



Ricerca di Sistema elettrico

## Caratterizzazione geostrutturale dell'area del bacino carbonifero del Sulcis

A. Plaisant, A. S. Bigi, C. Tartarello, L. Ruggiero, D. De Angelis,  
A. Conti, V. Romano, S. Lombardi

## CARATTERIZZAZIONE GEOSTRUTTURALE DELL'AREA DEL BACINO CARBONIFERO DEL SULCIS

A. Plaisant, A. Testa (Sotacarbo S.p.A.)  
S. Bigi, C. Tartarello, L. Ruggiero, D. De Angelis,  
A. Conti, V. Romano, S. Lombardi (Università La Sapienza, Roma)

Settembre 2015

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2014

Area: Produzione di energia elettrica e protezione dell'ambiente

Progetto: B.2 Cattura e sequestro della CO<sub>2</sub> prodotta da combustibili fossili

Obiettivo: Studi sull'utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO<sub>2</sub>

Responsabile del Progetto: ing. Stefano Gianmartini, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "*Studi sull'utilizzo pulito di combustibili fossili, cattura e sequestro della CO<sub>2</sub>*"

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Paolo Deiana

Responsabile scientifico SOTACARBO: Ing. Enrico Maggio

## Indice

SOMMARIO .....	4
1. INTRODUZIONE .....	5
2. DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI .....	6
2.1 METODOLOGIA E DATI .....	6
2.2 OSSERVAZIONI IN GALLERIA .....	7
2.3 ANALISI DELLA FRATTURAZIONE .....	11
2.4 DENSITÀ DI FRATTURAZIONE, SPACING DELLE FAGLIE E SATURAZIONE. ....	11
2.5 CONNETTIVITÀ E APERTURA .....	12
2.6 ARCHITETTURA DELLA ZONA DI FAGLIA .....	13
2.7 COSTRUZIONE DEL DFN .....	14
2.8 CALCOLO DELLA PERMEABILITÀ PER FRATTURAZIONE.....	18
2.9 CONFRONTO CON I DATI DI SUPERFICIE .....	18
RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	21
ALLEGATO 1 .....	22
ALLEGATO 2 .....	33
ALLEGATO 3 .....	42

## Sommario

Il presente lavoro si inserisce nell'ambito dell'Accordo di Programma MSE-ENEA sulla Ricerca di Sistema Elettrico, Piano Annuale di Realizzazione 2014, relativamente al tema di ricerca B.2 "Cattura e sequestro della CO<sub>2</sub> prodotta da combustibili fossili" e riguarda le attività c.2 "Rilievo geostrutturale in galleria". Il documento descrive lo studio relativo alle attività di sottosuolo concernenti la caratterizzazione delle faglie e della fratturazione condotta in miniera, con la rielaborazione dei dati e la comparazione con quelli rilevati in superficie. L'attività è stata svolta effettuando un'analisi strutturale delle principali zone di faglia, secondo transetti che hanno attraversato i piani di faglia primari e secondari. Uno degli obiettivi di questo lavoro è la comparazione tra i parametri della fratturazione osservati in superficie e quelli provenienti dalla stessa formazione a profondità di circa 500m.

## 1. Introduzione

Il presente lavoro fa parte delle attività di ricerca per la caratterizzazione geologico – strutturale del bacino del Sulcis, ai fini dello stoccaggio geologico di CO<sub>2</sub>.

A questo scopo è stato sviluppato un lavoro di valutazione dello stato di fratturazione delle litologie affioranti e sepolte che costituiscono la stratigrafia dell'area.

Per la caratterizzazione delle successioni di copertura, ovvero della Formazione del Cixerri e del complesso Vulcanico, si è proceduto alla valutazione della capacità di tenuta, in modo di poter garantire l'efficienza dello stoccaggio; invece per le successioni del potenziale reservoir, è stata valutata la capacità di volume disponibile per lo stoccaggio.

Durante questo lavoro (che è stato svolto principalmente durante il 2014) svolto per lo più durante il 2015, l'attività si è concentrata sullo studio della fratturazione delle formazioni del possibile reservoir, approfittando della disponibilità di osservare questa formazione nelle particolari condizioni di confinamento disponibili nella miniera di Nuraxi Figus (Fig.1), gestita dalla Carbosulcis S.p.A.

Nei locali della miniera affiora infatti, praticamente per tutto il suo spessore, la Formazione del Miliolitico, che poggia direttamente sul substrato paleozoico ed è ricoperta dalla Formazione del Lignitifero, oggetto dello sfruttamento.

La miniera di Nuraxi Figus si trova nel settore settentrionale rispetto all'area di studio, in cui la posizione di queste formazioni è notevolmente più superficiale rispetto a quella che tali litologie hanno nella zona a sud. Tuttavia le osservazioni sulla fratturazione e lo stato della formazione sono state eseguite a profondità comprese tra i 350 e i 450 m sotto il piano campagna, quindi con pressioni di confinamento molto più alte di quelle superficiali.

Le condizioni degli affioramenti sono in generale buoni, con una certa continuità, dovuta al fatto che, poiché la formazione è portante, non è stato necessario armare le superfici e la volta della galleria. Tuttavia, la mancanza di luce e le deformazioni legate alle procedure di scavo hanno ridotto la visibilità e l'accesso al dato.

I dati raccolti hanno permesso una analisi qualitativa e quantitativa della fratturazione che caratterizza questa formazione al di sotto del piano campagna e costituiscono i dati di input per la costruzione del Discrete Fracture Network (DFN), per la definizione dei parametri petrofisici del volume fratturato, principalmente la porosità per fratturazione e la permeabilità. Quest'ultimo modello rappresenta la distribuzione della permeabilità secondaria della porzione di formazione analizzata e fornisce un valore medio della permeabilità dovuta alla fratturazione.



**Figura 1– Ubicazione della Miniera di Nuraxi Figus.**





## 2.2 Osservazioni in galleria

In base alle osservazioni condotte nella galleria, i principali sistemi di faglie presenti sono distinguibili in due tipi: faglie ad alto angolo in sistemi coniugati e faglie normali a basso angolo. In generale la deformazione è fragile, con lo sviluppo di discontinuità che coprono tutte le scale di osservazione; tuttavia sono molto abbondanti le vene, anche queste distinguibili in due principali famiglie: le vene associate ai piani di faglia misurati e le vene suborizzontali, parallele alla stratificazione. Qui di seguito saranno descritti i diversi sistemi elencati.

I sistemi di faglie ad alto angolo sono due: il primo è costituito da un sistema trascorrente formato da piani coniugati rispettivamente a direzione media  $230^\circ$  (che comprende piani immergenti a NW e SE) e  $150^\circ$  (con piani sia a NE e SW). Di queste due famiglie, che hanno pendenze medie di  $80^\circ$ , il gruppo di piani a direzione  $230^\circ$  (corrispondenti ad un valore medio di immersione verso  $320^\circ$ ) è senza dubbio il più abbondante e presente in tutte le scanlines misurate. Il gruppo di piani coniugati, anch'esso sempre presente, è rappresentato da un numero di piani minore. La cinematica trascorrente è stata definita grazie all'osservazione di strie orizzontali sia in roccia che come fibre di calcite su piani di faglia con le orientazioni indicate (Fig. 3).



**Figura 3 – Nelle due foto sono rappresentate le strie in roccia (a sinistra) e con fibre di calcite (a destra) presenti sulle superfici di faglia appartenenti al sistema coniugato trascorrente  $250^\circ/150^\circ$  (la freccia rossa rappresenta la direzione di immersione del piano; la fascia bianca corrisponde allo scalino normale alla fibra di calcite).**

In alcuni casi sono inoltre presenti piani di Riedel associati al piano principale che permettono di definirne anche la cinematica; i piani a direzione  $230^\circ$  sono prevalentemente sinistri, mentre quelli a direzione  $150^\circ$  sono destri (Fig. 3).

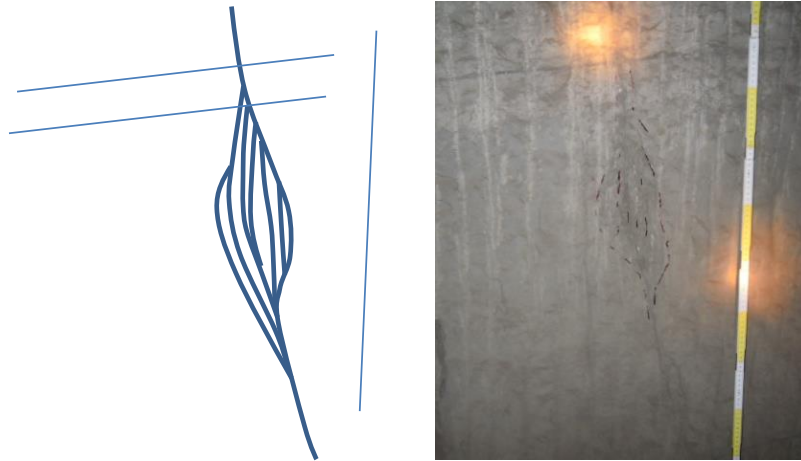
Il secondo sistema di faglie ad alto angolo comprende piani con direzioni comprese tra  $80-130^\circ$  (immersioni da  $340^\circ$  a  $50^\circ$ ) molto dispersi, anche questi con evidenza di strie trascorrenti. Questi piani, in prevalenza rispetto al sistema precedente sono spesso associati a vene riempite con piccoli cristalli di calcite in struttura caotica. La presenza di vene parallele al piano di faglia indica movimenti di apertura o di taglio multipli lungo lo stesso piano, riutilizzato in quanto sede di debolezza (Fig. 4).



**Figura 4 – Faglia subverticale, ondulata con rigetto normale in alto e inverso in basso. Questa geometria è tipica delle faglie trascorrenti.**

Nella parte centrale della galleria le faglie appartenenti a questi due sistemi presentano anche dei piccoli rigetti normali e/o inversi, dell'ordine di pochi cm (max 10-15). In alcuni casi i piani presentano delle ondulazioni, anche queste tipiche delle faglie con movimenti orizzontali (Fig. 4). Un altro elemento che può essere interpretato come legato ad uno shear orizzontale è la presenza, lungo la traccia del piano di faglia, di lenti di roccia, più o meno spesse costituite da piani di taglio che si diramano dal piano principale e poi si ricongiungono allo stesso piano più in basso o più in alto (Fig. 5). Queste zone, che ricordano la geometria della strutture a fiore, costituiscono zone di debolezza spesso sede di piani beanti e di cavità. Nella parte centrale della galleria, che corrisponde anche alla parte centrale della formazione, sono presenti abbondanti cavità carsiche, in parte ricoperte di cristalli di calcite di dimensioni dell'ordine del cm, che sembrano coincidere con zone caratterizzate da questo tipo di strutture.





**Figura 5– Schema interpretativo e foto delle zone fratturate associate alla strutture ad alto angolo.**

Sempre ad alto angolo, soprattutto nella parte bassa della formazione sono presenti faglie beanti con riempimenti di conglomerati e breccie. La composizione di questo materiale, che è stato analizzato dai geologi della miniera e considerato un riempimento caotico, e costituito da frammenti di calcari, calcareniti e pezzi di carbone (Fig. 6).



**Figura 6 – Piano di faglia e riempimento caotico. Lo spessore del riempimento raggiunge i 50 cm. Le parti nere sono pezzi di carbone.**

Il sistema a “basso angolo”, con pendenze comprese tra i 70 e 60° comprende faglie normali, con riempimento cataclastico con granulometria sabbiosa. Queste faglie sono coniugate e in alcuni casi si osservano variazioni di spessore che suggeriscono che queste faglie siano sinsedimentarie (Fig. 7).



**Figura 7– Sistema di faglie a basso angolo. Notare la variazione di spessore tra il tetto e il letto delle faglie.**

Infine, per quanto riguarda le vene si riconoscono diversi sistemi. Per le vene ad alto angolo queste presentano le stesse direzioni dei sistemi di faglie descritti e spesso si sviluppano parallelamente al piano stesso, a testimonianza di episodi multipli di apertura delle vene e di riattivazione dello stesso piano. In alcuni casi è possibile osservare un riempimento perpendicolare al piano della vena, ad indicare un processo di estensione, in altri casi il riempimento è caotico e non fornisce indicazioni sulla cinematica della riapertura stessa. Indica tuttavia la presenza di fluidi in pressione piuttosto alta, che raggiungo la vena in modo improvviso; questo processo favorisce una cristallizzazione con cristalli piccoli e caotici.

Le vene sub-orizzontali sono presenti nella porzione più profonda della Formazione del Miliolitico. I cristalli che le riempiono sono subverticali e in alcuni casi, la parte interna della vena è beante. Questo suggerisce un processo di tipo carsico per la formazioni di queste strutture con apertura, erosione e successiva rideposizione dei cristalli. In altri casi le vene sono chiaramente vene di estensione parallele agli strati con cristalli in crescita sintassiale (dai muri della vena verso il centro) multipla (Fig. 8).



**Figura 8– Vene parallele alla stratificazione. La vena in alto presenta una zona beante al suo interno suggerenti una genesi paleocarsica. La vena in basso presenta un accrescimento subverticale e multiplo.**

### 2.3 Analisi della fratturazione

Come per l'analisi dei dati superficiali, anche i dati misurati nella miniera forniranno una serie di parametri numerici statistici utili alla ricostruzione del network di fratture che caratterizza la Formazione del Miliolitico.

I dati raccolti sono stati rielaborati per ottenere i parametri statistici rappresentativi del sistema di fratture analizzato, e che saranno utilizzati per generare il Discrete Fracture Network (DFN) all'interno del volume di roccia considerato. La rielaborazione e quindi la generazione del DFN è stata eseguita mediante l'utilizzo di software dedicati, con licenze accademiche. Nel caso in esame è stato utilizzato il software Move, Midland Valley, che permette di elaborare i dati di fratturazione e poi di ricavare i suddetti parametri. Il volume utilizzato nel caso della miniera corrisponde al volume della galleria stessa. Questo ha il vantaggio di poter utilizzare i dati ottenuti senza doverli scalare per la distribuzione nel reservoir.

Tali operazioni si sviluppano utilizzando un dedicato modulo del programma, chiamato Fracture Modelling, che contiene un workflow di modellazione automatizzato e consente la caratterizzazione della rete di fratture.

La prima fase di rielaborazione dei dati consiste nella definizione dei set di fratturazione e la spaziatura caratteristica per ciascuno. Come indicato nella introduzione, alcuni parametri saranno ricavati principalmente delle scanlines a 10 m, mentre per le lunghezze del network di faglie verranno utilizzati quelle a 30 m.

Per ogni set sarà applicata la correzione di Terzaghi, per ottenere una riduzione dell'errore, dovuta alla differente orientazione delle fratture rispetto a quella della scanline. Infatti, se da una parte diverse orientazioni indicano una popolazione di misure rappresentativa delle differenti orientazioni presenti nella zona, il rilievo in una sola direzione potrebbe non rappresentare la densità di fratturazione corretta per ogni set di fratture riconosciuto. Il rapporto tra questi due parametri, la spaziatura reale e il numero di fratture misurate per ogni set, è funzione dell'angolo di intersezione tra la direzione della scanline e la direzione del set di fratture in esame (Terzaghi, 1965). Più è piccolo questo angolo, più la spaziatura misurata si avvicina al valore reale. Per ottenere questa correzione, il programma Move attribuisce un "peso" ad ogni frattura misurata rispetto alla direzione della scanline. Questa operazione è rappresentata di seguito per tutti i set di fratture definiti. Questi nuovi valori sono quindi utilizzati per ricalcolare il Mean Resultant Orientation (Spherical Mean) e il valore di k (distribuzione di Fisher) parametri che saranno utilizzati per la costruzione del DFN.

### 2.4 Densità di fratturazione, spacing delle faglie e saturazione.

La spaziatura e la densità di fratturazione sono calcolate per ogni set di fratture considerati. I Set di fratture, ottenuti dopo la correzione di Terzaghi, sono riportati per ogni scanline nell'allegato due, dove sono indicate anche la frequenza per ogni set. Nella tabella 1 sono invece riportate i valori medi per ogni scanline.

Per le scanline a 10 metri, i valori della spaziatura sono piuttosto alti (12 e 16 cm). Questo è probabilmente da considerare in relazione con la maggiore pressione di confinamento che favorisce la localizzazione della deformazione, per cui in profondità si sviluppa un numero minore di piani a parità di stress applicato. Questo è confermato dal valore della saturazione, anche questo alto. Un valore alto di saturazione corrisponde a un sistema poco sviluppato, dove cioè la spaziatura è disomogenea (Tab. 2).

**Tabella 1– Valori di spaziatura, connettività e saturazione per ogni scanline. Sono inoltre calcolati i valori medi dello spessore della damage zone lungo le faglie considerate.**

Scanline	Spaziatura (cm)	Saturazione
Scanline 1 (10m)	12,96025641	1,4
Scanline 2 (30m)	152,3684211	0,7

Scanline 3 (30m)	102,8571429	0,81
Scanline 4 (30m)	98,46153846	0,6
Scanline 5 (30m)	154,7619048	0,8
Scanline 6 (30m)	155,5555556	0,86
Scanline 7 (30m)	232,1428571	0,82
Scanline 8 (10m)	16,17647059	0,85

Per quanto riguarda le scanlines a 30 m, che rappresentano la densità delle faglie che raggiungono e tagliano la sezione della galleria, vediamo che i valori di spaziatura sono confrontabili tra una scanline e l'altra. Tenendo conto del fatto che le misure sono state fatte in continuità lungo la galleria, questo significa che la spaziatura mantiene un valore medio costante per un tratto di circa 150 metri. Per la scanline n. 7 invece siamo nella parte bassa della formazione e qui la spaziatura aumenta, in accordo con quanto osservato a scala minore. Tuttavia dai dati della saturazione che sono vicino all'unità, si evince che il sistema mantiene una certa disomogeneità nei valori di spaziatura. Infatti i piani di faglia osservati erano distribuiti in piccoli gruppi separati da zone pressoché indeformate. Inoltre spesso i sistemi di fratture e di faglie si intersecavano tra di loro, come risulta dalla osservazione delle terminazioni delle tracce delle fratture e dal riconoscimento di sistemi coniugati di faglie.

**Tabella 2– Classificazione della maturità dei set di fratturazione (Wu&Pollard, 1995)**

Classificazione delle fratture (da Wu & Pollard, 1995)	
Grado di saturazione	Descrizione qualitativa della distribuzione delle fratture
>0,70	Poco sviluppato
0,60-0,70	Da poco a intermedio
0,50-0,60	Intermedio
0,40-0,50	Da intermedia a ben sviluppato
<0,40	Ben sviluppato

## 2.5 Connettività e apertura

Nella definizione di un sistema di fratture e di faglie un altro elemento molto importante è dato dalla connettività e dalla presenza di fratturazione diffusa vicino alla zona di faglia.

La connettività misurata come il rapporto tra il numero di terminazioni in un'altra frattura o nella stratificazione in rapporto con il numero totale di terminazioni misurate è un valore medio per la scanline1, mentre è molto alto per la scanline 8. Per le altre questo valore non è stato calcolato per ogni scanline. Tuttavia l'intersezione con le altre faglie è stata annotata nelle note, presenti nell'Allegato 2. Si nota che il numero di faglie che si intersecano tra loro varia da una porzione all'altra della galleria analizzata, che attraversando tutta la formazione del Miliolitico, permette una distinzione in zone a maggiore o minore connettività. Inoltre, nelle scanline a 30 metri è stato misurato lo spessore della zona fratturata associata alla faglia. I valori di connettività e i valori medi delle zona fratturata sono riportati nella tabella 3. Questo valore, che è molto variabile, permette però di valutare il potenziale di connettività delle faglie considerate.

**Tabella 3 – valori di connettività e spessore medio della zona fratturata.**

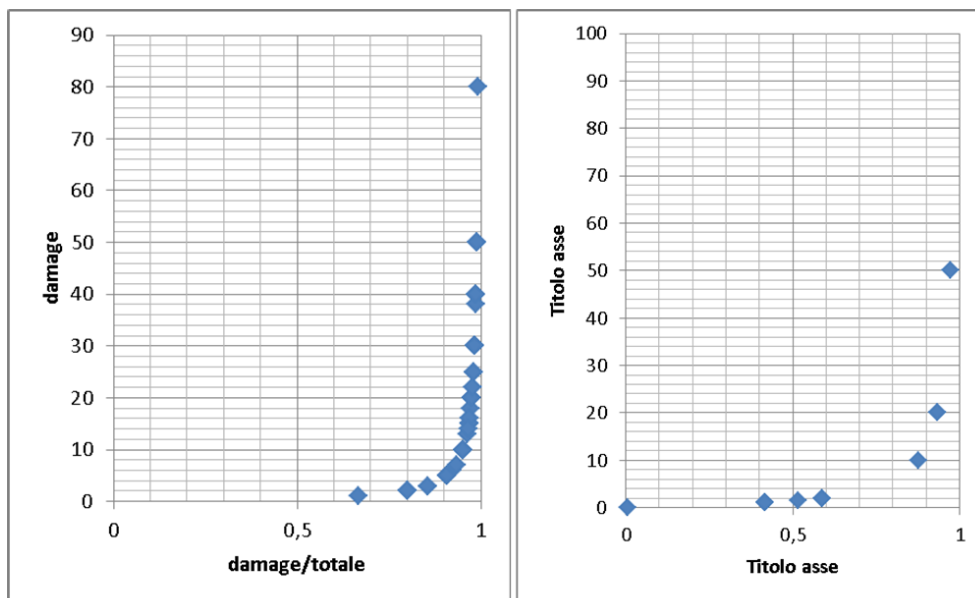
Scanline	Connettività	Spessore media d
Scanline 1 (10m)	53%	
Scanline 2 (30m)	-	17,7
Scanline 3 (30m)		22,85185185
Scanline 4 (30m)		20,44444444



Scanline 5 (30m)		11,59090909
Scanline 6 (30m)		12
Scanline 7 (30m)		7,567037037
Scanline 8 (10m)	85%	

## 2.6 Architettura della zona di faglia

Per le scanline a 30 metri è stata eseguita una valutazione del valore F (sensu Caine et al., 1996), cioè il rapporto tra lo spessore della zona fratturata e il core della faglia. Questo parametro permette di valutare in termini qualitativi, il comportamento idraulico della struttura in esame. Questo valore si basa sul rapporto tra la porzione impermeabile e quella permeabile della faglia stessa e fornisce una prima definizione di questi due valori, che vanno accompagnati da analisi della permeabilità dei core delle faglie in laboratorio e dalla definizione del network di fratture alla scala della singola faglia. Le faglie considerate sono tutte quelle individuate nelle scanline a 30 metri, e sono escluse le strutture considerate sinsedimentarie descritte in precedenza.



**Figura 9 – Rapporto tra lo spessore delle damage misurate e il valore medio dell’apertura ricavato dalla scanline 1. I valori vicini all’unità indicano alta permeabilità. Porzione superiore a sinistra, porzione più profonda a destra.**

Per il core delle faglie sono stati utilizzati i valori di apertura medi delle scanline a 10 metri, e sono stati ricavati due grafici, uno per la porzione superiore, l’altra per quella più profonda (Fig. 9). Dal grafico si osserva come le strutture più permeabili sono localizzate nella parte più superiore della formazione, mentre in quella più profonda hanno un comportamento sia di condotto che di barriera. Questo coincide con l’osservazione che le vene parallele ai piani principali aumentano verso la parte basale, e presentano episodi multipli di riempimento (quindi di apertura – deposizione e chiusura). Questo dato potrebbe avere importanza nella modella zone dinamica, in quanto queste strutture rappresentano delle vie di debolezza meccanica della roccia, oltre che una via preferenziale di migrazione dei fluidi.

Va inoltre ricordato che in alcuni casi, le faglie osservate presentano ancora oggi evidenze di percolazione di acqua, nonostante questo lavoro sia stato eseguito alla fine della stagione secca e molti piani presentano aperture beanti di diversi cm (Fig. 10). Queste due evidenze suggeriscono una buona circolazione di fluidi all’interno della formazione in esame.





Figura 10 – Faglia subverticale con apertura di circa 5 cm.

## 2.7 Costruzione del DFN

Utilizzando i dati descritti nei precedenti paragrafi, sono stati ricostruiti dei DFN, cioè dei modelli tridimensionali rappresentativi delle fratture e faglie misurate. Questo lavoro è stato svolto utilizzando il software Move 2015, con licenza accademica.

Per costruire questi modelli è necessario fornire alcuni dati di input, che consistono in parametri statistici rappresentativi della popolazione di faglie e fratture misurate, che andranno a popolare un volume 3D rappresentativo del modello geologico considerato o della porzione rocciosa misurata. Nel caso della miniera, si è scelto di rappresentare il network di fratture riproducendo il volume mancante della galleria. In questo modo non è stato necessario scalare i parametri statistici misurati in quanto il volume considerato è alla stessa scala della componente della fratturazione osservata direttamente.

Nell'Allegato 3 sono riportati i parametri di input e di output prodotti dal software che saranno discussi qui di seguito.

Sono stati eseguiti 7 DFN, 6 per la galleria di afflusso, dove sono state misurate le scanline 1-6, e 1 per la galleria di riflusso, dove sono state misurate le scanline 7 e 8. Per ogni galleria sono stati costruiti due DFN, a copertura di due scale differenti; una dal mm al metro e l'altra dal metro alle decina di metri e sono stati poi rappresentati insieme.

Le dimensioni del modello sono riportate nella tabella 4.

Tabella 4– Dimensioni dei volumi considerati e delle celle di calcolo

Galleria	Lunghezza	Larghezza	Altezza	Dim. celle
Afflusso	130 m	10 m	5 m	1mx1mx2,5m (h)
Riflusso	70 m	10 m	5 m	1mx1mx2,5m (h)

Per una migliore definizione dei DFN considerati, in una prima fase è stato costruito un modello sulla base della scanline 1, considerando 6 set. I parametri utilizzati e i risultati sono riportati nell'allegato 3 e nella tabella 5.

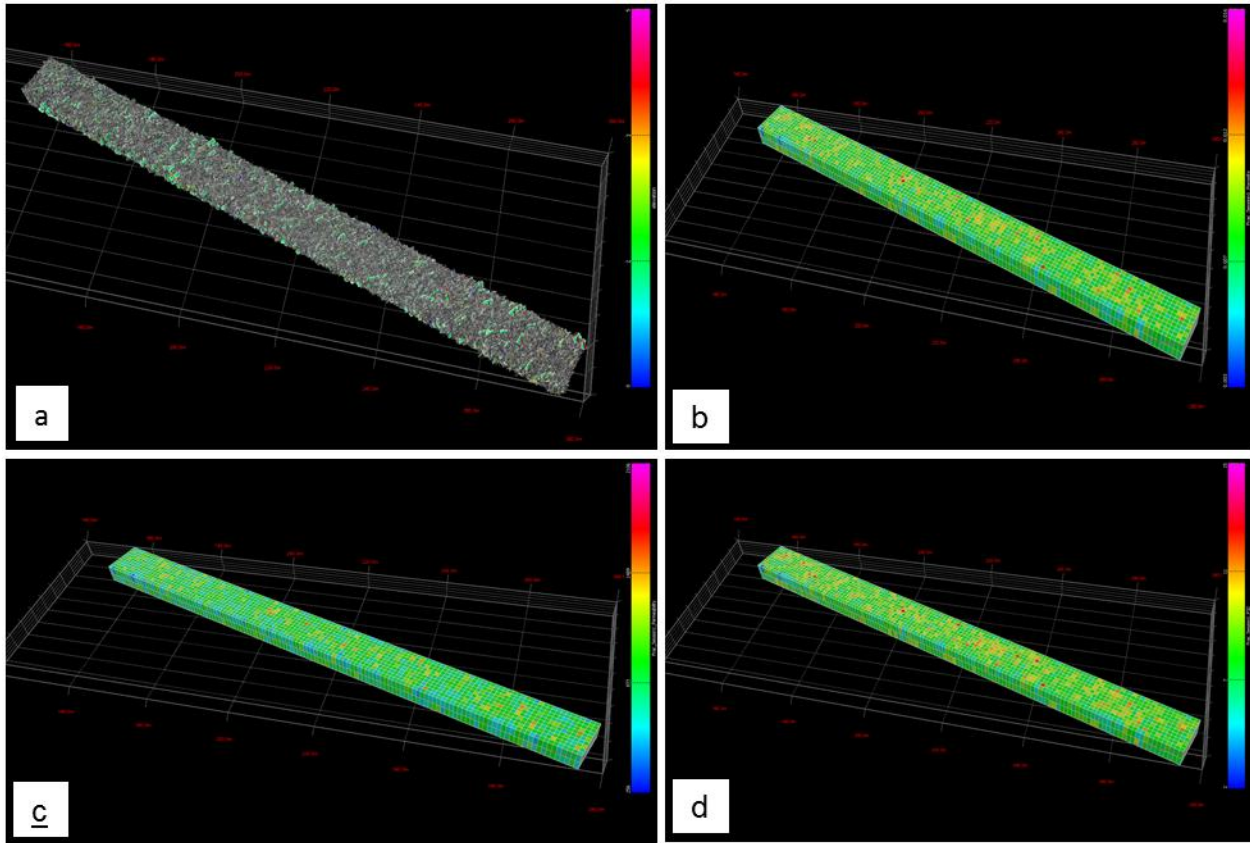
**Tabella 5 – Risultati riassuntivi dei DFN generati**

Tabella riassuntiva dei valori medi per ogni DFN costruito								
DFN	Porosity min/max	Permeability (D) min/max	Total Fracture area m <sup>2</sup>	Total Fracture Volume m <sup>3</sup>	Total Model Volume m <sup>3</sup>	Average Fracture Porosity	Average Aperture (m)	Average DFN P32 (1/m)
DFN 1 – (SL1) L= cm - 5 m	0.00252555 /0.016378	256.1/210 5.94	54338,1	57,325	6500.05	0,00881917	0,00105497	8,35963
DFN2 (SL1) L=cm-2m	0.00597542 /0.0107376	626.853/1 279.11	50923.9	53.803	6500,05	0,00827732	0,00105654	7,83439
DFN3 (SL1) L=cm-2m	0.00377605 0.0143483	452.711/1 717.7	51972.7	54.9183	6500.05	0.0084489	0.00105668	7.99574
DFN4(SL2-6) L= 0,5-10	0/0.14643	0/1.82393 e+07	4773.51	119.352	6500.05	0.0183618	0.0250031	0.734381
DFN5 (SI 2-6) L= 1-10	0/0.211905	0/0.72851 e+07	4535.64	123.596	6500.05	0.0190146	0.0272499	0.697786
DFN6 (SI 2-6) L= 2-10	0/0.208725	0/3.41017 e+07	3833.17	111.466	6500.05	0.0171485	0.0290793	0,589713
DFN 7 (SL 8)	0.00306745/ 0.0150134	338.388 1820.52	23527.6	28.0151	3499.99	0.0080043 5	0.00119073	6.7222

In questo primo caso le fratture considerate rappresentano tutte le fratture misurate nella scanline 1, lunga 10 metri. Tuttavia le osservazioni nella galleria suggeriscono la presenza di due popolazioni: quella delle fratture di dimensioni minori e quelle, importanti, in quanto con evidenze di percolazione e di carattere di conduit, con una frequenza diversa, messa in evidenza dalle scanline a 30 metri (vedi Fig. 10). Sono stati quindi sviluppati altri DFN per evidenziare il carattere di questa prima popolazione regolando la distribuzione delle lunghezze e cercando di mantenere come rappresentativi alcuni valori di output, come il P32. I DFN più rappresentativi per ogni popolazione considerata saranno poi combinati insieme per ottenere il modello finale. A questo fine il modello è stato modificato, riducendo il valore della lunghezza massima delle fratture ad 1 metro (DFN 2).

Per poter valutare meglio l'influenza della apertura e della lunghezza delle fratture, sempre per questi valori di input è stata ulteriormente ridotta la lunghezza, creando un secondo DFN, in cui i set di fratture sono 5, dai quali sono stati ricavati spaziatura (P32) e orientazione media (MRO e K di Fisher). Per i valori di apertura sono stati utilizzati di nuovo i valori medi misurati sulla scan line 1, divisi per ciascun set (escludendo le faglie e le vene) ed il valore è stato mantenuto costante per ciascun set. Per le lunghezze, invece, è stato utilizzato il range 1 cm – 2 m, quindi aumentato rispetto al precedente (DFN3, Allegato 3, Fig. 11).

Le altre scanlines, dalla 2 alle 6 sono state usate per costruire i DFN relativi alle faglie e fratture con una frequenza maggiore, e che presumibilmente hanno anche lunghezze maggiori, al di fuori della scala di osservazione della galleria. In questo modo sono stati costruiti i DFN 4, 5 e 6. Per questi DFN, i set considerati sono 6 e l'apertura viene distribuita in funzione della lunghezza; la distribuzione dei valori delle lunghezze considerata ha 10 m come valore massimo, e, rispettivamente 0,5m, 1m e 2m come valore minimo. I principali parametri calcolati dal software sono riportati in tabella 5, le immagini del DFN, considerato il più rappresentativo sono riportate in Fig. 12.



**Figura 11– DFN 3. A) rappresentazione delle fratture generate; b) distribuzione della porosità; c) distribuzione della permeabilità; d) distribuzione della densità di fratturazione (P32).**

Per la parte basale della formazione, osservata nella galleria di riflusso, a partire dalla base, in contatto con i terreni paleozoici, è stato costruito un DFN rappresentativo della popolazione di fratture più piccole, mentre per le più lunghe si è ritenuto considerare rappresentativi i modelli 4, 5 e 6, avendo praticamente gli stessi parametri di input ricavabili dalla scanline 7. Per il DFN7 è stata quindi utilizzata la scan line 8, e sono stati riconosciuti 3 set di fratture. Le lunghezze delle fratture vanno da 1 cm a 5 m, mentre per le aperture sono stati considerati dei valori costanti (corrispondenti ai valori medi) per ciascun set. In Fig. 13 sono riportate le immagini relative a questo modello.

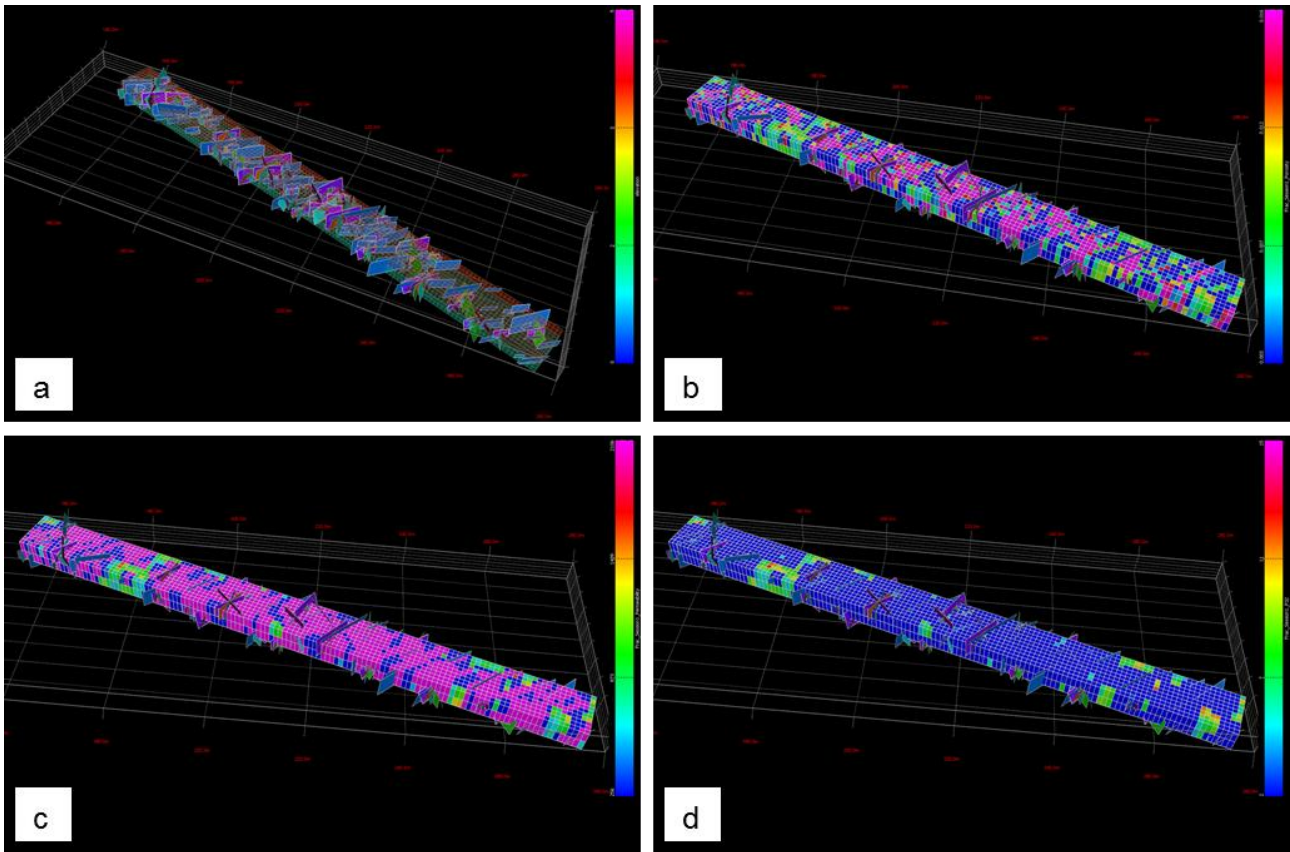


Figura 12 - DFN 6. A) rappresentazione delle fratture generate; b) distribuzione della porosità; c) distribuzione della permeabilità; d) distribuzione della densità di fratturazione (P32)

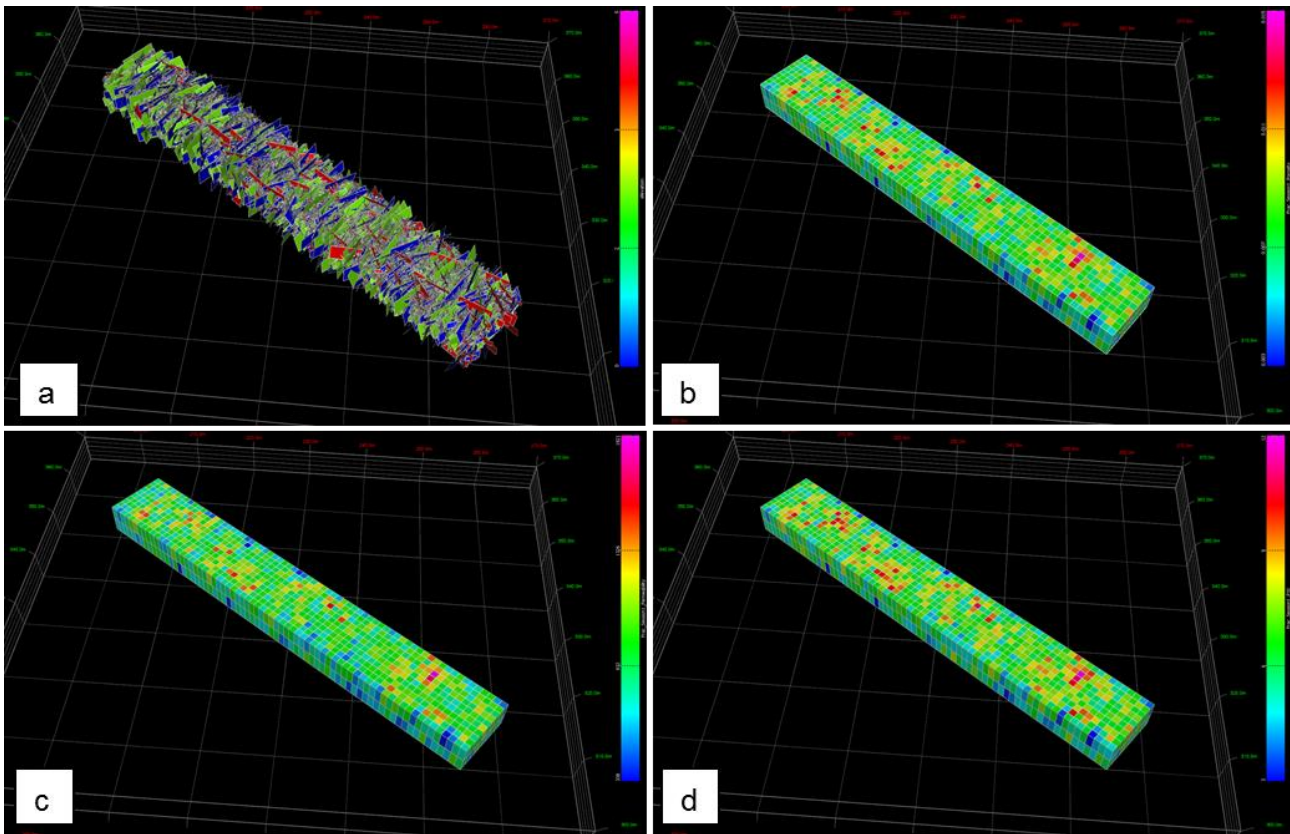


Figura 13 - DFN 6. A) rappresentazione delle fratture generate; b) distribuzione della porosità; c) distribuzione della permeabilità; d) distribuzione della densità di fratturazione (P32)



## 2.8 Calcolo della permeabilità per fratturazione

Il modulo “Fracture Modelling” di Move genera un DFN basato su un volume considerato basandosi su alcuni dati di input che sono: lunghezza, orientazione, aperture, forma della fratture, intensità (P32) e distribuzione spaziale. Una volta create le fratture il software procede al calcolo della permeabilità, producendo un tensore basato sulla metodologia geometrica discussa in Oda, 1985, che a sua volta è basato sulla legge di Darcy e considera un flusso laminare attraverso pareti della frattura perfettamente piane e parallele:

$$Q = \frac{A s^3}{12D} \cdot \frac{\partial h}{\partial l} \cdot \frac{\rho g}{\mu}$$

Il calcolo della permeabilità è quindi condotto in due fasi:

- 1- Le fratture sono tagliate lungo i bordi di ogni cella generate nel volume, in modo che solo il poligono corrispondente a questa porzione della frattura sarà considerato;
- 2- Tutti i contributi delle superfici delle fratture presenti sono sommate insieme usando le equazioni in Oda, 1985. Quindi i parametri principali, oltre all'estensione sono l'apertura e l'orientazione; soprattutto l'apertura, essendo la permeabilità proporzionale al cubo di questo valore nella legge di Darcy.

Il tensore finale è espresso nelle diverse componenti rispetto al volume considerato usando gli assi XYZ, più un valore assoluto, corrispondente ad un valore massimo. Tutti i valori sono espressi in mD.

## 2.9 Confronto con i dati di superficie

Una degli obiettivi di questo lavoro è la comparazione tra i parametri della fratturazione osservati in superficie e quelli provenienti dalla stessa formazione con un carico litostatico di circa 500 m. Le eventuali differenze o corrispondenze sono importanti per valutare il ruolo della pressione di confinamento e il carico litostatico nello sviluppo della fratturazione di origini tettonica, tenendo conto del fatto che le osservazioni in miniera sono le uniche osservazioni dirette possibili, essendo le sole altre costituite dall'analisi delle carote di pozzo.

Il primo parametro considerato in questa comparazione è costituito dalle principali orientazioni dei principali set di fratture e di faglie misurate. In generale possiamo dire che, sebbene tutte le orientazioni osservate in superficie sono presenti anche in profondità, non c'è una corrispondenza tra le densità delle singole orientazioni. Ad esempio, i sistemi N-S e NW-SE bene evidenti in superficie sono minoritari nelle scanline in miniera, mentre l'opposto accade per il sistema NE-SW e EW più evidenti in miniera rispetto alla superficie. Questo potrebbe essere dovuto a fattori locali di distribuzione della deformazione, anche legati alla presenza di faglie di portata regionale che attraversano la galleria dove sono state eseguite le misure, mentre i dati di superficie provengono da differenti località di affioramenti anche lontani tra loro.

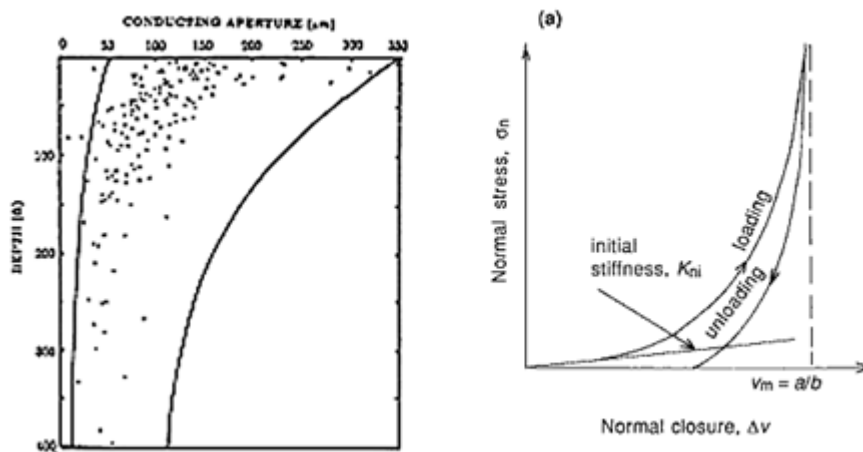
Per quanto riguarda la densità di fratturazione abbiamo già indicato come questa è nettamente più bassa in profondità. I valori di spaziatura, in media minori di 10 cm in superficie sono qui invece sempre superiori. Questa differenza può essere considerata reale nonostante fosse presente una certa difficoltà nell'osservazione diretta delle fratture più piccole in galleria (dovuta alla bassa visibilità). Infatti i valori osservati si mantengono costanti, anche se raccolti da diversi operatori e la loro regolarità è confermata dai valori di saturazione che sono comparabili tra una scanline e l'altra. Nell'insieme i dati sono quindi coerenti e questo rende i valori misurati attendibili. Inoltre, mentre nelle scanline a 10m abbiamo una spaziatura meno regolare per la scala di osservazione compresa tra i mm e i metri, in quelle più lunghe a 30 m abbiamo una distribuzione molto regolare delle piccole faglie (con rigetti di pochi cm), che è da considerare molto importante per il controllo della circolazione dei fluidi. Alcune di queste strutture infatti presentano ancora oggi evidenza di percolazione di acque ed hanno porzioni beanti osservabili direttamente (vedi Fig.



10). Questa differenza è stata utilizzata nella generazione dei DFN per ottenere un modello rappresentativo.

I valori di connettività invece sono confrontabili, così come, inaspettatamente, i valori di apertura. Quest'ultima osservazione è piuttosto importante, in quanto un elemento a sfavore della comparazione tra i dati superficiali e quelli profondi è appunto l'incertezza della loro rappresentatività. Nel caso studiato, le osservazioni confermano la presenza di una deformazione marcatamente fragile (dominata cioè dalla presenza di discontinuità), dove i principali parametri che controllano la permeabilità per fratturazione sono legati alle caratteristiche geometriche delle faglie e delle fratture stesse. In particolare due di questi che sono la lunghezza delle fratture (intesa come la lunghezza della traccia della frattura sull'affioramento) e l'apertura sono valori comparabili con quelli trovati in superficie.

La variazione dell'apertura con la profondità è una relazione relativamente poco studiata. Questo è dovuto al fatto che sono poche le osservazioni dirette disponibili per la definizione di una relazione sperimentale. Quindi le relazioni esistenti sono solo matematiche e basate su relazioni di forze (relazione tra pressione di confinamento, resistenza al taglio e stress effettivo). Nella figura 13 sono riportati dei dati sperimentali (da Snow, 1968) e i trend di riduzione calcolati sulla base di un valore di apertura iniziale, della resistenza al taglio e il valore di rugosità di una popolazione di fratture. E' evidente come il dato sperimentale sia più rappresentativo di quello calcolato e che una percentuale di fratture (quelle con le aperture minori mantenga gli stessi valori in profondità). Anche la relazione proposta da Bandis *et al.* (1983, 1985) and Barton *et al.* (1995) si basa sulla relazione tra la forza applicata normale al piano della discontinuità e l'apertura iniziale, introducendo delle costanti legate alle caratteristiche delle rocce, e ammettendo la possibilità di una chiusura parziale (Fig. 14).



**Figura 14 – Sinistra: Valori di apertura misurati (puntini neri) in diversi siti di costruzione di dighe negli USA, e calcolati (linee continue) da un lavoro di Snow, 1968. Notare la bassa rappresentatività dell'equazione rispetto ai valori sperimentali. Asse orizzontale: conducting aperture in micron (valore iniziale misurato); asse verticale: depth profondità. Destra: il modello Barton-Bandis che rappresenta la relazione tra apertura e pressione applicata, entrambe normali al piano considerato.**

Di conseguenza, possiamo considerare i valori misurati come la massima apertura raggiunta in assenza di una pressione di confinamento applicata in modo persistente, o, meglio, l'indicazione del massimo valore raggiungibile se sottoposto ad un campo di stress comparabile a quello assente (cioè la pressione di confinamento stessa). Questa comparazione andrebbe applicata nei dati di input del modello dinamico, in quanto lo stesso effetto (l'apertura delle fratture nell'ordine dei valori osservati) si può ottenere in profondità dall'azione di un altro campo di stress applicato. Nel caso di iniezione di fluidi si verrebbe a creare un campo di pressioni indotte che possono influire sullo stato di apertura e chiusura delle fratture e sulla potenziale permeabilità per fratturazione del sistema. In questo lavoro invece per quanto riguarda la permeabilità, il software utilizzato costruisce un valore di permeabilità "geometrica" definita da un vettore nelle diverse direzioni. Come spiegato nel paragrafo 9, questa è basata sulla legge di Darcy e prevede il passaggio di un fluido ideale attraverso due superfici piane corrispondenti ai muri della frattura. Nella Tabella 6 sono riportati dei valori medi indicativi di permeabilità per le principali rocce porose e per tipi di

rocce serbatoio. Dal confronto con i dati ottenuti, si può osservare come i valori siano compatibili con quelli noti in letteratura per i reservoir carbonatici fratturati (Tab. 6).

**Tabella 6 - Valori indicativi della permeabilità per diversi tipi di rocce (Bear, 1972).**

Permeability	Pervious				Semi-Pervious					Impervious			
	Unconsolidated Sand & Gravel	Well Sorted Gravel		Well Sorted Sand or Sand & Gravel		Very Fine Sand, Silt, Loess, Loam							
Unconsolidated Clay & Organic					Peat		Layered Clay			Unweathered Clay			
Consolidated Rocks	Highly Fractured Rocks				Oil Reservoir Rocks			Fresh Sandstone		Fresh Limestone, Dolomite		Fresh Granite	
$\kappa$ (cm <sup>2</sup> )	0.001	0.0001	10 <sup>-5</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-10</sup>	10 <sup>-11</sup>	10 <sup>-12</sup>	10 <sup>-13</sup>	10 <sup>-14</sup>	10 <sup>-15</sup>
$\kappa$ (millidarcy)	10 <sup>+8</sup>	10 <sup>+7</sup>	10 <sup>+6</sup>	10 <sup>+5</sup>	10,000	1,000	100	10	1	0.1	0.01	0.001	0.0001

## Riferimenti bibliografici

- Bandis, S. C., Barton, N. R. and Christianson, M. (1985) Application of a new numerical model of joint behaviour to rock mechanics problems. Proc. Int. Symp. Fundamentals of Rock Joints, Bjorkliden (ed. O. Stephansson), 345–55.
- Bandis, S. C., Lumsden, A. C. and Barton, N. R. (1983) Fundamentals of rock joint deformation. Int J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 20(6): 249–68.
- Barton, N. (1995) The influence of joint properties in modelling jointed rock masses. Proc. 8th Congr., Int. Soc. Rock Mech., Tokyo (ed. T. Fuji), 3: 1023–32. A. A. Balkema: Rotterdam.
- Bear, J., 1972. Dynamics of Fluids in Porous Media, American Elsevier Publishing.
- Caine, J.S., Evans, J.P., Forster, C.B., 1996. Fault zone architecture and permeability structure. Geology 24, 1025±1028.
- Oda, M., 1985. Permeability tensor for discontinuous rock masses, Geotechnique, 35(4), 483-495.
- Wu, H., D.D. Pollard An experimental study of the relationship between joint spacing and layer thickness. J Struct Geol, 17 (1995), pp. 887–905

## Allegato 1

Tabelle riassuntive ei dati raccolti

Scanline n. 1- galleria di afflusso GAP quota -367m dal livello del mare.										
N.	Distanza (cm)	Imm	Incl	Up	Up	D	D	A	Note	S e t
1	5,1	350	70	16	R	1	R	2		0
2	7,2	70	80	9	F	1	R	1		1
3	14	310	65	200	!	200	!	1,5	Vena, calcite	2
4	20	70	90	200	!	38	F	1		3
5	27	80	90	7	R	7	R	0,5		3
6	29	345	88	9	F	6,5	S	1		4
7	35	310	65	3	F	4	R	1,5		4
8	39	60	80	8	R	12,5	R	0,2		5
9	40	360	88	3,5	F	5,5	S	0,5		0
10	44	110	65	2	F	1	R	1		1
11	56	40	85	2	R	4,5	S	2		3
12	59	75	87	5	R	13	R	1,5		3
13	62	345	80	8	R	4	R	0,2		4
14	65	350	82	9	R	3	R	0,5		4
15	83	360	35	4	R	1	R	0,3		5
16	89	80	70	7	F	1	S	0,4		0
17	90	185						0,8	Stratificazione	1
18	94	65	85	3,5	R	2	R	0,5		1
19	95	10	60	2	R	1	R	1,5		3
20	100	250	65	2	R	3	R	0,6		3
21	106	350	75	13	F	1	R	0,5		4
22	116	25	85	4	S	1,5	R	0,1		5
23	128	280	75	3	S	1	S	1,5		5
24	122	155	80	3	R	1	S	0,2		0
25	137	305	80	60	S	34	R	2	Vena	0
26	142	280	50	1	R	2	R	0,3		1
27	158	330	70	10	R	5	F	0,7		3
28	165	320	75	7	S	3	R	1	Vena	3
29	187	130	40	7	F	1,5	R	1	Vena	4
30	190	290	85	7,5	R	8	R	0,2		5
31	193	325	80	7	S	1	R	1		5
32	189	343	80	6	R	4,5	R	0,5		0
33	216	320	55	11,5	R	2,5	R	1,5		0
34	235	280	75	16	S	3,5	R	0,6		1
35	270	65	70	4	F	3	R	0,5		3
36	289	45	75	10	R	2	R	0,1		3
37	312	238	75	23	S	17	S	2	Vena	4
38	329	55	87	30	R	35	F	1		5
39	340	243	87	5	S	10	S	0,5		5
40	376	290	87	70	S	100	S	5	Vena	0
41	384	270	88	60	R	14	R	0,5		1
42	393	327	80	200	F	140	!	30	Faglia spessa 25cm	1



43	399	315	88	27	F	60	F	5		3
44	410	255	75	8	F	30	F	1		3
45	412	270	78	4	F	30	F	0,5		4
46	421	238	80	70	F	1	F	1,5		5
47	418	275	88	8	R	10	R	0,6	Vena	5
48	420	264	65	3	R	10	R	0,5	Venuzza	0
49	430	254	85	24	F	40	F	0,1		1
50	455	310	68	32	R	8	S	1,5	Vena	1
51	456	336	78	33	R	30	F	0,2		3
52	520	318	74	450!		140!		25	Faglia principale beante discontinua	3
53	533	328	85	450!		140!		26	Faglia principale beante discontinua	4
54	525	330	75	450!		140!		27	Faglia principale beante discontinua	5
55	530	340	70	450!		140!		28	Faglia principale beante discontinua	5
56	535	170	85	450!		140!		29	Faglia principale beante discontinua	0
57	540	305	88	450!		140!		30	Faglia principale beante discontinua	1
58	585	115	84	25	F	100	F	1,5	Vena	1
59	664	237	72	47	R	1	R	1,5	Vena	3
60	640	95	76	13	S	8	S	3	Vena	4
61	646	73	85	12	R	1	R	3	Vena	5
62	680	243	88	1	R	140!	R	1	Vena	0
63	700	133	30	5	F	40	F	5	Vena curva	1
64	704	10	85	5	F	30	F	2	Vena	1
65	715	298	88	88	R	140!	R	0,3		3
66	719	120	88	14	F	60	F	0,7		4
67	723	110	78	4	R	18	R	1		5
68	727	100	82	6	R	40	R	1		0
69	740	63	80	8	S	10	S	1		1
70	750	296	65	450	R	24	R	0,5	20 cm sopra la fettuccia cambia in 64/85	1
71	783	288	75	18	S	8	F	1		4
72	825	40	65	10	S	1	R	1,5		4
73	836	64	80	10	S	1	R	0,2		5
74	877	300	62	9	S	1	R	0,5		0
75	888	284	50	78	R	140!		1	Vena	1
76	893	260	85	36	F	30	F	2	Vena curva	1
77	1000	110	65	5	R	5	R	1,5		4
78	1004	105	89	4	R	4	R	0,2		5
79	1016	50	85	200	S	80	R	0,5		0

<b>Scanline 2 - faglie con spessore della zona fratturata (a seguire dalla 1, lungo la stessa galleria)</b>						
n.	distanza (cm)	Dip azimuth	Dip	Spessore Damage zone (cm)	Note	set
1	65	300	80	10		0
2	155	295	70	6	Vene associate aperta più volte	0
3	210	328	85	3		0
4	440	40	65	20		0
5	440	30	70	3	Si interseca con la 4	0
6	560	345	82	20		0
7	670	326	75	1	Vena	0
8	720	322	88	20	Riempimento doppio cataclasite	0
9	740	310	85	16		0
10	860	140	88	30	Si dirama dalla successiva (11)	0
11	880	35	75	5	Interseca la 10	0
12	1270	324	75	20	Strie orizzontali (trascorrente)	0
13	1290	147	87	2	Vene a riempimento multiplo	0
14	1575	235	82	18		0
15	1830	324	80	25		0
16	2030	315	85	20		0
17	2300	323	78	40		0
18	2570	315	70	20		0
19	2760	325	85	25		0
20	2960	330	75	50		0

Scanline 3 - a seguire dalla 2, lungo la stessa galleria						
N	Distanza	Dip azimuth	Dip	Spessore dz (cm)	Note	Set
1	65	300	80	10		1
2	155	299	70	6	Vene associate, apertura multipla, 2 foto	1
3	210	328	85	3		1
4	440	40	65	20		1
5	440	30	70	3	Si interseca con la 4	1
6	560	345	82	20		1
7	670	326	75	1	Vena	1
8	720	322	88	20	Riempimento doppio cataclasite e cristalli	1
9	740	310	85	16		1
10	860	140	88	30	Si dirama dalla 11	1
11	880	35	75	5	Interseca la 10	1
12	1270	324	75	20	Strie orizzontali trascorrente	1
13	1290	147	87	2	Vene a riempimento multiplo	1
14	1575	235	82	18		1
15	1830	324	80	25		1
16	2030	315	85	20		1
17	2300	323	78	40		1
18	2570	315	70	20		1
19	2760	321	85	25		1
20	2960	330	75	50		1

Scanline 4 solo faglie - a seguire dalla precedente						
N	Distanza	Dip azimuth	Dip	Spessore (cm)	Note	Set
1	120	165	83	20	Riempimento cristallino	2
2	500	237	83	80		2
3	770	298	87	50		2
4	920	57	85	20		2
5	920	278	80	30		2
6	989	340	83	2	Sistema coniugato trascorrente con la successiva	2
7	1040	115	83	10	Circa 30 cm di zona di faglia	2
8	1190	330	87	40		2
9	1340	108	82	40		2
10	1300	80	60	20	Interseca la precedente	2
11	1360	336	80	50	Coniugate	2
12	1570	75	88		Spessore totale con la precedente calcite	2
13	1570	310	83	15	Coniugata con la successiva	2
14	1810	53	85	10	Strie calcite dip normali	2
15	1650	314	80	15	Tagliata dalla 14	2
16	1730	296	88	7	Finisce nella precedente	2
17	1800	315	87	15		2
18	2020	58	82	5	Piccola finisce in altra frattura	2
19	1900	320	86	13	Cristalli nn orientati, coniugata con la successiva	2
20	1920	322	86	15		2
21	2160	53	70			2
22	2120	330	80	30	Aperta	2
23	2350	140	88	15	Riedel a direzione 88/100	2
24	2490	324	75	20	Strie orizzontali con calcite non orientata nelle vene associate	2
25	2600	100	85	5		2
26	2650	135	85	10	Scalini calcite con fibre orizzontali e inclinati di 60°	2
27	2710	283	82	30		2
28	2910	300	75	30		2
29	3000	255	88	20		2

Affioramento successivo

<b>Poco più avanti, circa 5 m,</b>		
Struttura complessa (faglia sinsedimentaria?) basso angolo, riempimento con frammenti di carbone, e cataclasite della granulometria della sabbia, basso angolo con diramazioni e variazione dello spessore degli strati.		
110	25	
300	60	2,80 cm di apertura
263	79	
263	85	
146	73	Strie 160
4 m dall'ultima		
105	78	Altra faglia, 120 cm di apertura

<b>Scanline 5 – dalla precedente a seguire</b>						
N	Distanza	Dip azimuth	Dip	Spessore (cm)	Set	Note
1	0	82	68	6	3	Cristalli subverticali nelle vene orizzontali
2	500	65	80	50	3	Faglia con breccia, piano irregolare zona dolomitizzata alla base del miliolitico
3	700	76	70	50	3	
4	800	318	82	10	3	
5	900	312	83	10	3	
6	920	50	85	1	3	Tagliata dalla precedente
7	1040	287	60	10	3	Vena
8	1055	120	60	1	3	Vena
9	1450	294	85	10	3	
10	1640	300	88	10	3	Chiude-apre-chiude
11	1940	322	89	5	3	
12	2080	95	78	5	3	
13	2400	324	60	5	3	
14	2560	331	68	5	3	Cataclasite fine con vene associate coniugata alla successiva
15	2580	67	88	10	3	
16	2780	114	89	5	3	Faglia con rigetto verticale
17	2840	97	65	4	3	
18	3000	325	75	5	3	
19	3040	322	89	10	3	
20	3080	62	85	15	3	
21	3150	80	80	18	3	
22	3250	54	80	10	3	

<b>Scanline 6 – a seguire dalla precedente</b>						
N	Distanza	Dipazimuth	Dip	Spessore (cm)	Set	Note
1	300	55	80	5	4	Tagliata dalla successiva
2	380	302	89	20	4	0
3	385	313	89	5	4	
4	500	65	89	3	4	
5	420	327	85	10	4	
6	560	94	89	25	4	Ondulata con rigetto verticale di 12 cm
7	710	335	85	5	4	
8	1320	29	86	5	4	
9	1170	303	55	7	4	
10	1400	58	89	5	4	
11	1440	288	70	10	4	
12	1480	82	89	5	4	Rigetto inverso (apparente?) 10 cm
13	1510	237	85	3	4	
14	1670	314	89	15	4	
15	2000	317	81	10	4	
16	2290	320	80	50	4	
17	2570	318	85	30	4	
18	3100	52	70	5	4	
19	3000	303	81	10	4	



Scanline 7 – gallerie riflusso vicino al limite con il Paleozoico						
N	Distanza	Dipazimuth	Dip	Spessore (cm)	Set	Note
1	50	160	83	1	5	
2	70	110	89	1	5	Sale per tutta la parete
3	140	92	60	00.08	5	Associata ad una vena, ondulata
4	650	350	83	2	5	Finisce nella successiva
5	350	70	72	1	5	Vena
6	700	300	85	1,5	5	Cataclasite
7	720	15	75	1	5	Vena associata
8	860	83	85	2	5	Piccola faglia, finisce nella successiva
9	880	78	68	2	5	Attraversa tutta la volta
10	1550	320	85	20	5	Il piano ha una apertura beante di 0,5
11	1980	310	85	20	5	Core con 2 cm di cataclasite
12	2550	136	85	50	5	0,5 cm di riempimento cataclasite
13	2600	46	89	1	5	Vena associata
14	3000	10	80	1	5	
15	3300	315	88	10	5	0,5 core con cataclasite, vena associata

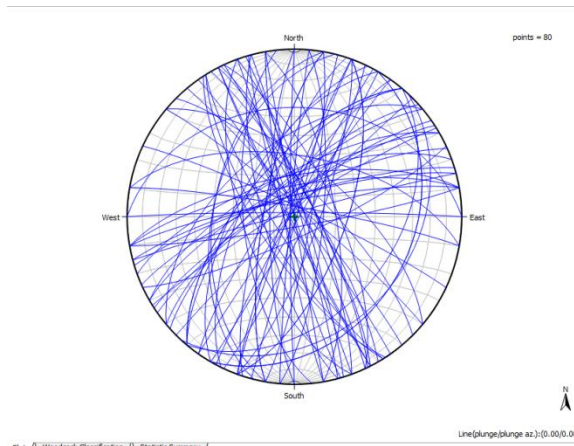
Scanline 8 – vicino al limite con il paleozoico, porzione basale del Miliolitico.										
N.	Distanza (cm)	Dip azimuth	Dip	U cm	U	D (cm)	D	A mm	Set	Note
1	0	95	72	200	S	120	!	2,0	4	
2	14	290	85	19	F	3	F	1,0	4	
3	21	104	75	117	F	37	S	1,0	5	
4	26	120	75	24	F	30	S	1,0	0	
5	29	125	70	48	F	36	F	0,1	1	
6	35	128	80	38	F	30	F	0,1	3	
7	45	140	78	200		120		5,0	3	Piano principale
8	56	334	85	2	R	140		0,1	4	
9	66	286	88	160	S	120		0,1	4	
10	75	123	83	35	F	30	S	0,1	5	
11	83	50	80	29	R	5	F	1,0	0	
12	103	328	83	12	F	3	F	0,1	1	
13	116	110	88	39	S	77	S	1,0	1	
14	127	122	82	29	R	24	F	2,0	3	
15	150	130	77	19	R	12	F	0,1	3	
16	159	114	75	99	S	70	S	3,0	4	
17	163	134	75	37	F	13	F	2,0	5	
18	208	354	86	200		140		2,0	5	
19	227	80	80	27	S	72	F	0,3	0	
20	250	112	88	96	F	1	F	0,3	0	
21	272	134	86	24	S	34	F	0,5	1	
22	282	310	79	28	F	140		3,0	3	
23	283	300	75	92	S	3	F	2,0	3	
24	300	284	82	38	F	40	S	0,2	4	
25	340	183	85	55	F	20	F	3,0	5	
26	336	114	85	28	F	19	F	0,2	5	
27	340	105	79	23	S	23	F	0,5	0	
28	378	280	83	30	F	54	S	1,0	0	
29	390	330	86	70	S	1	!	0,3	1	
30	416	90	60	200	!	1	!	0,5	3	
31	420	107	68	40	S	1	!	0,3	3	
32	446	343	78	150	S	10	F	2,0	4	
33	458	342	74	60	F	20	F	2,0	5	
34	470	343	75	32	F	50	S	0,4	5	
35	496	124	83	70	F	20	F	0,6	0	
36	500	222	80	10	S	10	F	0,5	1	
37	527	130	73	6	F	15	R	0,4	1	
38	550	65	83	111	S	120	!	5,0	3	
39	615	155	88	100	S	60	F	0,2	3	
40	670	304	69	53	S	30	F	0,2	4	
41	730	263	52	24	S	15	R	3,0	5	
42	735	280	85	32	F	70	F	2,0	5	

43	760	90	88	20	R	25	F	0,5	0	
44	780	280	85	21	R	40	F	0,5	1	
45	800	296	86	23	F	120	!	1,0	1	
46	818	280	89	200	!	120	!	3,0	3	Vena
47	821	275	78	30	F	1	R	8,0	3	Vena
48	849	300	89	20	F	5	R	0,5	4	
49	865	330	65	12	R	5	!	0,3	5	
50	864	30	75	20	R	1	!	0,1	5	
51	870	70	80	37	F	1	S	0,5	0	
52	882	60	89	33	F	20	!	1,0	1	
53	890	310	89	57	S	5	S	2,0	1	
54	898	90	65	26	F	120	S	0,5	3	
55	905	310	60	50	S	120	S	0,5	4	
56	910	300	60	40	R	10	S	0,5	5	
57	946	60	50	11	R	10	S	1,0	0	
58	990	50	89	400	R	400		17,0	1	Faglia principale con riempimento
59	1006	310	89	8,5	f	120	!	0,1	1	
60	1016	1	70	24	r	14	!	0,2	3	
61	1035	240	88	13	r	17	s	1,0	4	
62	1034	300	9	3,5	r	1	!	0,1	5	
63	1050	280	70	8	r	4	r	2,0	0	
64	1065	330	89	16	f	20	r	0,5	1	
65	1066	35	89	8	r	200	s	0,5	1	
66	1077	70	40	11	f	5	s	1,0	4	
67	1083	50	75	1	f	15	f	0,2	4	
68	1090	1	60	1	f	15	f	0,1	5	
69	1100	30	60	1	f	10	f	1,0	0	

## Allegato 2

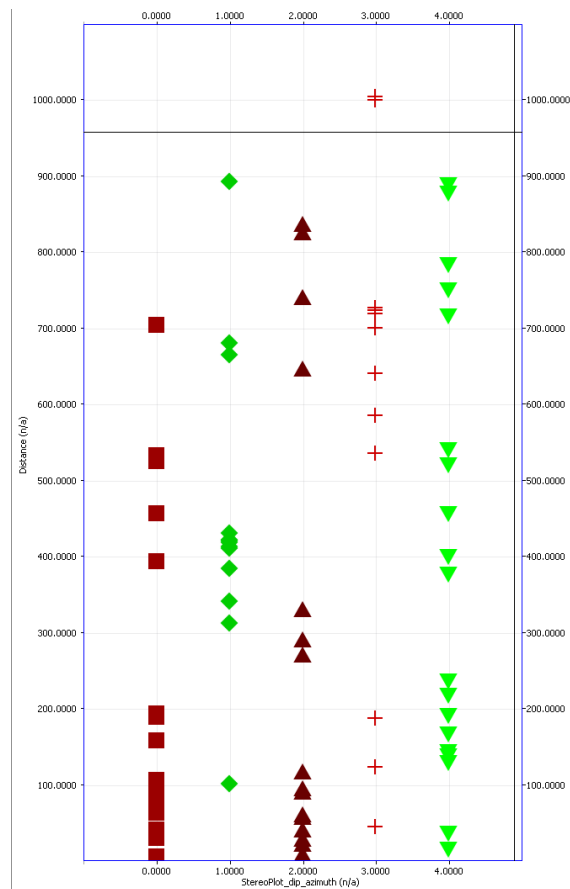
Qui di seguito sono riportate le elaborazioni dei dati raccolti. La prima figura rappresenta la proiezione stereografica dei piani misurati, in cui è possibile identificare le principali direzioni presenti, ma anche l'eventuale dispersione. La seconda tabella riguarda la suddivisione in set che viene eseguita dal software MOVE 2015; questo distingue set di piani in base al valore dell'immersione, ne calcola il valore medio una volta applicata la correzione di Terzaghi, e quindi tutti i parametri necessari per la modellazione. Questa analisi è stata eseguita sulle faglie misurate per ogni scanline e verrà utilizzata nella costruzione del DFN. Il terzo grafico rappresenta la distribuzione delle spaziature per ogni set riconosciuto per ogni scanline.

Scanline 1 – plot, cluster e spaziature dei set principali



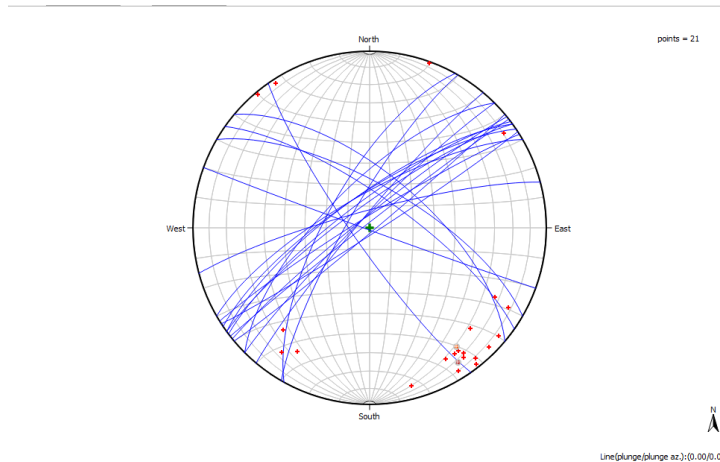
Cluster Means

Planes				
	S	Dip	Azimuth	Distortion
0	■	75.88	344.09	1.64
1	◆	79.43	253.63	0.87
2	▲	80.96	60.84	1.31
3	+	68.13	119.86	3.29
4	▼	72.54	300.12	1.72





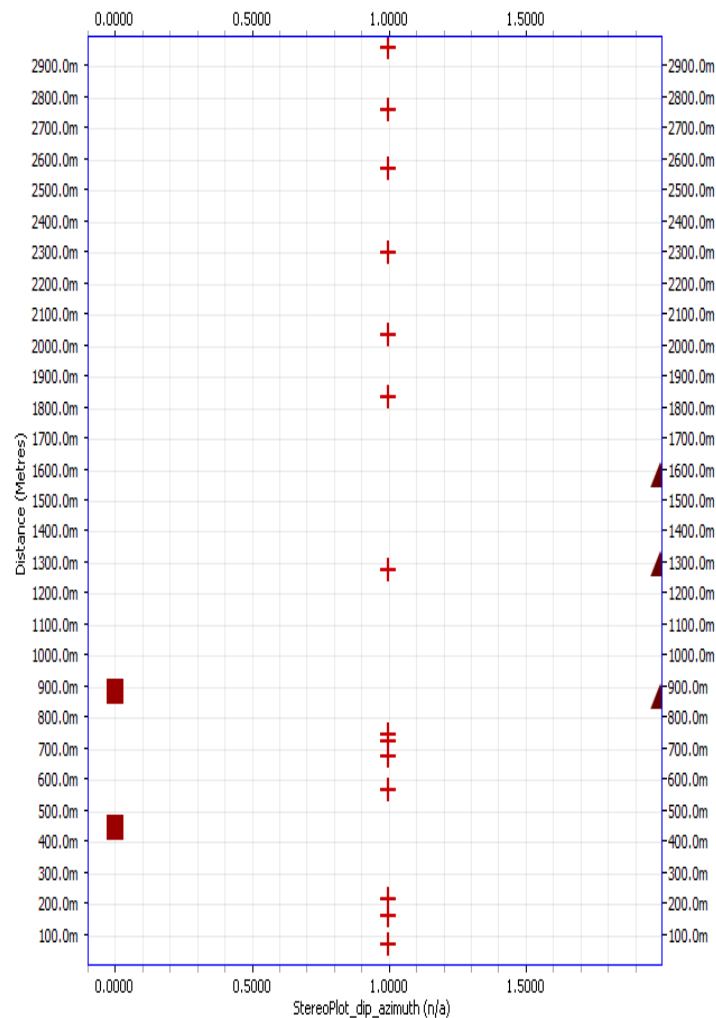
**Scanline 2 – Plot, cluster e spaziature dei set principali**



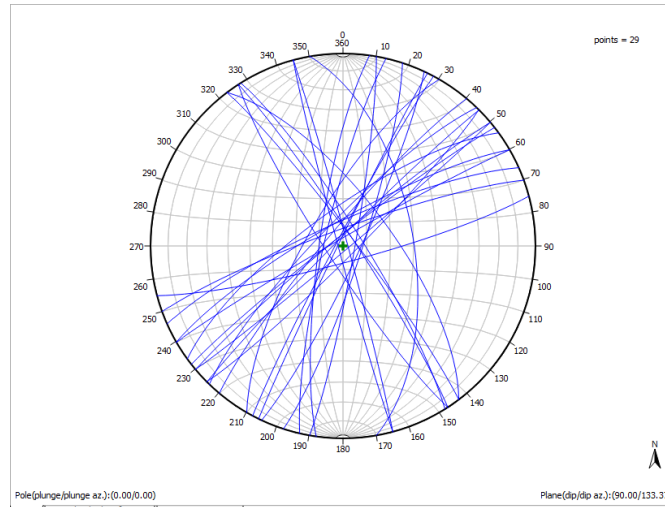
Cluster Means

Planes

	S	Dip	Azimuth	Distortion
0	■	70.05	34.94	0.03
1	+	79.55	320.21	0.66
2	▲	86.50	179.39	1.57



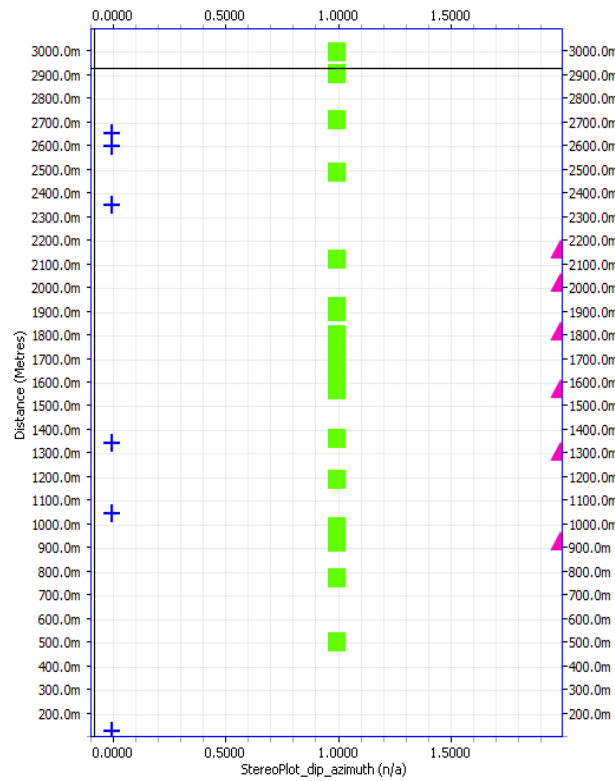
Scanline 3 – Plot, cluster e spaziature dei set principali



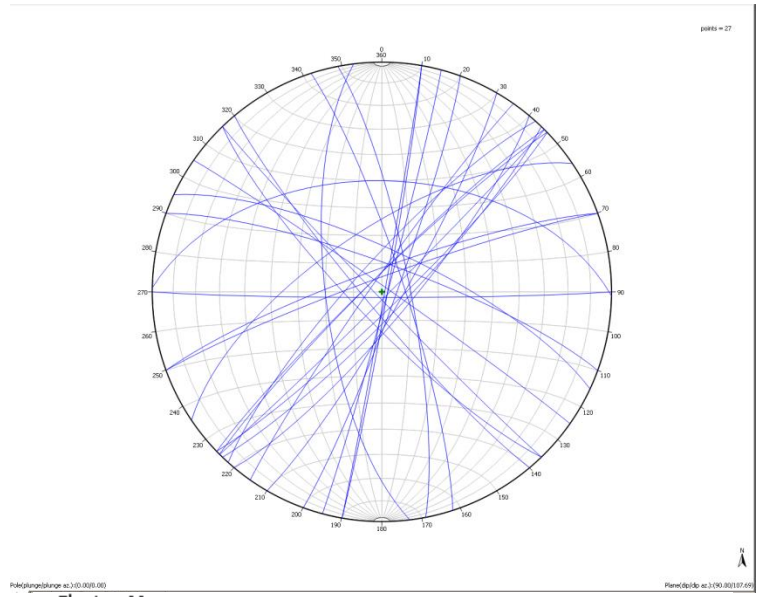
Cluster Means

Planes

	S	Dip	Azimuth	Distortion
0	+	84.34	126.93	0.83
1	▲	78.56	62.34	0.37
2	■	82.96	306.25	3.54

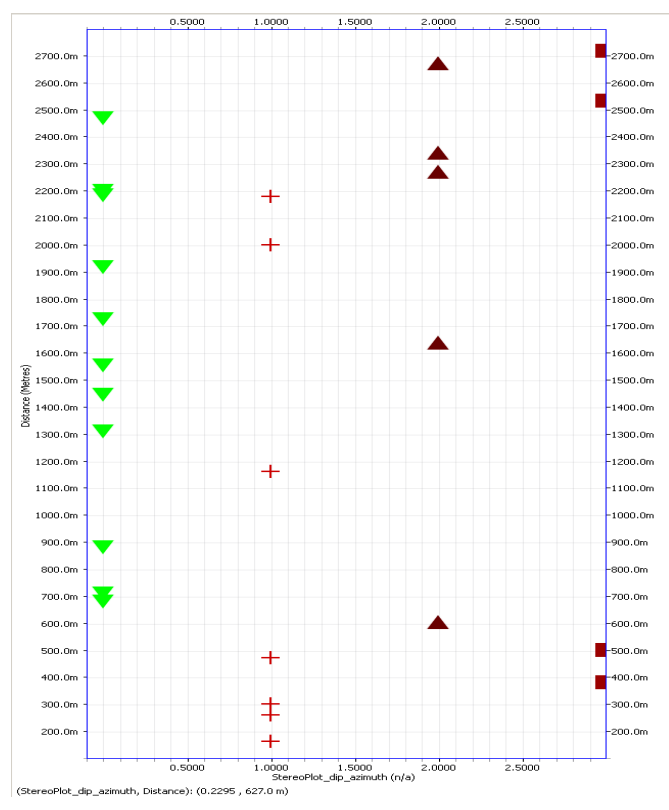


**Scanline 4– plot, cluster e spaziature dei set principali**

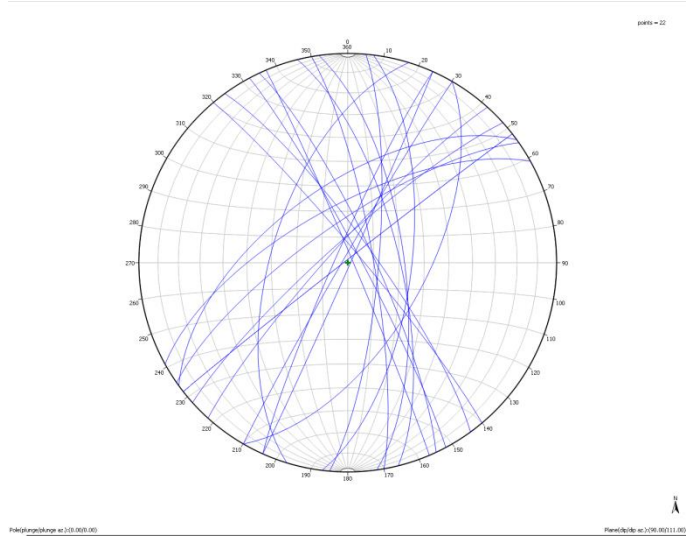


Cluster Means

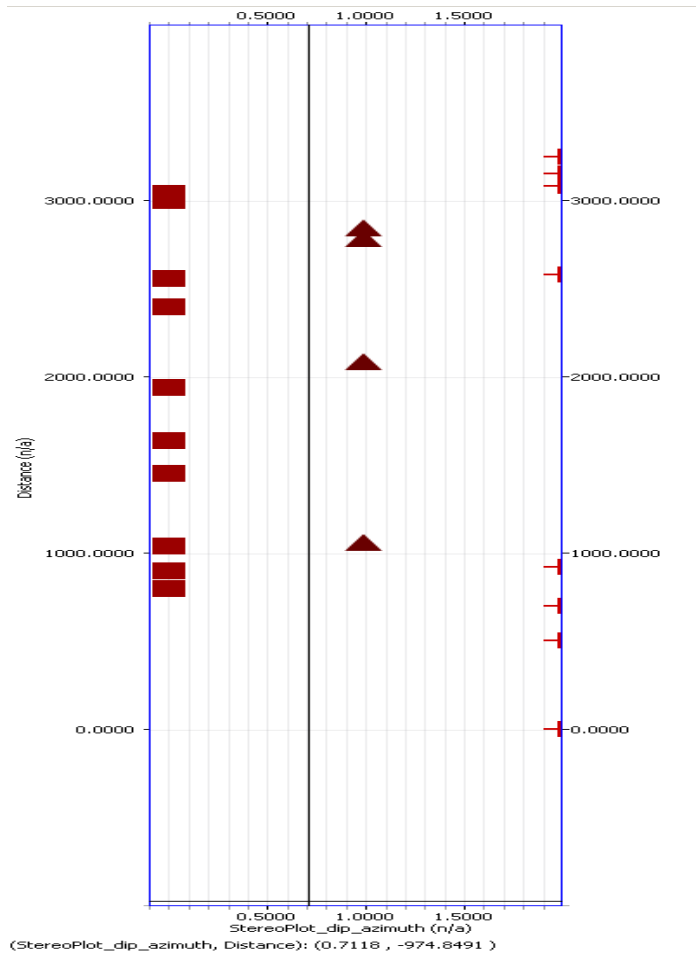
Planes				
	S	Dip	Azimuth	Distortion
0	▲	82.07	224.91	0.99
1	▼	84.46	111.23	1.45
2	■	73.89	21.47	0.38
3	+	81.63	321.92	0.41



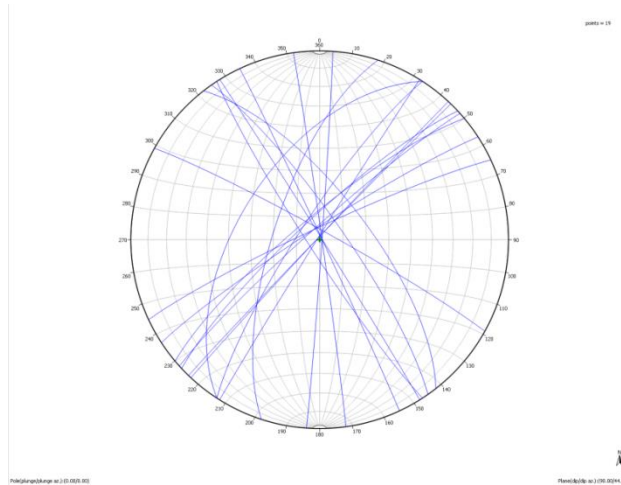
Scanline 5- plot, cluster e spaziature dei set principali



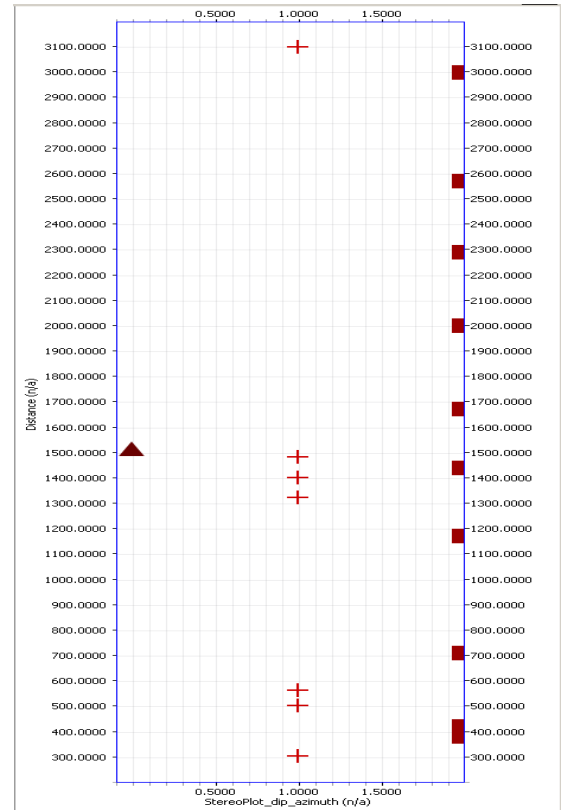
	S	Dip	Azimuth	Distortion
0	■	78.16	313.65	0.88
1	▲	73.32	106.31	0.27
2	+	79.58	66.81	0.38



Scanline 6- plot, cluster e spaziature dei set principali

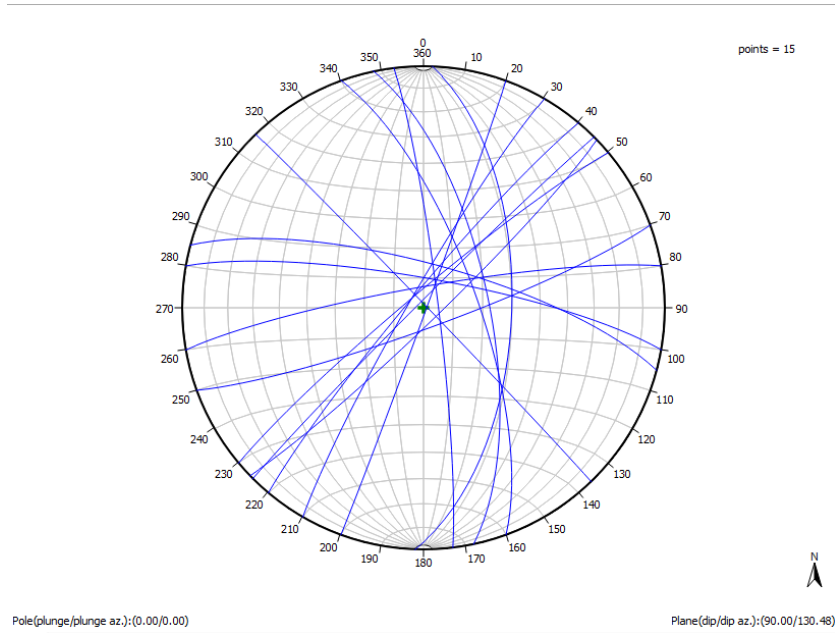


	S	Dip	Azimuth	Distortion
0	▲	85.00	237.00	0.00
1	+	84.63	62.24	0.86
2	■	81.03	313.03	0.79

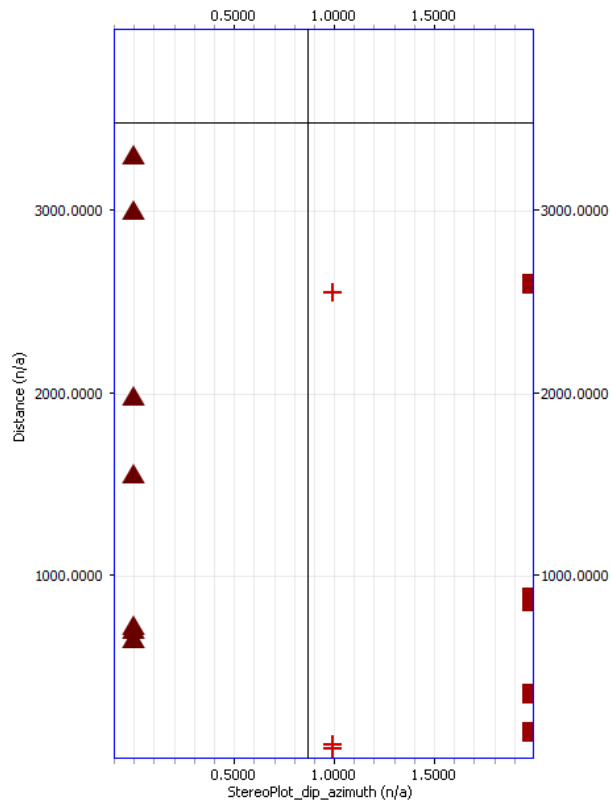




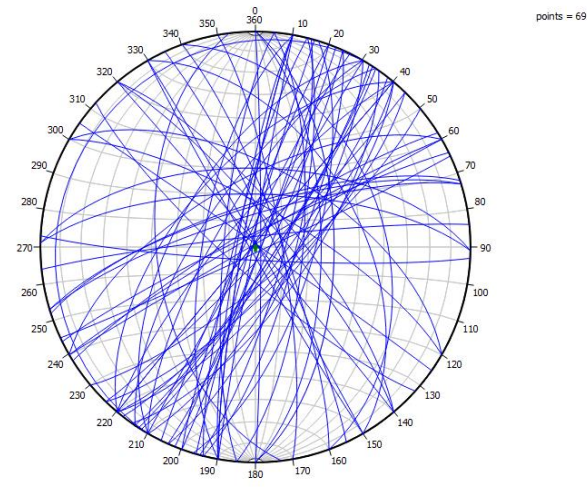
Scanline 7- plot, cluster e spaziature dei set principali



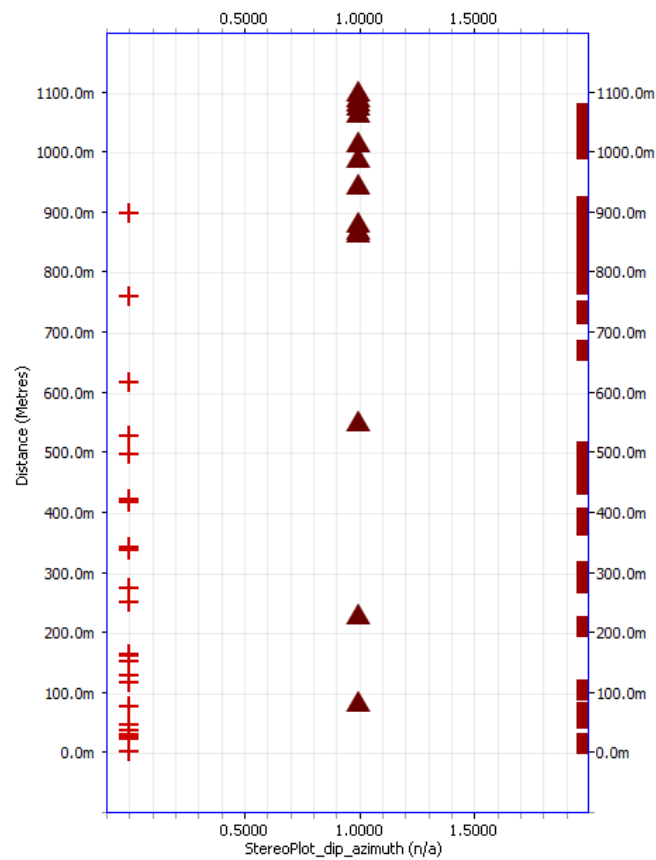
S	Dip	Azimuth	Distortion
0 ▲	83.02	333.60	1.53
1 +	85.67	135.29	0.37
2 ■	75.07	73.40	0.50



**Scanline 8– plot, cluster e spaziature dei set principali**



	S	Dip	Azimuth	Distortion
0	+	78.37	119.86	3.20
1	▲	73.55	46.94	2.73
2	■	78.09	301.86	8.86



## Allegato 3

*Session Summary of all the DFN presented*

*Parametri iniziali e finali di tutti i DFN realizzati*

*Session Summary DFN 1 – galleria afflusso (scan 1) lunghezza cm -5 metri apertura fissa (valore medio)*

Fracture Modelling\_afflusso - Set 1

Input Parameters:

Input Grid: afflusso

Intensity Value: 1.7

P32: true

Length Defintion is Power Law:

Length Param1: 0.01

Length Param2: 5

Length Param3: -2

Orientation is Defined:

Distribution Is Fisher:

Fisher K Param: 19.08

Orientation Param1: 75.88

Orientation Param2: 344.09

Aspect Ratio: 0.5

Aperture: 0.00083

Number of Fractures: 528413

Fracture Modelling\_afflusso - Set 2

Input Parameters:

Input Grid: afflusso

Intensity Value: 1.3

P32: true

Length Defintion is Power Law:

Length Param1: 0.01

Length Param2: 5

Length Param3: -2

Orientation is Defined:

Distribution Is Fisher:

Fisher K Param: 27.15

Orientation Param1: 79.43  
Orientation Param2: 253.63  
Aspect Ratio: 0.5  
Aperture: 0.00094  
Number of Fractures: 404079

Fracture Modelling\_afflusso - Set 3

Input Parameters:  
Input Grid: afflusso  
Intensity Value: 1.6  
P32: true  
Length Definition is Power Law:  
Length Param1: 0.01  
Length Param2: 5  
Length Param3: -2  
Orientation is Defined:  
Distribution Is Fisher:  
Fisher K Param: 22.47  
Orientation Param1: 80.96  
Orientation Param2: 60.84  
Aspect Ratio: 0.5  
Aperture: 0.0009  
Number of Fractures: 497315

Fracture Modelling\_afflusso - Set 4

Input Parameters:  
Input Grid: afflusso  
Intensity Value: 1.3  
P32: true  
Length Definition is Power Law:  
Length Param1: 0.01  
Length Param2: 5  
Length Param3: -2  
Orientation is Defined:  
Distribution Is Fisher:  
Fisher K Param: 7.39  
Orientation Param1: 68.13

Orientation Param2: 119.86  
Aspect Ratio: 0.5  
Aperture: 0.0009  
Number of Fractures: 404079

Fracture Modelling\_afflusso - Set 5

Input Parameters:

Input Grid: afflusso

Intensity Value: 1.9

P32: true

Length Defintion is Power Law:

Length Param1: 0.01

Length Param2: 5

Length Param3: -2

Orientation is Defined:

Distribution Is Fisher:

Fisher K Param: 20.42

Orientation Param1: 72.54

Orientation Param2: 300.12

Aspect Ratio: 0.5

Aperture: 0.00158

Number of Fractures: 590549

Output Grid: afflusso

Generated Properties:	Min Value	Max Value
Frac_Session1_Porosity	0.00252555	0.016378
Frac_Session1_Permeability	256.1	2105.94
Frac_Session1_Perm_KXX	99.5496	1083.79
Frac_Session1_Perm_KYY	185.594	1625.19
Frac_Session1_Perm_KZZ	252.014	1988.77
Frac_Session1_Perm_KXY	-11.6292	653.288
Frac_Session1_Perm_KXZ	-21.9778	387.054
Frac_Session1_Perm_KYZ	-313.118	9.82405
Frac_Session1_Anisotropy	1.90858	7.90265
Frac_Session1_Perm_KB_Max	254.065	2075.58
Frac_Session1_Perm_KB_Min	74.7594	573.995
Frac_Session1_2D_Anisotropy	1.77386	7.49244

Frac\_Session1\_P32                    2.41508                    14.9336

Total Fracture Area: 54338.1 (meter-squared)

Total Fracture Volume: 57.325 (meter-cubed)

Total Model Volume: 6500.05 (meter-cubed)

Average Fracture Porosity: 0.00881917

Average Aperture: 0.00105497 (meter)

Average DFN P32: 8.35963 (1/meter)

DFN 2 – lunghezze da cm a 1m apertura fissa per ogni set.

Fracture Modelling\_afflusso - Set 1

Input Parameters:

Input Grid: afflusso

Intensity Value: 1.7

P32: true

Length Defintion is Power Law:

Length Param1: 0.01

Length Param2: 1

Length Param3: -2

Orientation is Defined:

Distribution Is Fisher:

Fisher K Param: 19.08

Orientation Param1: 75.88

Orientation Param2: 344.09

Aspect Ratio: 0.5

Aperture: 0.00083

Number of Fractures: 2264523

Fracture Modelling\_afflusso - Set 2

Input Parameters:

Input Grid: afflusso

Intensity Value: 1.3

P32: true

Length Defintion is Power Law:

Length Param1: 0.01

Length Param2: 1

Length Param3: -2

Orientation is Defined:

Distribution Is Fisher:

Fisher K Param: 27.15

Orientation Param1: 79.43

Orientation Param2: 253.63

Aspect Ratio: 0.5

Aperture: 0.00094

Number of Fractures: 1731694

Fracture Modelling\_afflusso - Set 3

Input Parameters:

Input Grid: afflusso

Intensity Value: 1.6

P32: true

Length Defintion is Power Law:

Length Param1: 0.01

Length Param2: 1

Length Param3: -2

Orientation is Defined:

Distribution Is Fisher:

Fisher K Param: 22.47

Orientation Param1: 80.96

Orientation Param2: 60.84

Aspect Ratio: 0.5

Aperture: 0.0009

Number of Fractures: 2131348

Fracture Modelling\_afflusso - Set 4

Input Parameters:

Input Grid: afflusso

Intensity Value: 1.3

P32: true

Length Defintion is Power Law:

Length Param1: 0.01

Length Param2: 1

Length Param3: -2

Orientation is Defined:



Distribution Is Fisher:

Fisher K Param: 7.39

Orientation Param1: 68.13

Orientation Param2: 119.86

Aspect Ratio: 0.5

Aperture: 0.0009

Number of Fractures: 1731694

Fracture Modelling\_afflusso - Set 5

Input Parameters:

Input Grid: afflusso

Intensity Value: 1.9

P32: true

Length Defintion is Power Law:

Length Param1: 0.01

Length Param2: 1

Length Param3: -2

Orientation is Defined:

Distribution Is Fisher:

Fisher K Param: 20.42

Orientation Param1: 72.54

Orientation Param2: 300.12

Aspect Ratio: 0.5

Aperture: 0.00158

Number of Fractures: 2530958

Output Grid: afflusso

Generated Properties:	Min Value	Max Value
Frac_Session1_Porosity	0.00597542	0.0107376
Frac_Session1_Permeability	626.853	1279.11
Frac_Session1_Perm_KXX	235.834	573.538
Frac_Session1_Perm_KYY	477.566	1012.05
Frac_Session1_Perm_KZZ	592.173	1193.34
Frac_Session1_Perm_KXY	74.8988	329.546
Frac_Session1_Perm_KXZ	54.7556	246.796
Frac_Session1_Perm_KYZ	-168.331	-36.4859
Frac_Session1_Anisotropy	2.65326	4.79498

Frac\_Session1\_Perm\_KB\_Max 615.477 1268.97  
Frac\_Session1\_Perm\_KB\_Min 179.896 366.952  
Frac\_Session1\_2D\_Anisotropy 2.53703 4.64508  
Frac\_Session1\_P32 5.49942 10.3778  
Total Fracture Area: 50923.9 (meter-squared)  
Total Fracture Volume: 53.803 (meter-cubed)  
Total Model Volume: 6500.05 (meter-cubed)  
Average Fracture Porosity: 0.00827732  
Average Aperture: 0.00105654 (meter)  
Average DFN P32: 7.83439 (1/meter)

DFN 3 – lunghezze da cm a 2m apertura fissa per ogni set.

Fracture Modelling\_afflusso - Set 1

Input Parameters:

Input Grid: afflusso

Intensity Value: 1.7

P32: true

Length Defintion is Power Law:

Length Param1: 0.01

Length Param2: 2

Length Param3: -2

Orientation is Defined:

Distribution Is Fisher:

Fisher K Param: 19.08

Orientation Param1: 75.88

Orientation Param2: 344.09

Aspect Ratio: 0.5

Aperture: 0.00083

Number of Fractures: 1185572

Fracture Modelling\_afflusso - Set 2

Input Parameters:

Input Grid: afflusso

Intensity Value: 1.3

P32: true

Length Defintion is Power Law:

Length Param1: 0.01

Length Param2: 2

Length Param3: -2

Orientation is Defined:

Distribution Is Fisher:

Fisher K Param: 27.15

Orientation Param1: 79.43

Orientation Param2: 253.63

Aspect Ratio: 0.5

Aperture: 0.00094

Number of Fractures: 906653

Fracture Modelling\_afflusso - Set 3

Input Parameters:

Input Grid: afflusso

Intensity Value: 1.6

P32: true

Length Definition is Power Law:

Length Param1: 0.01

Length Param2: 2

Length Param3: -2

Orientation is Defined:

Distribution Is Fisher:

Fisher K Param: 22.47

Orientation Param1: 80.96

Orientation Param2: 60.84

Aspect Ratio: 0.5

Aperture: 0.0009

Number of Fractures: 1115847

Fracture Modelling\_afflusso - Set 4

Input Parameters:

Input Grid: afflusso

Intensity Value: 1.3

P32: true

Length Definition is Power Law:

Length Param1: 0.01

Length Param2: 2

Length Param3: -2

Orientation is Defined:

Distribution Is Fisher:

Fisher K Param: 7.39

Orientation Param1: 68.13

Orientation Param2: 119.86

Aspect Ratio: 0.5

Aperture: 0.0009

Number of Fractures: 906653

Fracture Modelling\_afflusso - Set 5

Input Parameters:

Input Grid: afflusso

Intensity Value: 1.9

P32: true

Length Definition is Power Law:

Length Param1: 0.01

Length Param2: 2

Length Param3: -2

Orientation is Defined:

Distribution Is Fisher:

Fisher K Param: 20.42

Orientation Param1: 72.54

Orientation Param2: 300.12

Aspect Ratio: 0.5

Aperture: 0.00158

Number of Fractures: 1325091

Output Grid: afflusso

Generated Properties: Min Value Max Value

Frac\_Session1\_Porosity 0.00377605 0.0143483

Frac\_Session1\_Permeability 452.711 1717.7

Frac\_Session1\_Perm\_KXX 161.465 740.156

Frac\_Session1\_Perm\_KYY 346.562 1260.9

Frac\_Session1\_Perm\_KZZ 430.573 1631.2

Frac\_Session1\_Perm\_KXY 46.3707 418.416

Frac\_Session1\_Perm\_KXZ 25.0115 304.263  
Frac\_Session1\_Perm\_KYZ -202.69 -17.5369  
Frac\_Session1\_Anisotropy 2.23383 5.87491  
Frac\_Session1\_Perm\_KB\_Max 450.571 1697.25  
Frac\_Session1\_Perm\_KB\_Min 124.588 455.192  
Frac\_Session1\_2D\_Anisotropy 2.118 5.63726  
Frac\_Session1\_P32 3.40607 13.2453  
Total Fracture Area: 51972.7 (meter-squared)  
Total Fracture Volume: 54.9183 (meter-cubed)  
Total Model Volume: 6500.05 (meter-cubed)  
Average Fracture Porosity: 0.0084489  
Average Aperture: 0.00105668 (meter)  
Average DFN P32: 7.99574 (1/meter)

DFN4 – Faglie - SL 2-6

Fracture Modelling\_faglie afflusso - Set 1

Input Parameters:

Input Grid: afflusso

Intensity Value: 0.13

P32: true

Length Definition is Power Law:

Length Param1: 0.5

Length Param2: 10

Length Param3: -2

Orientation is Defined:

Distribution Is Fisher:

Fisher K Param: 29.73

Orientation Param1: 79.11

Orientation Param2: 48.67

Aspect Ratio: 0.5

Aperture: (Proportional to Length) - Coefficient used = 0.005

Number of Fractures: 354

Fracture Modelling\_faglie afflusso - Set 2

Input Parameters:

Input Grid: afflusso

Intensity Value: 0.29

P32: true

Length Defintion is Power Law:

Length Param1: 0.5

Length Param2: 10

Length Param3: -2

Orientation is Defined:

Distribution Is Fisher:

Fisher K Param: 52.48

Orientation Param1: 80.98

Orientation Param2: 324.15

Aspect Ratio: 0.5

Aperture: (Proportional to Length) - Coefficient used = 0.005

Number of Fractures: 787

Fracture Modelling\_faglie afflusso - Set 3

Input Parameters:

Input Grid: afflusso

Intensity Value: 0.07

P32: true

Length Defintion is Power Law:

Length Param1: 0.5

Length Param2: 10

Length Param3: -2

Orientation is Defined:

Distribution Is Fisher:

Fisher K Param: 27.65

Orientation Param1: 82.56

Orientation Param2: 239.47

Aspect Ratio: 0.5

Aperture: (Proportional to Length) - Coefficient used = 0.005

Number of Fractures: 181

Fracture Modelling\_faglie afflusso - Set 4

Input Parameters:

Input Grid: afflusso

Intensity Value: 0.11

P32: true

Length Definition is Power Law:

Length Param1: 0.5

Length Param2: 10

Length Param3: -2

Orientation is Defined:

Distribution Is Fisher:

Fisher K Param: 34.34

Orientation Param1: 76.71

Orientation Param2: 295.12

Aspect Ratio: 0.5

Aperture: (Proportional to Length) - Coefficient used = 0.005

Number of Fractures: 295

Fracture Modelling\_faglie afflusso - Set 5

Input Parameters:

Input Grid: afflusso

Intensity Value: 0.11

P32: true

Length Definition is Power Law:

Length Param1: 0.5

Length Param2: 10

Length Param3: -2

Orientation is Defined:

Distribution Is Fisher:

Fisher K Param: 23.9

Orientation Param1: 81.23

Orientation Param2: 134.95

Aspect Ratio: 0.5

Aperture: (Proportional to Length) - Coefficient used = 0.005

Number of Fractures: 295

Fracture Modelling\_faglie afflusso - Set 6

Input Parameters:

Input Grid: afflusso

Intensity Value: 0.12

P32: true



Length Definition is Power Law:

Length Param1: 0.5

Length Param2: 10

Length Param3: -2

Orientation is Defined:

Distribution Is Fisher:

Fisher K Param: 27.4

Orientation Param1: 79.49

Orientation Param2: 90.15

Aspect Ratio: 0.5

Aperture: (Proportional to Length) - Coefficient used = 0.005

Number of Fractures: 322

Output Grid: afflusso

Generated Properties: Min Value Max Value

Frac\_Session1\_Porosity 0 0.14643

Frac\_Session1\_Permeability 0 1.82393e+07

Frac\_Session1\_Perm\_KXX 0 9.33967e+06

Frac\_Session1\_Perm\_KYY 0 1.31237e+07

Frac\_Session1\_Perm\_KZZ 0 1.82014e+07

Frac\_Session1\_Perm\_KXY -4.35193e+06 7.3316e+06

Frac\_Session1\_Perm\_KXZ -1.64196e+06 1.7514e+06

Frac\_Session1\_Perm\_KYZ -2.02946e+06 1.17214e+06

Frac\_Session1\_Anisotropy 1.95001 100

Frac\_Session1\_Perm\_KB\_Max 0.326368 1.82228e+07

Frac\_Session1\_Perm\_KB\_Min 0.64104e+06

Frac\_Session1\_2D\_Anisotropy 1.87746 100

Frac\_Session1\_P32 0 12.2298

Total Fracture Area: 4773.51 (meter-squared)

Total Fracture Volume: 119.352 (meter-cubed)

Total Model Volume: 6500.05 (meter-cubed)

Average Fracture Porosity: 0.0183618

Average Aperture: 0.0250031 (meter)

Average DFN P32: 0.734381 (1/meter)

DFN5 – SL 2-6 lunghezza 1-10 m

### Fracture Modelling\_faglie afflusso - Set 1

Input Parameters:

Input Grid: afflusso

Intensity Value: 0.13

P32: true

Length Defintion is Power Law:

Length Param1: 1

Length Param2: 10

Length Param3: -2

Orientation is Defined:

Distribution Is Fisher:

Fisher K Param: 29.73

Orientation Param1: 79.11

Orientation Param2: 48.67

Aspect Ratio: 0.5

Aperture: (Proportional to Length) - Coefficient used = 0.005

Number of Fractures: 166

### Fracture Modelling\_faglie afflusso - Set 2

Input Parameters:

Input Grid: afflusso

Intensity Value: 0.29

P32: true

Length Defintion is Power Law:

Length Param1: 1

Length Param2: 10

Length Param3: -2

Orientation is Defined:

Distribution Is Fisher:

Fisher K Param: 52.48

Orientation Param1: 80.98

Orientation Param2: 324.15

Aspect Ratio: 0.5

Aperture: (Proportional to Length) - Coefficient used = 0.005

Number of Fractures: 397

### Fracture Modelling\_faglie afflusso - Set 3

Input Parameters:

Input Grid: afflusso

Intensity Value: 0.07

P32: true

Length Definition is Power Law:

Length Param1: 1

Length Param2: 10

Length Param3: -2

Orientation is Defined:

Distribution Is Fisher:

Fisher K Param: 27.65

Orientation Param1: 82.56

Orientation Param2: 239.47

Aspect Ratio: 0.5

Aperture: (Proportional to Length) - Coefficient used = 0.005

Number of Fractures: 77

Fracture Modelling\_faglie afflusso - Set 4

Input Parameters:

Input Grid: afflusso

Intensity Value: 0.11

P32: true

Length Definition is Power Law:

Length Param1: 1

Length Param2: 10

Length Param3: -2

Orientation is Defined:

Distribution Is Fisher:

Fisher K Param: 34.34

Orientation Param1: 76.71

Orientation Param2: 295.12

Aspect Ratio: 0.5

Aperture: (Proportional to Length) - Coefficient used = 0.005

Number of Fractures: 135

Fracture Modelling\_faglie afflusso - Set 5

Input Parameters:

Input Grid: afflusso

Intensity Value: 0.11

P32: true

Length Defintion is Power Law:

Length Param1: 1

Length Param2: 10

Length Param3: -2

Orientation is Defined:

Distribution Is Fisher:

Fisher K Param: 23.9

Orientation Param1: 81.23

Orientation Param2: 134.95

Aspect Ratio: 0.5

Aperture: (Proportional to Length) - Coefficient used = 0.005

Number of Fractures: 135

Fracture Modelling\_faglie afflusso - Set 6

Input Parameters:

Input Grid: afflusso

Intensity Value: 0.12

P32: true

Length Defintion is Power Law:

Length Param1: 1

Length Param2: 10

Length Param3: -2

Orientation is Defined:

Distribution Is Fisher:

Fisher K Param: 27.4

Orientation Param1: 79.49

Orientation Param2: 90.15

Aspect Ratio: 0.5

Aperture: (Proportional to Length) - Coefficient used = 0.005

Number of Fractures: 147

Output Grid: afflusso

Generated Properties: Min Value Max Value

Frac\_Session1\_Porosity 0 0.211905

Frac\_Session1\_Permeability 0 2.72851e+07  
Frac\_Session1\_Perm\_KXX 0 9.5268e+06  
Frac\_Session1\_Perm\_KYY 0 1.89784e+07  
Frac\_Session1\_Perm\_KZZ 0 2.70712e+07  
Frac\_Session1\_Perm\_KXY -4.97289e+06 8.41586e+06  
Frac\_Session1\_Perm\_KXZ -2.26606e+06 2.31671e+06  
Frac\_Session1\_Perm\_KYZ -1.93842e+06 1.65984e+06  
Frac\_Session1\_Anisotropy 1.99294 100  
Frac\_Session1\_Perm\_KB\_Max 0.563213 2.69313e+07  
Frac\_Session1\_Perm\_KB\_Min 0 8.15559e+06  
Frac\_Session1\_2D\_Anisotropy 1.86067 100  
Frac\_Session1\_P32 0 12.0017  
Total Fracture Area: 4535.64 (meter-squared)  
Total Fracture Volume: 123.596 (meter-cubed)  
Total Model Volume: 6500.05 (meter-cubed)  
Average Fracture Porosity: 0.0190146  
Average Aperture: 0.0272499 (meter)  
Average DFN P32: 0.697786 (1/meter)  
DFN 6 – SL (2-6) Lunghezza da 2 a 10 metri

Fracture Modelling\_faglie afflusso - Set 1

Input Parameters:

Input Grid: afflusso

Intensity Value: 0.13

P32: true

Length Definition is Power Law:

Length Param1: 2

Length Param2: 10

Length Param3: -2

Orientation is Defined:

Distribution Is Fisher:

Fisher K Param: 29.73

Orientation Param1: 79.11

Orientation Param2: 48.67

Aspect Ratio: 0.5

Aperture: (Proportional to Length) - Coefficient used = 0.005

Number of Fractures: 73

### Fracture Modelling\_faglie afflusso - Set 2

Input Parameters:

Input Grid: afflusso

Intensity Value: 0.29

P32: true

Length Definition is Power Law:

Length Param1: 2

Length Param2: 10

Length Param3: -2

Orientation is Defined:

Distribution Is Fisher:

Fisher K Param: 52.48

Orientation Param1: 80.98

Orientation Param2: 324.15

Aspect Ratio: 0.5

Aperture: (Proportional to Length) - Coefficient used = 0.005

Number of Fractures: 188

### Fracture Modelling\_faglie afflusso - Set 3

Input Parameters:

Input Grid: afflusso

Intensity Value: 0.07

P32: true

Length Definition is Power Law:

Length Param1: 2

Length Param2: 10

Length Param3: -2

Orientation is Defined:

Distribution Is Fisher:

Fisher K Param: 27.65

Orientation Param1: 82.56

Orientation Param2: 239.47

Aspect Ratio: 0.5

Aperture: (Proportional to Length) - Coefficient used = 0.005

Number of Fractures: 34

Fracture Modelling\_faglie afflusso - Set 4

Input Parameters:

Input Grid: afflusso

Intensity Value: 0.11

P32: true

Length Defintion is Power Law:

Length Param1: 2

Length Param2: 10

Length Param3: -2

Orientation is Defined:

Distribution Is Fisher:

Fisher K Param: 34.34

Orientation Param1: 76.71

Orientation Param2: 295.12

Aspect Ratio: 0.5

Aperture: (Proportional to Length) - Coefficient used = 0.005

Number of Fractures: 62

Fracture Modelling\_faglie afflusso - Set 5

Input Parameters:

Input Grid: afflusso

Intensity Value: 0.11

P32: true

Length Defintion is Power Law:

Length Param1: 2

Length Param2: 10

Length Param3: -2

Orientation is Defined:

Distribution Is Fisher:

Fisher K Param: 23.9

Orientation Param1: 81.23

Orientation Param2: 134.95

Aspect Ratio: 0.5

Aperture: (Proportional to Length) - Coefficient used = 0.005

Number of Fractures: 62

Fracture Modelling\_faglie afflusso - Set 6



Input Parameters:

Input Grid: afflusso

Intensity Value: 0.12

P32: true

Length Definition is Power Law:

Length Param1: 2

Length Param2: 10

Length Param3: -2

Orientation is Defined:

Distribution Is Fisher:

Fisher K Param: 27.4

Orientation Param1: 79.49

Orientation Param2: 90.15

Aspect Ratio: 0.5

Aperture: (Proportional to Length) - Coefficient used = 0.005

Number of Fractures: 67

Output Grid: afflusso

Generated Properties: Min Value Max Value

Frac\_Session1\_Porosity 0 0.208725

Frac\_Session1\_Permeability 0 3.41017e+07

Frac\_Session1\_Perm\_KXX 0 1.28974e+07

Frac\_Session1\_Perm\_KYY 0 2.34229e+07

Frac\_Session1\_Perm\_KZZ 0 3.34854e+07

Frac\_Session1\_Perm\_KXY -4.67627e+06 1.19358e+07

Frac\_Session1\_Perm\_KXZ -3.50323e+06 2.20404e+06

Frac\_Session1\_Perm\_KYZ -3.19667e+06 1.54414e+06

Frac\_Session1\_Anisotropy 1.91661 100

Frac\_Session1\_Perm\_KB\_Max 1.15273 3.35111e+07

Frac\_Session1\_Perm\_KB\_Min 0 8.56339e+06

Frac\_Session1\_2D\_Anisotropy 1.73288 100

Frac\_Session1\_P32 0 12.6788

Total Fracture Area: 3833.17 (meter-squared)

Total Fracture Volume: 111.466 (meter-cubed)

Total Model Volume: 6500.05 (meter-cubed)

Average Fracture Porosity: 0.0171485

Average Aperture: 0.0290793 (meter)

Average DFN P32: 0.589713 (1/meter)

DFN 7 - (SL 8) – lunghezze da 1 a 5 m

Fracture Modelling - Set 1

Input Parameters:

Input Grid: riflusso

Intensity Value: 2.18

P32: true

Length Definition is Power Law:

Length Param1: 0.01

Length Param2: 5

Length Param3: -2

Orientation is Defined:

Distribution Is Fisher:

Fisher K Param: 13.88

Orientation Param1: 77.49

Orientation Param2: 119.86

Aspect Ratio: 0.5

Aperture: 0.001

Number of Fractures: 364865

Fracture Modelling - Set 2

Input Parameters:

Input Grid: riflusso

Intensity Value: 1.27

P32: true

Length Definition is Power Law:

Length Param1: 0.01

Length Param2: 5

Length Param3: -2

Orientation is Defined:

Distribution Is Fisher:

Fisher K Param: 9.04

Orientation Param1: 71.61

Orientation Param2: 46.94

Aspect Ratio: 0.5

Aperture: 0.00127

Number of Fractures: 212566

Fracture Modelling - Set 3

Input Parameters:

Input Grid: riflusso

Intensity Value: 2.82

P32: true

Length Definition is Power Law:

Length Param1: 0.01

Length Param2: 5

Length Param3: -2

Orientation is Defined:

Distribution Is Fisher:

Fisher K Param: 10.57

Orientation Param1: 78.09

Orientation Param2: 301.86

Aspect Ratio: 0.5

Aperture: 0.0013

Number of Fractures: 471951

Output Grid: riflusso

Generated Properties: Min Value Max Value

Frac\_Session1\_Porosity 0.00306745 0.0150134

Frac\_Session1\_Permeability 338.388 1820.52

Frac\_Session1\_Perm\_KXX 138.608 857.126

Frac\_Session1\_Perm\_KYY 248.157 1357.72

Frac\_Session1\_Perm\_KZZ 325.192 1818.49

Frac\_Session1\_Perm\_KXY -81.7995 521.674

Frac\_Session1\_Perm\_KXZ -136.218 197.526

Frac\_Session1\_Perm\_KYZ -197.002 96.2219

Frac\_Session1\_Anisotropy 1.47489 5.48481

Frac\_Session1\_Perm\_KB\_Max 321.591 1817.8

Frac\_Session1\_Perm\_KB\_Min 102.589 724.219

Frac\_Session1\_2D\_Anisotropy 1.45705 5.4216

Frac\_Session1\_P32 2.6112 12.233

Total Fracture Area: 23527.6 (meter-squared)

Total Fracture Volume: 28.0151 (meter-cubed)

Total Model Volume: 3499.99 (meter-cubed)

Average Fracture Porosity: 0.00800435

Average Aperture: 0.00119073 (meter)

Average DFN P32: 6.7222 (1/meter)