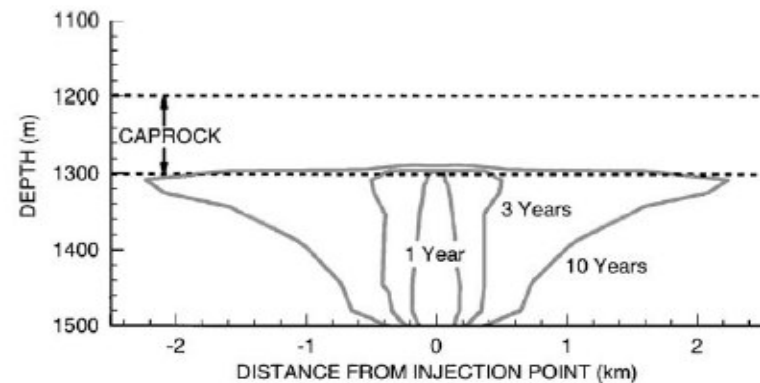


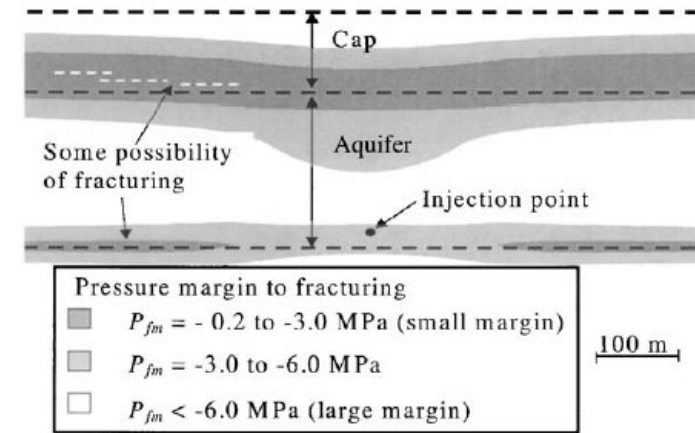
Fig. 6. Spread of the supercritical CO₂ fluid within the brine formation.

Risultati della modellazione dopo un tempo di 10 anni

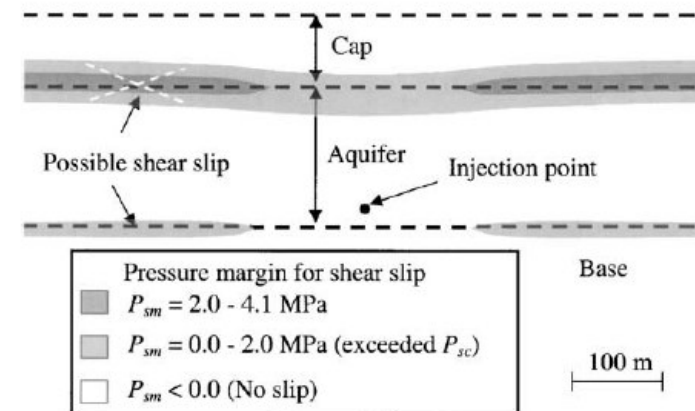
Nella figura sono riportati i margini di pressione (il valore che può essere assegnato senza rotture nella roccia) per fratturazione idraulica (in alto) e per scorrimento su faglie pre – esistenti.

a) Il margine di pressione è la pressione del fluido corrente meno la pressione di fratturazione critica

b) Il margine di pressione è la pressione del fluido corrente meno la pressione critica per lo scorrimento. La pressione critica per lo scorrimento di taglio è calcolata usando il criterio di Coulomb assumendo che una faglia con coesione nulla e angolo di attrito paria 30° (situazione comune)



(a)



(b)