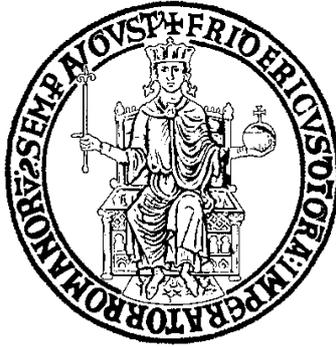


UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI

“FEDERICO II”



Corso di Laurea in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Ambientale (DICEA)

*Tesi di laurea in Geologia Applicata*

**CIRCOLAZIONE IDRICA NEGLI AMMASSI LAPIDEI FRATTURATI:**

**MODELLI CONCETTUALI E APPLICAZIONI**

**RIASSUNTO**

**RELATORE:**

**Prof. Paolo Budetta**

**CORRELATORE:**

**Dott. Geol. Claudio De Luca**

**CANDIDATA:**

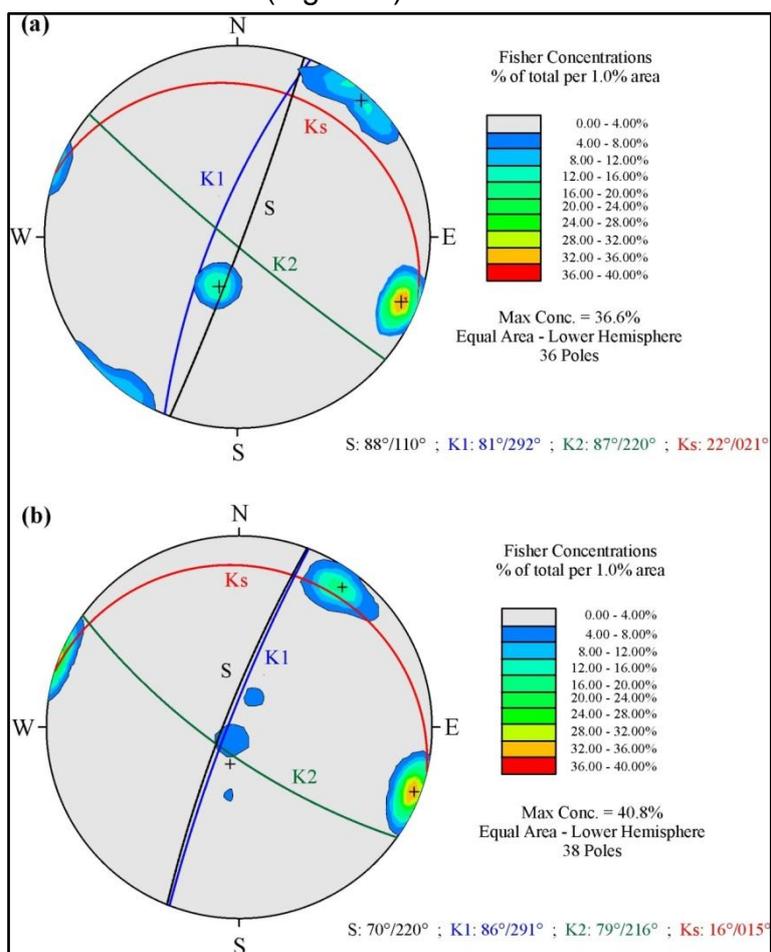
**Rosa Anna Criscuolo**

**N49/143**

**ANNO ACCADEMICO 2012/2013**

La circolazione dell'acqua nelle rocce lapidee fratturate è un fenomeno che può avere conseguenze e risvolti importanti in numerosi problemi tecnici dell'ingegneria. È opportuno rilevare che, in passato, allo studio degli acquiferi presenti negli ammassi rocciosi fratturati, è stata dedicata una minore attenzione rispetto a quelli presenti nei mezzi porosi. L'ammasso roccioso, generalmente poco o per niente permeabile, può divenire sede di un' importante circolazione idrica grazie alla *permeabilità per fessurazione*, che può essere *primaria*, *secondaria* o *mista*. Lo studio della circolazione idrica negli ammassi fratturati non può quindi prescindere dal rilevamento geologico-strutturale delle discontinuità.

Le proiezioni stereografiche sono usate per rappresentare i dati di orientazione riguardo le discontinuità negli ammassi rocciosi (Figura 1).



**Figura 1 – Ricostruzione, mediante il programma di calcolo DIPS, dei grandi cerchi delle famiglie presenti in un ammasso roccioso. In (a) ed in (b) le famiglie di discontinuità presenti sono 4, caratterizzate dai loro valori di dip/dip direction medi. S indica la stratificazione, mentre K1, K2 e Ks rappresentano 3 famiglie di discontinuità di origine tettonica**

Osservazioni sperimentali mostrano anche una riduzione della frequenza della fratturazione al crescere della profondità, legata ad una riduzione dell'apertura dei giunti. Questo determina una diminuzione, spesso abbastanza rilevante, dell'effettiva permeabilità delle fratture con la profondità, con una conseguente diminuzione della permeabilità d'insieme del mezzo. Una stima del grado di fratturazione dell'ammasso può

essere effettuata sia in affioramento che in profondità mediante le perforazioni e la stima dell'RQD (Figura 2).

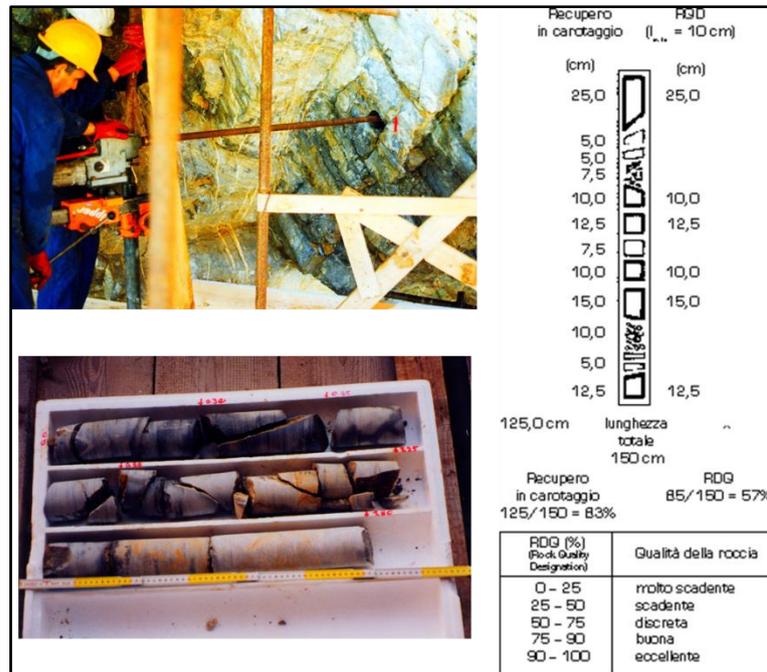


Figura 2- Esempio di perforazione eseguita con doppio carotiere con carotatrice portatile elettrica; prodotto del carotaggio e criterio di calcolo dell'RQD.

Secondo l'approccio deterministico, la roccia è considerata permeabile solo attraverso le fratture. Dal punto di vista idraulico questo corrisponde ad assimilare il flusso d'acqua nelle discontinuità a quanto avviene tra due piani paralleli o sub-paralleli (Figura 3).

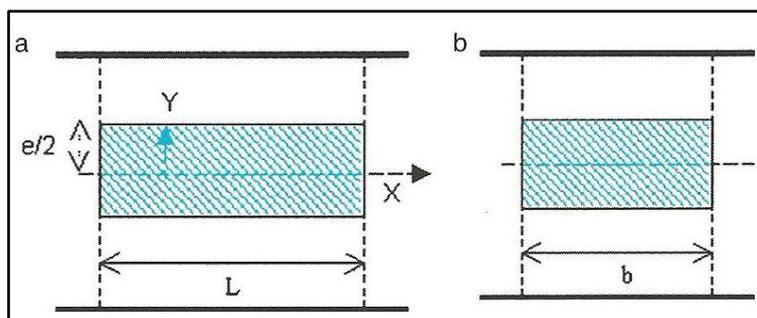


Figura 3- Rappresentazione del flusso tra due piani paralleli, lisci, indefiniti, con apertura costante (e); a) sezione longitudinale; b) sezione trasversale (da Citrini e Nosedà, 1987)

A partire dall'equazione indefinita di Navier-Stockes:

$$\rho \left( F - \frac{du}{dt} \right) = gradP - \eta \Delta_2 u$$

dove:  $F$  = forza dovuta al campo gravitazionale;  $P$  e  $u$  = pressione nel fluido e velocità del fluido;  $\rho$  e  $\eta$  = densità e viscosità dinamica del fluido,

si ricava il valore della **conducibilità idraulica (K)**, riferita alla singola discontinuità, liscia e in condizioni di moto laminare:

$$K = \frac{\gamma e^2}{12\eta} = \frac{ge^2}{12\nu}$$

con:  $e$  = apertura media dei giunti;  $g$  = accelerazione gravitazionale;  $\nu, \gamma, \eta$  = viscosità cinematica, peso specifico e viscosità dinamica del fluido.

Le discontinuità non sono mai isolate, ma possono essere raggruppate in famiglie e, per considerare anche l'effetto della *spaziatura* e della *frequenza*, Snow (1969) propose la seguente relazione, valida per discontinuità lisce e in condizioni di moto laminare:

$$K_i = \frac{e_i^3 f_i g}{12\nu}$$

dove:  $f_i$  = frequenza della  $i$ -esima famiglia di discontinuità [ $m^{-1}$ ].

La formula per la conducibilità idraulica della singola frattura può essere generalizzata e trasformata in una per il sistema di discontinuità e, inoltre, si possono ottenere formule diverse per tutti i regimi di moto.

La valutazione della conducibilità idraulica di un ammasso roccioso fratturato deve tener conto anche dell'orientazione delle discontinuità che influenza il flusso d'acqua, per cui la conducibilità idraulica viene espressa come un tensore (Louis, 1974):

$$\bar{\bar{K}} = \sum_{i=1}^m \left[ \frac{e_i^3 f_i g}{12\nu} \right] \bar{\bar{A}}_i$$

con:  $\bar{\bar{K}}$  = tensore conducibilità;  $e$  = apertura delle discontinuità;  $g$  = accelerazione di gravità;  $f$  = frequenza (numero di discontinuità per unità di lunghezza);  $\nu$  = viscosità cinematica dell'acqua a 20° C;  $m$  = numero di famiglie di discontinuità;  $\bar{\bar{A}} = (\bar{\bar{I}} - \bar{n} \otimes \bar{n})$  = tensore orientazione con  $\bar{\bar{I}}$  tensore fondamentale (matrice identità) e  $\bar{n}$  vettore normale al piano medio della famiglia di discontinuità considerata.

Il prodotto vettoriale  $(\bar{\bar{I}} - \bar{n} \otimes \bar{n})$  dà un vettore del secondo ordine orientato in un sistema di riferimento assegnato, sicché la proiezione della conducibilità idraulica nel sistema di riferimento considerato si può ottenere come prodotto:

$$K \begin{vmatrix} (1-x^2) & -xy & -xz \\ -yx & (1-y^2) & -yz \\ -zx & -zy & (1-z^2) \end{vmatrix}$$

Calcolando gli auto-valori e gli auto-vettori di tale matrice, si ottengono le tre conducibilità idrauliche,  $K_1, K_2, K_3$ , e la loro orientazione nello spazio.

La conducibilità idraulica fortemente orientata tipica degli ammassi rocciosi anisotropi, incide sulle condizioni del flusso dell'acqua sotterranea.

Per una valutazione quantitativa del fenomeno, risulta molto utile individuare un **vettore anisotropia** ( $K_r$ ) dato da:

$$K_r = |K_1/K_3 K_1/K_2 K_2/K_3|$$

dove:  $K_1$ ,  $K_2$  e  $K_3$  sono i valori principali del tensore conducibilità idraulica, cioè i valori lungo le direzioni in cui la permeabilità è massima, minima e media.

Il **vettore anisotropia**  $K_r$  indica la relazione esistente tra i valori di conducibilità idraulica considerati in diverse direzioni dello spazio.

Se risulta nota la conducibilità idraulica considerata lungo le direzioni principali, cioè quelle corrispondenti alla permeabilità massima, minima e media, come detto precedentemente, è possibile verificare se essa coincide con il gradiente idraulico.

In particolare, nel caso estremo in cui la roccia non possieda conducibilità idraulica lungo la direzione del gradiente, il flusso d'acqua risulta impedito, anche se la permeabilità complessiva dell'ammasso roccioso è diversa da zero.

Dall'esame dei tensori di conducibilità idraulica  $K_1$ ,  $K_2$ ,  $K_3$ , e del **vettore anisotropia**  $K_r$  è possibile:

- identificare la *direzione principale del flusso idrico*;
- delimitare il bacino idrogeologico;
- identificare le aree di ricarica e di deflusso dell'acquifero;
- ottenere i dati necessari per quantificare il flusso d'acqua.

In campo bidimensionale, la relazione più adatta per individuare la *direzione di massima conducibilità idraulica*  $\Theta_q$  come funzione del vettore anisotropia ( $K_r$ ) nel piano considerato è :

$$\Theta_q = \arctg(K_r)$$

Se il gradiente  $J$  ha una direzione diversa da  $\Theta_q$ , la conducibilità idraulica del mezzo nella direzione individuata dal gradiente ( $K_J$ ) è minore di quella massima ( $K$ ), per cui il flusso risulta, di conseguenza, ridotto (Figura 4).

In un ammasso roccioso non saturo, il flusso d'acqua all'interno delle discontinuità è regolato dalla gravità, per questo l'acqua tende a fluire in profondità seguendo l'orientazione delle discontinuità, specialmente di quelle che sono caratterizzate da un'elevata conducibilità idraulica (Figura 5).

Quando l'ammasso roccioso è saturo, infine, si può conoscere il tensore conducibilità idraulica, calcolando la conducibilità idraulica nella direzione del gradiente e considerando i casi di gradiente idraulico noto e non noto.

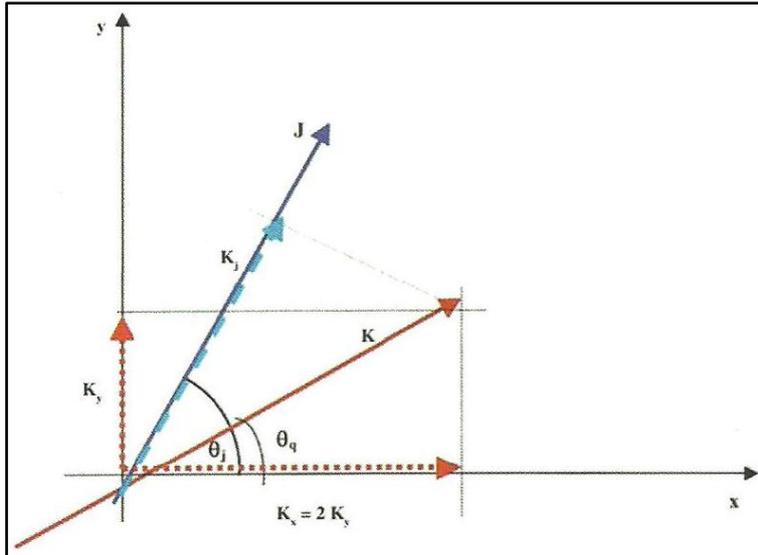


Figura 4- La freccia rossa rappresenta K, conducibilità idraulica massima. Le due frecce rosse tratteggiate rappresentano K<sub>x</sub> e K<sub>y</sub>, con K<sub>x</sub> = 2K<sub>y</sub>. La freccia azzurra tratteggiate rappresenta K<sub>J</sub>, conducibilità idraulica nella direzione del gradiente. Si nota che, nel caso rappresentato, risulta K<sub>J</sub> < K

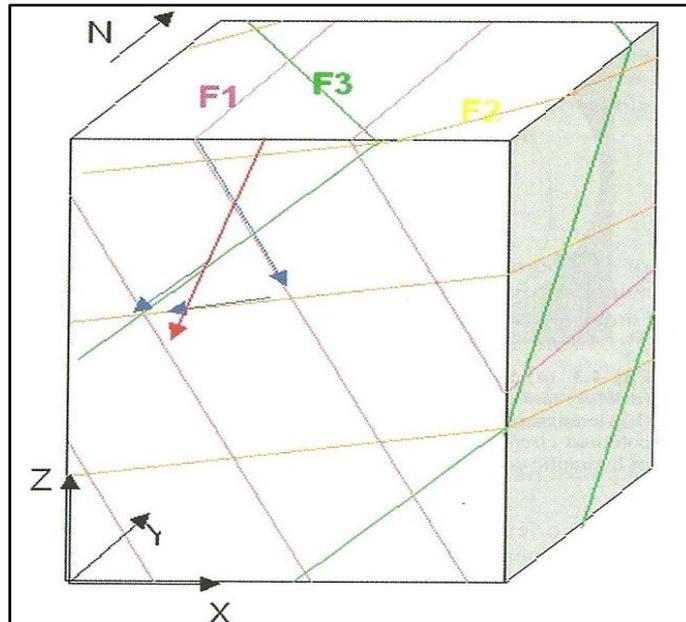


Figura 5- Rappresentazione tridimensionale di tre famiglie di discontinuità, delle tre principali direzioni di percolazione ad esse relative (frecce in azzurro) e della principale direzione del flusso (freccia in rosso)