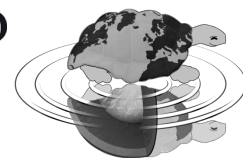




UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
SCUOLA DI DOTTORATO
TERRA, AMBIENTE E BIODIVERSITÀ



Dottorato di Ricerca in Scienze della Terra
Ciclo XXIII

**Ammassi rocciosi fratturati: modellazione del
reticolo di fratturazione, effetti sulla circolazione
idrica e sulla stabilità**

Ph.D. Thesis

Andrea Merri
Matricola R07619

Tutori
Prof. Tiziana Apuani
Prof. Ing. Gian Paolo
Giani

Anno Accademico
2009-2010

Coordinatore
Prof. Stefano Poli

Desidero per prima cosa ringraziare gli insegnanti, i colleghi e gli amici con cui ho condiviso questi anni di lavoro. Per la gentilezza e la disponibilità con cui mi hanno guidato, consigliato, aiutato quando ne ho avuto bisogno. Grazie Tiziana, Marco, Alessio, Erika, Alessandro, Federica, Corrado. Grazie Prof. Giani e Prof. Beretta per la disponibilità e la cortesia con cui sempre mi avete consigliato.

Un ringraziamento speciale anche ad Arianna, Angie, Stefania.

E grazie

Ai miei Genitori.

Capitolo 1	1
1.1 Introduzione.....	1
1.2 Finalità e fasi della ricerca di dottorato	2
1.3 Inquadramento geologico strutturale dell'area.....	3
1.3.1 Assetto geologico, geomorfologico e idrogeologico dell'area.....	5
Capitolo 2	9
2.1 L'ammasso roccioso fratturato	9
2.2 Acquisizione dati	11
2.2.1 Rilievi geomeccanici di dettaglio	12
2.2.2 Rilievo Geomeccanico in sottterraneo	23
2.2.3 Acquisizione giaciture in aree localizzate.....	34
Capitolo 3	35
3.1 I dati statistici.....	36
3.1.1 Qualità e tipologia dei dati	36
3.1.2 L'approccio sperimentale.....	37
3.1.3 Tipologie di analisi e strategie di campionamento.....	39
3.1.4 L'analisi esplorativa dei dati	39
3.2 Analisi statistica dei dati raccolti.....	42
3.2.1 Spaziatura a grande scala delle famiglie di discontinuità	42
3.2.2 Apertura delle famiglie di discontinuità.....	53
3.2.3 Alterazione, riempimento e presenza d'acqua nelle famiglie di discontinuità	59
3.3 Analisi geostatistica dei dati.....	65
3.3.1 Introduzione teorica.....	65
3.3.2 Analisi geostatistica applicata al caso studio	73

Capitolo 4	99
4.1 La circolazione idrica in ammassi rocciosi	99
4.1.1 Influenza delle caratteristiche dei giunti sulla permeabilità.....	103
4.2 Modellazione numerica della circolazione idrica in ammassi fratturati.	113
4.2.1 Revisione bibliografica sullo studio della circolazione idrica negli acquiferi fratturati	113
4.2.2 Elementi fondamentali dell'approccio modellistico	115
Capitolo 5	121
5.1 Modelli probabilistici per la generazione di un reticolo fessurativo.....	123
5.1.1 Modello ortogonale	123
5.1.2 Modello discoidale di Baecher	124
5.1.3 Modello di Veneziano	125
5.1.4 Modello di Dershowitz.....	125
5.1.5 Il modello Enhanced Baecher	127
5.1.6 Il modello Nearest Neighbor	127
5.1.7 Il modello frattale di Levy-Lee	128
5.2 Caratteristiche di una frattura singola	130
5.2.1 Distribuzioni di probabilità per i poli delle fratture.	130
5.3 Generazione del reticolo di fratturazione	138
5.3.1 Definizione del dominio di generazione.	138
5.3.2 Scelta del modello geometrico di creazione delle fratture.	139
5.3.3 Individuazione e caratterizzazione delle famiglie di discontinuità.	140
5.3.4 Definizione dell'intensità di fratturazione.....	143
5.3.5 Definizione della forma e stima della distribuzione delle dimensioni delle fratture.....	149
5.3.6 Individuazione delle distribuzioni di probabilità dei parametri meccanici e idraulici delle fratture.	156

5.4	Generazione del reticolo di fratturazione	166
5.5	Validazione del modello.....	175
5.6	Modellazione di flusso	184
5.6.1	Introduzione teorica alla modellazione di flusso in FracMan	184
5.6.2	Implementazione dei modelli	190
5.6.3	Risultati della modellazione di flusso	196
5.6.4	Discussione dei risultati della modellazione di flusso	205
5.7	Analisi di stabilità.....	208
5.7.1	Introduzione teorica alle metodologie di analisi di stabilità dei blocchi.....	208
5.7.2	Analisi dimensionale dei blocchi applicata al caso di studio	216
	Conclusioni.....	225
	Bibliografia.....	231

1 Capitolo 1

1.1 Introduzione

Le proprietà di un ammasso roccioso dipendono, più che dalle proprietà del materiale roccia, dalle caratteristiche geometriche, meccaniche ed idrauliche del reticolo di fratture interseca la matrice rocciosa interrompendone la continuità. L'accurata caratterizzazione delle proprietà delle fratture è quindi un passo fondamentale per la previsione del comportamento geomeccanico dell'ammasso. La pratica geologica e geomeccanica ha sviluppato e definito nel tempo una serie di procedure standardizzate per l'indagine e la caratterizzazione degli ammassi rocciosi. (ISRM, 1981) Tali metodologie, che saranno nel seguito brevemente descritte, per quanto ampiamente utilizzate nella pratica, non sono sempre in grado di descrivere accuratamente le caratteristiche dei reticoli di discontinuità. Importanti sforzi sono tuttora in atto da parte della comunità scientifica internazionale per la definizione di metodologie robuste ed affidabili per lo studio e la caratterizzazione dei reticoli, in particolare per quanto riguarda la definizione delle relazioni tra la caratteristiche geometriche e strutturali delle fratture e gli effetti sulla circolazione idrica e la stabilità degli ammassi (ad esempio: Bagde e al., 2002; Kalenchuk e al., 2006; Park, 2005; Wang, 2002, ecc...).

La circolazione in ammassi rocciosi, infatti, avviene prevalentemente all'interno del reticolo di discontinuità primarie (stratificazione/scistosità) e/o acquisite (fratture, faglie, discontinuità) e dipende quindi dalle caratteristiche geometriche, topologiche e meccaniche del reticolo di fratture.

In questa tesi di dottorato vengono applicati procedimenti e metodi sviluppati della comunità scientifica internazionale, in particolare per quanto riguarda l'utilizzo di metodologie statistiche e geostatistiche applicate allo studio della variabilità spaziale dei parametri caratteristici e l'utilizzo di modelli stocastici per la simulazione dei reticoli di discontinuità. Le procedure e le metodologie d'analisi proposte sono state applicate ad un caso studio costituito da un ammasso di quarzo fratturato, sfruttato a scopo minerario e di conseguenza intersecato da una fitta rete di gallerie di coltivazione che ha permesso di studiarne le caratteristiche in superficie e nel sottosuolo, indagandone le distribuzioni generali e la variabilità spaziale.

1.2 Finalità e fasi della ricerca di dottorato

La ricerca eseguita è finalizzata alla ricostruzione delle caratteristiche del reticolo di fratturazione all'interno di un ammasso roccioso, volta all'individuazione dei rapporti e delle relazioni esistenti tra le caratteristiche del reticolo e i parametri idrogeologici e meccanici dell'ammasso. La parte principale dello studio è stata eseguita su un ammasso di quarzo sito in località Bosco del Sasso, nel comune di Sondalo, Sondrio. Il sito è stato selezionato in funzione della buona esposizione dell'ammasso, sia in superficie che in profondità, lungo la rete di gallerie realizzate per lo sfruttamento minerario del minerale.

Le fasi di lavoro e gli obiettivi raggiunti sono sintetizzati nei punti seguenti:

- Individuazioni delle relazioni geologico strutturali tra l'assetto tettonico dell'area e la configurazione spaziale del reticolo di fratture.
- Acquisizione, mediante campagne di rilevamento in sito, dei dati geometrici, geomeccanici e strutturali del reticolo di fratturazione.
- Studio delle caratteristiche topologiche, geomeccaniche e idrogeologiche del reticolo: individuazione delle leggi di distribuzione dei parametri e delle loro strutture di correlazione spaziale nell'area di studio.
- Implementazione di modelli numerici per la simulazione del reticolo di fratture. Validazione dei modelli mediante confronto tra i dati simulati e i dati rilevati sul terreno.
- Determinazione dei parametri idrogeologici dell'ammasso, studio delle modalità di flusso all'interno dell'ammasso.
- Analisi delle relazioni tra le caratteristiche delle fratture e il comportamento idrogeologico e meccanico dell'ammasso.
- Studio delle condizioni di stabilità delle gallerie: determinazione dell'entità e della tipologia di instabilità presente. Individuazione dei cinematismi di rottura e dei coefficienti di sicurezza in funzione delle caratteristiche del reticolo di fratture.

1.3 Inquadramento geologico strutturale dell'area di studio

Il sito di studio è stato individuato in un ammasso quarzoso situato nei pressi dell'abitato di Sondalo, in Alta Valtellina (Sondrio). Il filone è inserito nel contesto strutturale dell'Austroalpino Centrale e, più precisamente, nella falda Languard-Campo. La falda Languard-Campo è costituita da granuliti acide, gneiss migmatitici, paragneiss e micascisti a granato, biotite e sillimanite, gneiss a biotite, anfibolo e clorite, micascisti a mica chiara, granato e clorite, marmi e rocce carbonatiche a silicati, quarziti, anfiboliti a granato e clinopirosseno, ortogneiss, pegmatiti a tormalina e granato e corpi intrusivi da acidi a basici di età permiana. Il filone quarzifero è oggetto di coltivazione mineraria, eseguita fino ai tardi anni ottanta in open-pit e, attualmente, in sottosuolo secondo uno schema di coltivazione a camere e pilastri sviluppato su tre livelli in gran parte sovrapposti, impostati in corrispondenza dei limiti laterali del giacimento. L'area è situata in corrispondenza del contatto tra gli intrusivi del Gabbro di Sondalo e il basamento. Nella zona sono presenti in ordine di importanza decrescente, gneiss, anfiboliti, dioriti e gabbri (Figura 1.1 e 1.2). Il dettaglio della legenda mostra le unità affioranti in zona; il riquadro azzurro mostra la cava di quarzo.

La formazione degli Scisti di Pietra Rossa mostra diversi gradi di metamorfismo (Bonsignore G., Ragni U; 1968) e raggruppa in sé una diversa gamma di rocce, con reciproci passaggi attraverso una gran varietà di termini di transizione. Numerose e caratteristiche della formazione appaiono le intercalazioni di quarziti, anfiboliti e gneiss, simili a rocce migmatitiche di tipo embrechtico (Bonsignore G., Ragni U; 1968). Sono presenti anche molte rocce filoniane come le apliti-pegmatiti e le porfiriti che appaiono in connessione genetica con le masse intrusive (Figura 1.1).

Il complesso del Gabbro di Sondalo occupa un' area di circa 40 km² ed è composto da rocce intrusive tipo noriti, troctoliti e dioriti. In località Le Prese si rinviene il litotipo tipo del Gabbro di Sondalo, un bancone di gabbro olivino (troctoliti) (15-20% di olivina) avente uno spessore di circa 300 m, incluso entro gabbri con quantità variabile di pirosseno rombico (noriti). Nelle noriti a tendenza anortositica il plagioclasio, che diviene il 70% dei componenti totali, ha un contenuto di anortite che passa dal 55-60% al 70-75%. Quando scompare il pirosseno rombico si possono ritrovare dei gabbri anfibolici ad orneblenda primaria o con anfibolo secondario (ferroactinolite) in sostituzione del pirosseno. Si rinvengono anche delle gabbro-dioriti e dioriti, passanti talvolta a granodioriti. In queste rocce la percentuale di anortite del plagioclasio scende al 40-45%, mentre compare la biotite e, nei tipi più acidi, il feldspato potassico (Potenza 1970).

Le numerose datazioni effettuate sul Gabbro di Sondalo concordano nel datare il corpo intrusivo al Permiano.

L'intrusione del corpo gabbroico risale probabilmente alla fase di apertura dell'oceano Ligure Piemontese e mostra un arricchimento in elementi come Nd-Sr-O indicativi di un meccanismo di formazione per cristallizzazione frazionata con conseguente contaminazione crostale (ACF) (Tribuzio et al. 1987). Il magma originario è stato ipotizzato ad affinità Tholeitica.

La messa in posto di questi gabbri permiani è comunque ancora dibattuta, e molti autori ritengono che questi fusi gabbroici siano il risultato del collasso della catena Varisica e non dell'apertura dell'oceano.



Figura 1.1: Stralcio (ingrandito) del Foglio 8 - BORMIO della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100000 (in viola il filone, il riquadro indica la cava).

Il Gabbro di Sondalo mostra comunque tessitura ignea prevalentemente indeformata che ne avevano erroneamente fatto attribuire l'origine alla fase Alpina. La messa in posto di questo corpo intrusivo è stata successivamente stimata a 300-260 Ma.

La ricostruzione delle fasi deformative che hanno interessato l'area del giacimento ha permesso l'identificazione di cinque fasi, di cui due pre alpine e tre alpine. Le fasi alpine, registrate sia dagli incassanti sia dall'intrusivo permiano del Gabbro di Sondalo, sono caratterizzate da pieghe

e zone di taglio a scala da metrica a decametrica e dallo sviluppo di foliazioni e lineazioni. La D3 si sviluppa in condizioni di facies anfibolitica ad epidoto, mentre i fabric sin-D4 e sin-D5 registrano la retrocessione in Scisti Verdi (Gazzola e al., 2000; Spalla e al., 2000 e 2004).

1.3.1 Assetto geologico, geomorfologico e idrogeologico dell'area.

La fase di indagine geomeccanica è stata preceduta da una campagna di rilevamento geologico e geomorfologico dell'area di studio finalizzata alla ricostruzione dei rapporti strutturali tra i litotipi presenti. Particolare attenzione è stata rivolta all'individuazione delle sorgenti naturali presenti nell'area che sono state caratterizzate in termini di portata e classificate in base al loro contenuto salino misurato con l'ausilio di un conduttimetro portatile. Si è quindi cercato di identificare le relazioni tra la posizione delle sorgenti e i caratteri geologico strutturali dell'area.

L'assetto geologico nell'area di studio mostra il limite tra il gabbro e l'incassante posto intorno a quota 1800-1900 m. Il limite ha andamento irregolare e tende ad abbassarsi nella porzione orientale dell'area di studio. Al di sopra del limite affiora il Gabbro di Sondalo in maniera continua fino al limite settentrionale del bacino idrogeologico di pertinenza dell'area di cava. Al di sotto del limite l'assetto geologico è notevolmente irregolare e si osservano numerose alternanze litologiche tra l'incassante e il Gabbro che forma numerose propaggini interdigitate con l'incassante. L'area presenta di conseguenza una conformazione litologica molto complessa che vede, al di sotto dei 1800 m s.l.m., una continua alternanza tra corpi a tessitura scistosa (gneiss) intercalati a lenti, filoni e propaggini dell'intrusione gabbbrica (Figura 1.2).

L'assetto idrogeologico dell'area si caratterizza per la presenza, nella parte alta del versante dallo spartiacque del bacino idrogeologico di pertinenza fino a quota 1800 m s.l.m. circa, di un'area priva di reticolo di drenaggio superficiale permanente. La porzione superiore di quest'area ha assetto sub pianeggiante localmente convesso, ed è sede di zone di ristagno idrico e di piccoli laghetti effimeri che si formano nella stagione del disgelo. Quest'area si mostra quindi come particolarmente favorevole all'instaurarsi di condizioni di infiltrazione ed è stata di conseguenza ipotizzata come area di ricarica del sistema idrico sotterraneo.

L'assetto strutturale del gabbro si caratterizza per la presenza di un reticolo di fratturazione ben sviluppato, formato da 3 sistemi di discontinuità principali che suddividono l'ammasso in blocchi a forma di parallelepipedo con volumi rocciosi unitari dell'ordine di 1 m³ circa. Nelle porzioni prospicienti il limite con il filone quarzoso, l'assetto strutturale si complica, le giaciture delle discontinuità appaiono molto più disperse e i volumi rocciosi unitari diminuiscono

notevolmente. In vicinanza del contatto tra il quarzo e l'incassante le caratteristiche geomeccaniche degli ammassi subiscono quindi un sostanziale peggioramento, con bassi valori di GSI (30-40) connessi ad un'elevata intensità di fratturazione. Queste aree possono quindi costituire zone ad elevata permeabilità capaci di immagazzinare e trasmettere notevoli volumi idrici. La posizione delle sorgenti nell'area circostante la cava sembra in relazione con i contatti litologici. Non sono state individuate sorgenti di rilievo nella porzione sovrastante il contatto superiore tra micascisti e gabbro. Le uniche evidenze di circolazione idrica rilevate in quest'area sono relative a locali emergenze di circolazione di subalveo, individuate lungo gli impluvi a monte dell'area di cava. Tali venute idriche sono comunque assai limitate tanto che in nessun caso è stato possibile misurarne la portata, mancando di fatto un flusso idrico intercettabile.

Al di sotto del contatto gabbro-incassante sono invece presenti numerose sorgenti, con portate misurate tra 0.1 e 2 l/s, in regime di morbida. Le sorgenti affiorano in genere da materiali di copertura morenica in una fascia sviluppata a ovest della cava, tra quota 1600 e 1700 m s.l.m. (Figura 1.2). Le relazioni geometriche tra la fascia sorgiva e i contatti litologici sono compatibili con l'ipotesi di sorgenti per limite di permeabilità, imputabile alla minor permeabilità dell'incassante (gneiss) rispetto al sovrastante gabbro. L'analisi strutturale eseguita sugli affioramenti ha permesso di confermare quest'ipotesi individuando una minor intensità di fratturazione dello gneiss rispetto al gabbro. L'emergenza effettiva della fascia sorgiva è ubicata a quota inferiore rispetto alla presunta emergenza idrogeologica in corrispondenza del contatto, in conseguenza del deflusso sub superficiale delle acque all'interno delle spesse coperture di natura glaciale e detritica. Tra le sorgenti appartenenti a questo gruppo, quelle posta a quota più elevata, ubicate circa 100 m a NW del ciglio della scarpata di cava, sono attualmente secche pur essendo state in passato captate a scopo idropotabile. L'esaurimento delle sorgenti è attribuibile al drenaggio dell'acquifero indotto dallo scavo delle gallerie di coltivazione del giacimento.

Oltre alle sorgenti per limite di permeabilità sono presenti alcune sorgenti in corrispondenza delle intersezioni tra alcuni importanti lineamenti strutturali e le depressioni topografiche. Le sorgenti di questo tipo mostrano in genere portate maggiori e sono a carattere permanente tanto che in alcuni casi vengono captate da reti acquedottistiche. L'analisi effettuata sul contenuto salino delle acque sorgive, valutato in maniera approssimata dalla conducibilità elettrica delle acque, si è mostrato piuttosto omogeneo per tutte le sorgenti indagate, con valori di conducibilità compresi tra 80 e 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con i valori più elevati misurati in corrispondenza delle acque affluenti in cava. I bassi valori di conducibilità e la mancanza di analisi dettagliate sul contenuto ionico delle acque non hanno permesso di valutare con certezza la profondità e l'estensione dei

percorsi idrici nell'ammasso. Sulla base dei dati disponibili parrebbe comunque che le acque affluenti in cava seguano circuiti di deflusso più profondi rispetto alle acque delle sorgenti circostanti. Non si può comunque escludere una leggera contaminazione delle acque di cava legata all'attività estrattiva che potrebbe spiegare il piccolo incremento di conducibilità.

L'assetto idrogeologico del territorio in esame appare quindi caratterizzato da una circolazione idrica distribuita all'interno del reticolo di fratturazione del gabbro, alimentata dall'infiltrazione di acque meteoriche e di fusione nivale infiltrate prevalentemente nell'ampia conca paludosa ubicata a quote superiori ai 2300 m s.l.m.. Un sistema di fratture di rilascio, collegate alla tettonica gravitativa di versante, è estensivamente sviluppato nella porzione superiore del versante ed esercita un ruolo primario nel favorire l'infiltrazione e la trasmissione di importanti volumi idrici verso le porzioni profonde dell'ammasso. L'analisi delle foto aeree ha inoltre evidenziato una serie di lineamenti strutturali orientati approssimativamente NNE-SSW e NNW SSE, evidenti su tutto il versante a monte dell'area di cava. Il rilevamento di terreno ha confermato la presenza di questi elementi strutturali, morfologicamente evidenziati da numerose scarpate tettoniche ad andamento obliquo rispetto al versante e da impluvi molto stretti senza alcuna evidenza di circolazioni idrica superficiale. I rilievi geomeccanici effettuati sugli affioramenti esposti in corrispondenza degli elementi strutturali hanno evidenziato una qualità della molto scadente, con elevato stato di fratturazione e marcata alterazione degli ammassi (RGM 13 e 17). Le sorgenti a maggior portata individuate nell'area sono ubicate in corrispondenza delle intersezioni tra i lineamenti tettonici e gli impluvi che drenano il versante. I lineamenti tettonici si configurano quindi come strutture idrogeologiche molto conduttive, responsabili della trasmissione di fluidi dalla parte alta del versante verso l'area di cava.

In figura 1.2 è riportata la carta geologica di dettaglio rilevata nell'area di studio. Nella carta sono indicati, oltre alle litologie affioranti, i principali lineamenti strutturali, le sorgenti e le coperture quaternarie individuate sul terreno e mediante foto interpretazione.

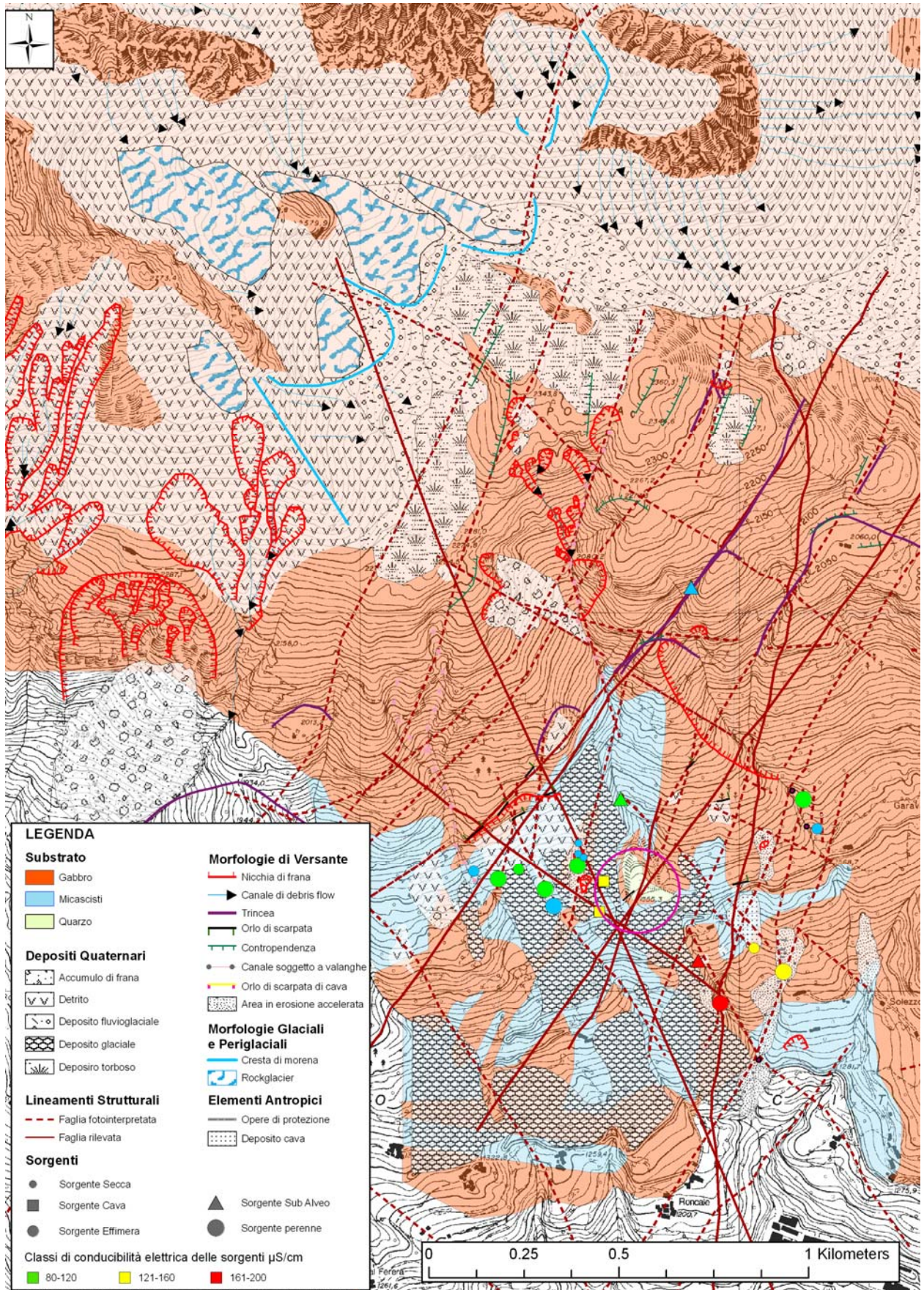


Figura 1.2: Carta geologico-geomorfologica dell'area di studio. Il cerchio viola evidenzia l'area della cava.

2 Capitolo 2

2.1 L'ammasso roccioso fratturato

Un ammasso roccioso è costituito dal materiale roccia e dalle discontinuità. Con il termine discontinuità si intende ogni elemento a geometria planare o curvi-planare che ha avuto origine in conseguenza alla deformazione fragile subita dalla roccia sotto l'effetto di un determinato campo di sforzi, eccedente il valore della resistenza della roccia.

Le caratteristiche geometriche di una discontinuità, o frattura, vengono definite da un set di parametri caratteristici quali la sua lunghezza, la forma, la posizione spaziale del suo centro di gravità, la sua orientazione media. Le caratteristiche idrauliche e meccaniche della frattura dipendono inoltre dall'apertura, dal grado di planarità a grande scala, dalla rugosità, dalla resistenza a compressione monoassiale delle pareti, dall'alterazione, dalla presenza di riempimento e dall'area di contatto tra le pareti opposte della discontinuità. Le discontinuità possono essere suddivise in due tipologie principali sulla base del movimento relativo tra le pareti: fratture per estensione (opening fractures), in cui il movimento è prevalentemente normale al piano della frattura e fratture per taglio, caratterizzate da movimento parallelo al piano della frattura. Poiché le fratture rappresentano la risposta della roccia ad un determinato campo di sforzo, si riscontra un certo grado di dipendenza tra lo stato di sforzo e le caratteristiche delle fratture che esso produce. È quindi possibile raggruppare le fratture presenti in un ammasso roccioso in set, o famiglie, caratterizzati da proprietà geometriche e meccaniche simili. Tali fratture sono dette sistematiche e si contrappongono a quelle non sistematiche che mostrano invece orientazioni e proprietà molto irregolari e non sono facilmente correlabili ad un determinato campo di sforzo. Sulla base della loro dimensione le discontinuità si dividono in microscopiche, se hanno lunghezza inferiore a 1 mm, e macroscopiche. Le microfratture non hanno in genere caratteri di sistematicità e formano la porosità della matrice rocciosa nelle rocce cristalline; in quelle sedimentarie è inoltre presente anche una porosità primaria costituita dalle cavità intergranulari non totalmente eliminate durante il processo di litificazione. Le fratture a scala macroscopica sono in genere di tipo sistematico, e sono quindi raggruppabili in set la cui orientazione media dipende dalla direzione del campo tensionale in cui si sono formate. In questa categoria rientrano sia fratture di trazione che di taglio, con le seconde che divengono prevalenti all'aumentare della dimensione della discontinuità. A scala megascopica le discontinuità si presentano come zone di taglio o faglie, definibili come discontinuità planari caratterizzate da spostamento relativo dei due lembi prevalentemente parallelo alla discontinuità e geneticamente legate ad un

evento tettonico di larga scala. La permeabilità di una faglia dipende dalla tipologia di riempimento presente (breccia di faglia, milonite e gauge), dall'estensione della zona di disturbo tettonico nella porzione di ammasso prospiciente la faglia e dal campo tensionale in cui è inserita. Le faglie e le zone di taglio ad esse associate rappresentano comunque zone intensamente fratturate ad elevata permeabilità ed assumono un ruolo in genere dominante nella definizione del sistema di circolazione sotterraneo, essendo sede preferenziale dei percorsi di flusso all'interno dell'ammasso.

Caratterizzazione delle discontinuità

Poiché la permeabilità di un ammasso roccioso dipende in primo luogo dalla geometria e delle caratteristiche del reticolo delle discontinuità, una loro accurata descrizione e caratterizzazione rappresenta il passo fondamentale per lo studio del comportamento idraulico dell'ammasso. Le discontinuità sono state caratterizzate mediante l'esecuzione di Rilievi GeoMeccanici (RGM) in affioramento planare, lungo linee di scansione o rilevando le discontinuità che intersecano fori di sondaggio e tunnel sotterranei scavati per la coltivazione del giacimento. I dati raccolti sul terreno sono stati successivamente analizzati con metodologie statistiche finalizzate all'individuazione delle distribuzioni di probabilità associate ad ogni parametro delle discontinuità. L'approccio di tipo stocastico utilizzato ha permesso di ridurre sensibilmente le incertezze legate alla metodologia di acquisizione dei dati.

La fase di acquisizione dati è stata condotta seguendo le indicazioni procedurali suggerite dalla Società Internazionale di Meccanica delle Rocce (ISRM) che ha definito una metodologia standardizzata per l'esecuzione dei rilievi geomeccanici (ISRM, 1981)

I parametri da rilevare per la descrizione delle discontinuità sono riassunti nell'elenco seguente:

- Orientazione
- Spaziatura
- Persistenza
- Rugosità
- Resistenza delle pareti (JCS)
- Apertura
- Riempimento

- Stato idrico
- Numero di set
- Dimensione rappresentativa dei blocchi

2.2 Acquisizione dati

L'indagine di terreno, eseguita nell'area di cava e nell'immediato intorno, è stata eseguita allo scopo di acquisire un database di informazioni georeferenziate sulle caratteristiche meccaniche e strutturali del reticolo di discontinuità, il più completo e rappresentativo possibile, da sottoporre alle successive analisi statistiche e geostatistiche, finalizzate all'individuazione delle caratteristiche dell'ammasso. La fase di indagine e acquisizione dei dati è stata accuratamente programmata seguendo una strategia di campionamento riassunta nei seguenti passaggi metodologici:

- Inquadramento territoriale e acquisizione del materiale bibliografico.
- Pianificazione dell'attività conoscitiva.
- Definizione del supporto e campionamento.
- Analisi statistica preliminare sui dati raccolti.
- Scelta dei test per l'inferenza.
- Analisi della struttura spaziale delle variabili.
- Elaborazione di mappe tematiche per l'organizzazione e la presentazione dei dati.

L'indagine è stata effettuata nell'area di cava e nell'immediato intorno, sia in superficie che in sotterraneo, focalizzando comunque l'attenzione su quest'ultima porzione. Grazie alla fitta rete di tunnel che interseca l'ammasso permettendone l'osservazione, è stato possibile acquisire una notevole mole di dati, nel modo il più possibile continuo, completo ed organico. A tal proposito, essendo l'indagine focalizzata sull'individuazione delle caratteristiche geometriche e meccaniche dei sistemi di fratture che interessano l'ammasso di quarzo, la caratterizzazione ha riguardato principalmente la porzione interessata dall'attività estrattiva. Alcune porzioni dell'area di cava sono state inizialmente escluse dalla fase di rilevamento eseguita nell'estate/autunno 2009, perché non accessibili o eccessivamente pericolose per l'incolumità personale; fra queste i cameroni presenti nella porzione centro-orientale dell'ambito estrattivo che mettono in comunicazione diretta il secondo livello (posto a quota 1508 m s.l.m.) con quello più basso (1490 m s.l.m.), e le gallerie costantemente percorse dai

mezzi di servizio durante le operazioni di esercizio della cava. Alcune aree, non accessibili nell'estate 2009, sono state successivamente rilevate ed i dati raccolti sono stati utilizzati per validare metodi e risultati delle interpolazioni geostatistiche e delle simulazioni effettuate, permettendo così di valutare l'affidabilità della stima nelle aree non indagate direttamente.

La metodologia di acquisizione dei dati si compone di due strategie principali di campionamento finalizzate all'acquisizione di informazioni sull'ammasso e sul reticolo delle discontinuità indagati a scale diverse.

La prima metodologia ha previsto l'esecuzione di rilievi geomeccanici sui fronti di scavo della cava e in posizioni casualmente ma, per quanto possibile, omogeneamente distribuite lungo i piedritti dei tunnel sotterranei. L'esecuzione dei rilievi geomeccanici di dettaglio ha permesso di indagare alla scala dell'affioramento (qualche decina di m²) le caratteristiche del reticolo, considerando tutte le fratture, indipendentemente dalle loro dimensioni.

La seconda metodologia di acquisizione ha previsto l'esecuzione di rilievi geomeccanici in galleria eseguiti in continuo, focalizzati sulla caratterizzazione delle strutture ad elevata persistenza intercettate dalle gallerie di coltivazione che attraversano l'ammasso. Una terza modalità di acquisizione completa poi le prime due con l'acquisizione di dati giacitureali lungo stendimenti o in aree localizzate.

Le tre metodologie di indagine sono approfonditamente descritte nei paragrafi successivi.

2.2.1 Rilievi geomeccanici di dettaglio

I Rilievi Geo-Meccanici (di seguito RGM) sono stati eseguiti seguendo lo standard procedurale suggerito dall'International Society of Rock Mechanics (ISRM 1981) rilevando le proprietà meccanico-strutturali necessarie a valutare le caratteristiche di resistenza, deformabilità e comportamento idrogeologico del mezzo geologico studiato.

L'esecuzione dei rilievi di dettaglio è volta ad indagare alla piccola scala le caratteristiche del pattern di fratturazione, in modo tale da raccogliere tutte quelle informazioni di dettaglio che vengono necessariamente trascurate nel "rilievo geologico continuo in sotterraneo", descritto in seguito. I rilievi sono stati eseguiti utilizzando una scheda di raccolta dati standard, nella quale viene richiesta la misura di un cospicuo numero di dati giacitureali inerenti i diversi piani di discontinuità, oltre all'intercetta orizzontale e verticale, spaziatura, persistenza, apertura, rugosità, ondulazione, alterazione, tipo di riempimento e condizione di filtrazione per ogni famiglia individuata. In Figura 2.1 sono ubicati i 19 RGM eseguiti: nel riquadro ingrandito

sono mostrati i 13 relativi all'area di cava, 5 in esterno e 8 in sotterraneo, di cui 2 al primo livello, 4 su quello intermedio ed uno ciascuno sulle rampe di collegamento fra gli stessi.

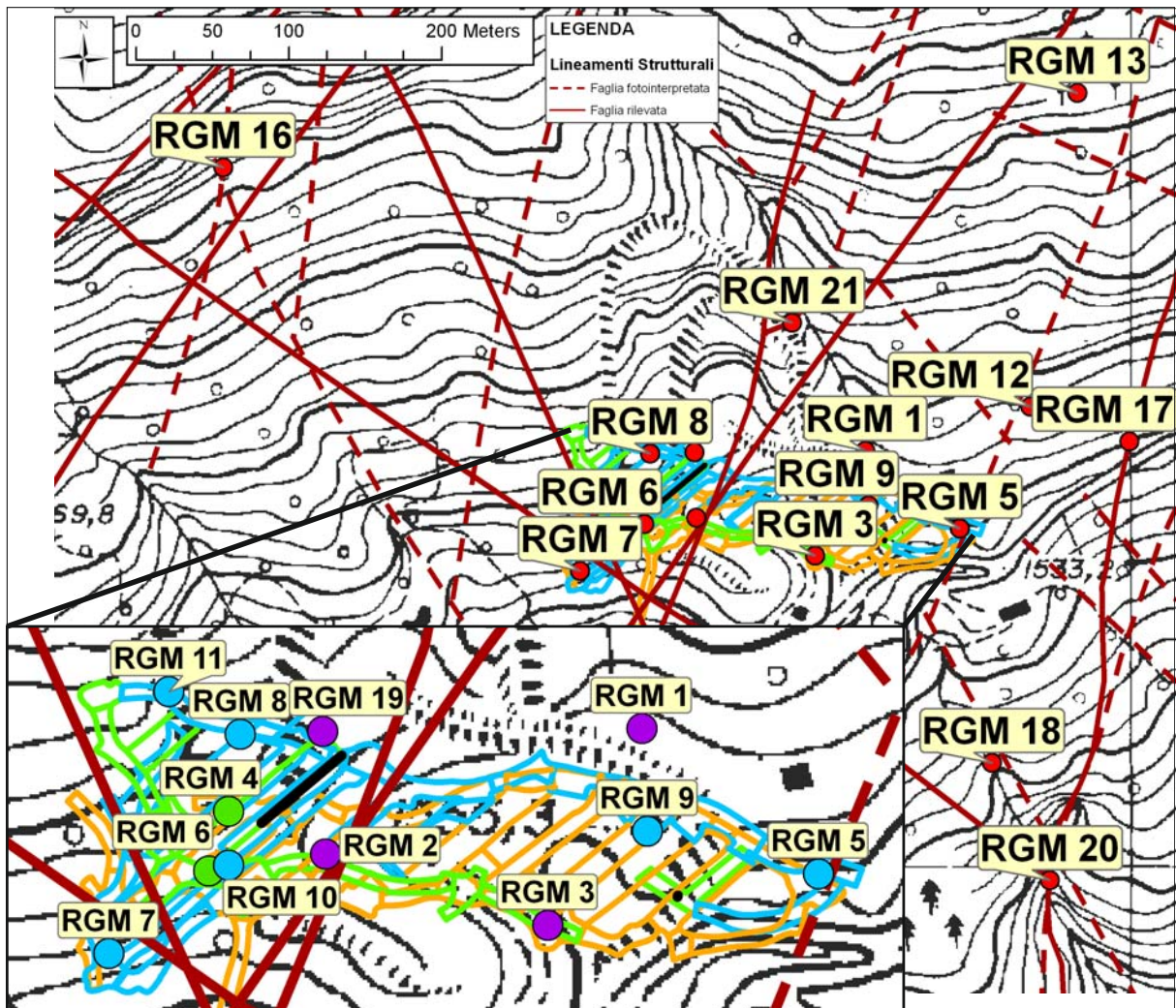


Figura 2.1 Planimetria dell'area di cava ed ubicazione dei RGM: La classificazione dei simboli degli RGM è stata fatta con la seguente corrispondenza: viola esterno; verde = in sotterraneo al livello 1 - quota 1518 m s.l.m.; azzurro = in sotterraneo al livello 2, quota 1508 m s.l.m.

Per ogni RGM è stata redatta una scheda di elaborazione e sintesi dei dati, corredata da tabelle e grafici riassuntivi delle caratteristiche del reticolo di fratturazione e da una tabella riassuntiva per la classificazione dell'ammasso e la stima dei parametri di resistenza e deformabilità. Nel testo si riporta, a titolo di esempio, la scheda riassuntiva dell'RGM 2 svolto nell'unità di quarzo (Figura 2.2), rappresentativo delle famiglie di fratture in seguito trattate.

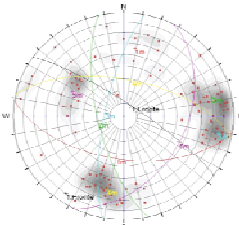
DESCRIZIONE DEL SITO E DELL'AMBIENTE ROCCIOSO					RGM 2
Stazione n°	RGM 2_001		Data	19/08/2008	
Rilevatore	G		Località	Rocca del Sasso - Sarnano	
Alt. Catalogazione	G		Quota (m) s.l.m.	1555	
Coordinate (Gauss-Boaga)	Long.	19977 95	Lat.	9333229	
VERGHE Orientazione media	Inclin. (°)	7899	Direzione (°)	0	
AFFORRAMENTO Orientazione	Inclin. (°)	3989	Area (m ²) (PL)	60	
Esposizione	G				

DESCRIZIONE GEOLOGICA


Il giacimento è costituito da una grande lente di quarzo puro, da vitro a lattes, a bande di calcite, con detriti quarzacei lenticolari a gabbro, mica e vermiculite di quarzofiche in forma lussuosa. La lente è incassata in rocce stelli costituite da un corpo intrusivo di natura gabbro-dioritica (gabbro di Sarnano) e da microcristalli biotico-granitiferi e vermiculite grigio chiaro a lenticole di quarzo (gravel e rilascevoli del Tonello), presentanti fessure con metamorfismo di contatto.

DISCONTINUITA'	SET	TIPO*	ORIENTAZIONE	
			Inclin. (°)	Incl. (°)
			Bd	JN
K1	JN	189	53	
K2	JN	257	71	
K3	JN	291	78	
K4	JN	12	61	
other	JN	117	43	

PROIEZIONE STEREOGRAFICA
(Reticolo di Schmidt - emisfero inferiore)
poli delle discontinuità



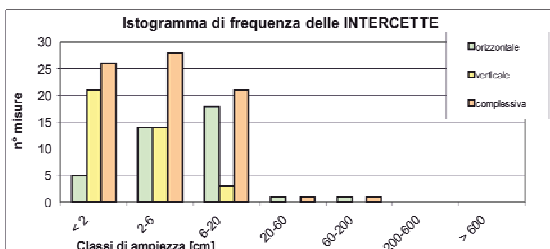
GS1
45



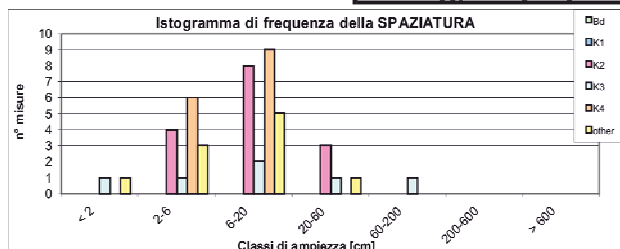
DESCRIZIONE DEL SITO E DELL'AMBIENTE ROCCIOSO												RGM 2	
SET	TIPO*	Orientazione		Spaziatura media [cm]	Percolazione	Apertura [mm]	Alterazione	Rugosità		Resistenza JCS [MPa]	Ripulimento	Presenza d'acqua	Angolo d'attrito (°)
		Inclin. (°)	Incl. (°)					Ordulazioni	JRC				
K2	JN	257	71	14	50% < PL < 90%	0.37	W2	IV (OBC)	8	188	0	U II	54
K3	JN	291	78	20	PI < 50%	0.33	W2	IV (OBC)	8	146	0	U II	53
K4	JN	12	61	9	PI < 50%	0.46	W1	III (OBC)	8	144	0	U II	53
other	JN	117	43	11	50% < PL < 90%	0.48	W2	VII (PL)	6	100	0	U II	47

* = ° (°) per φ₁ = 1 (kN/m²) *

Istogramma di frequenza delle INTERCETTE

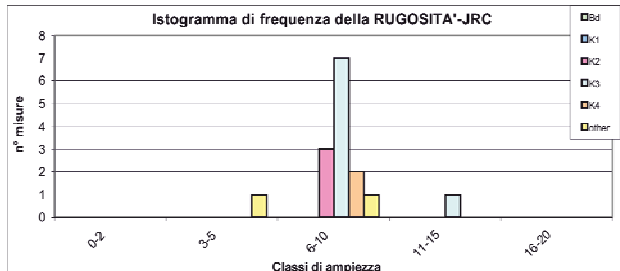


Istogramma di frequenza della SPAZIATURA



INTERCETTE - complessiva	
MODALE I [cm]	2.6
Classe modale *	Molto stretta
MEDIA I [cm]	7
Deviazione standard	8
Massima I _{max} [cm]	62
Minima I _{min} [cm]	1

Istogramma di frequenza della RUGOSITA' JRC



PARAMETRI DEL MATERIALE ROCCIA		
Angolo di attrito di base φ _b	(°)	Assunzioni 36
		Dati sperimentali LAB

CLASSIFICAZIONI DELL'AMMASSO ROCCIOSO				RGM 2 QZ	
INDICE DI FESSURAZIONE VOLUMETRICA ROCK QUALITY DESIGNATION		Jv		32.58	
		RQD % (ISRM,1981)		10	
PARAMETRI DI RESISTENZA E DEFORMABILITA' del materiale ROCCIA					
CLASSE LITOTECNICA (M.I.T.)	ROCCIA MOLTO RESISTENTE		R 5		
	Assunzioni		Dati sperimentali LAB		NOTE
Peso di volume [kN/m ³]	26				
Resistenza a compressione uniassiale s _{cd} [kN/m ²]	150		140		JCS
Modulo elastico E _r [GPa]	42				
Rapporto di Poisson n	0.3				
Angolo di attrito di base phi_b [°]	36				
BASIC GEOLOGICAL DESCRIPTION (ISRM, 1981)	SPAZIATURA		L	4	
	INTERCETTA delle FRATTURE		F	4	
	RESISTENZA del materiale ROCCIA		S	2	
	ANGOLO DI ATTRITO DEI GIUNTI		A	1	
	ALTERAZIONE DELL'AMMASSO		W	2	
	BGD: L4 F4 S2 A1 W2				
ROCK MASS RATING (Bieniawsky, 1989)	RESISTENZA DEL MATERIALE ROCCIA			Coefficients	
	RQD (%)			12	
	SPAZIATURA DELLE DISCONTINUITA'			4	
	CONDIZIONI DELLE DISCONTINUITA'			7	
	persistenza			4	
	apertura			4	
	rugosità			3	
	riempimento			6	
	alterazione			5	
	VENUTE D'ACQUA			15	
	RMRb	61	CLASSE	2	
PARAMETRI DI RESISTENZA E DEFORMABILITA' DELL'AMMASSO ROCCIOSO					
	SERAFIM & PEREIRA	HOEK & BROWN 2002	HOEK & DIEDERICHS		
Em [GPa] ¹⁴	12.000	7.499	12.580		
Km [GPa] ¹⁴	10.000				
Gm [GPa] ¹⁴	4.615				
μ [°] ¹⁴	36				
CRITERIO DI ROTTURA DI HOEK-BROWN E PARAMETRI EQUIVALENTI DI MOHR-COULOMB (HOEK-BROWN, 2002)					
PARAMETRI DI INPUT		PARAMETRI DELL'AMMASSO ROCCIOSO			
s ₀ [MPa]	150	s _t [MPa]	-0.0531768		
GSI	45	s _c [MPa]	2.61346		
m _i	20	s _{cm} [MPa]	19.1323		
D	0.7	E _m [MPa]	4402.03		
s ₃ max [MPa]	0.275624	c [MPa]	0.31076		
Applicazione	Slope Height	phi' [°]	62.8613		
Altezza pendio/ profondità tunnel [m]	10	MR	375		
mi = costante del materiale roccia D = fattore di disturbo h _c = resistenza a compressione dell'ammasso roccioso h _m = resistenza a trazione dell'ammasso roccioso h _{cm} = resistenza a compressione dell'ammasso roccioso (equivalenti Mohr-Coulomb) c' = coesione dell'ammasso roccioso φ' = angolo di resistenza al taglio dell'ammasso roccioso					
		SPAZIATURA MEDIA [cm]			
		Bd			
		K1			
		K2		14	
		K3		20	
		K4		9	
		K5		11	
		MEDIA		13	
Q-SYSTEM (Barton, 1974)	PARAMETRO		Coefficients		
	RDQ		10		
	Jn		15		
	Jr		3		
	Ja		1		
	Jw		1		
	SRF		0.5		
	Q		4		
	Corrispondenza RMR-Q		56.47664925		
	RMR = 9*LN(Q)+44				

Figura 2.2: Scheda riassuntiva dell'RGM 2, Quarzo (compresa immagine a pagina precedente)

I parametri di resistenza a compressione monoassiale e deformabilità della roccia intatta, necessari come input nei sistemi di classificazione, sono stati assunti sulla base delle informazioni riportate nella “Relazione tecnica riguardante il progetto di coltivazione (Mavaro e Premoli, 2004)”. I dati riportati nelle relazioni riguardano però quasi esclusivamente il quarzo; per il gabbro e lo gneiss è stato necessario stimarli mediante prove speditive in sito (JCS) o assumerli in base a indicazioni bibliografiche. In Tabella 2.1 vengono riportati i risultati ottenuti applicando tre diversi sistemi di classificazione geomeccanica (GSI, RMR e Q) ai 19 ammassi rocciosi oggetto di studio. Tutti i rilievi geomeccanici mostrano una qualità da sufficiente a buona senza mai raggiungere valori ottimi a causa dell'elevata fratturazione intrinseca al giacimento di quarzo, risultato delle diverse fasi

deformative a cui la lente è stata sottoposta. L'elevato stato di fratturazione osservato è comunque almeno in parte attribuibile al disturbo indotto dalle operazioni di scavo, effettuate con l'utilizzo di esplosivo. Nelle figure seguenti vengono presentati i grafici riassuntivi di alcuni parametri medi delle discontinuità, suddivise per RGM (Figura 2.3 e 2.4), un grafico con i valori dell'RMR, in cui sono visibili i contributi dei vari parametri in ingresso (Figura 2.5) e un confronto fra i punteggi ottenuti applicando le diverse classificazioni (Figura 2.6)

RGM	LITOLOGIA	UBICAZIONE	GSI	RMR	Q	CLASSE RMR	QUALITA' AMMASSO	APERTURA DISC. MEDIA (mm)	SPAZIATURA DISC. MEDIA (cm)	INTERCETTA DISC. MEDIA (cm)
RGM1	GNEISS	Esterno	50	67	5.3	II	Buona	1.75	32	14
RGM2 (quarzo)	QUARZO	Esterno	45	61	4	II	Buona	0.41	13	7
RGM2 (gabbro)	GABBRO	Esterno	60	65	10.2	II	Buona	1.31	30	13
RGM3	GNEISS	Esterno	55	66	6.6	II	Buona	1.33	30	23
RGM4	QUARZO	1°liv. Sottterraneo	60	53	4	III	Mediocre	0.16	5	6
RGM5	QUARZO	2°liv. Sottterraneo	50	57	2.2	III	Mediocre	0.46	10	8
RGM6	QUARZO	2°liv. Sottterraneo	65	54	2.67	III	Mediocre	0.36	11	10
RGM7	QUARZO	2°liv. Sottterraneo	60	56	2	III	Mediocre	0.23	16	25
RGM8	QUARZO	2°liv. Sottterraneo	70	66	16.67	II	Buona	0.35	16	12
RGM9	QUARZO	2°liv. Sottterraneo	60	52	2.67	III	Mediocre	0.21	10	12
RGM10	QUARZO	1°liv. Sottterraneo	50	47	2.2	III	Mediocre	0.64	9	7
RGM11	GNEISS	1°liv. Sottterraneo	40	54	3	III	Mediocre	0.56	33	18
RGM12	GNEISS	Esterno	40	66	11.6	II	Buona	1.22	32	16
RGM13	GABBRO	Esterno	50	57	3.6	III	Mediocre	1.67	14	10
RGM16	GABBRO	Esterno	55	66	7.3	II	Buona	1.91	33	16
RGM17	GABBRO	Esterno	45	59	3.8	III	Mediocre	1.4	20	21
RGM18	GABBRO	Esterno	50	74	15.2	II	Buona	0.85	47	36
RGM19	QUARZO	Esterno	55	73	16.4	II	Buona	2.11	53	32
RGM20	GABBRO	Esterno	45	60	2	III	Mediocre	0.53	33	60

Tabella 2.1: Prospetto riassuntivo dell'applicazione delle tre classificazioni geomeccaniche

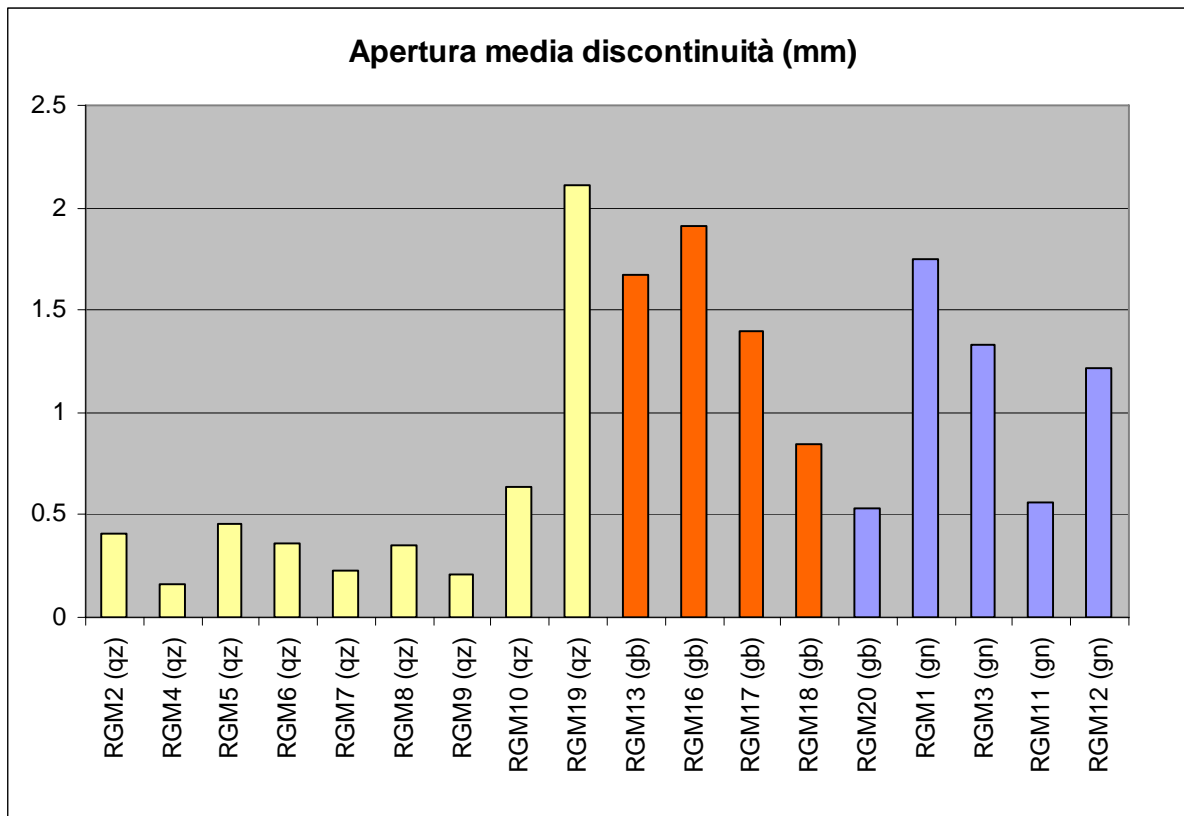


Figura 2.3: Apertura media delle discontinuità risultanti dalla sintesi dei RGM. Il colore delle barre è in funzione della litologia: giallo=quarzo; arancio=gabbro; violetto=gneiss

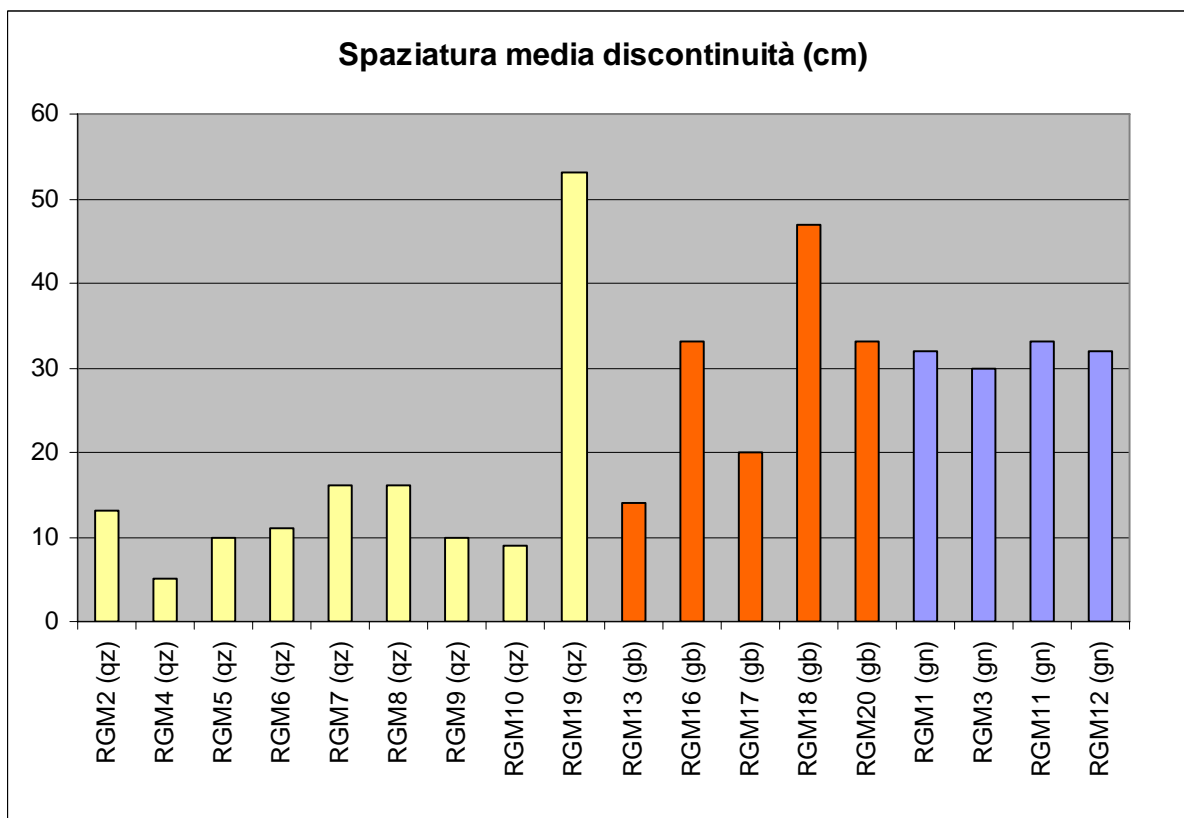


Figura 2.4: Spaziatura media delle discontinuità risultanti dalla sintesi dei RGM

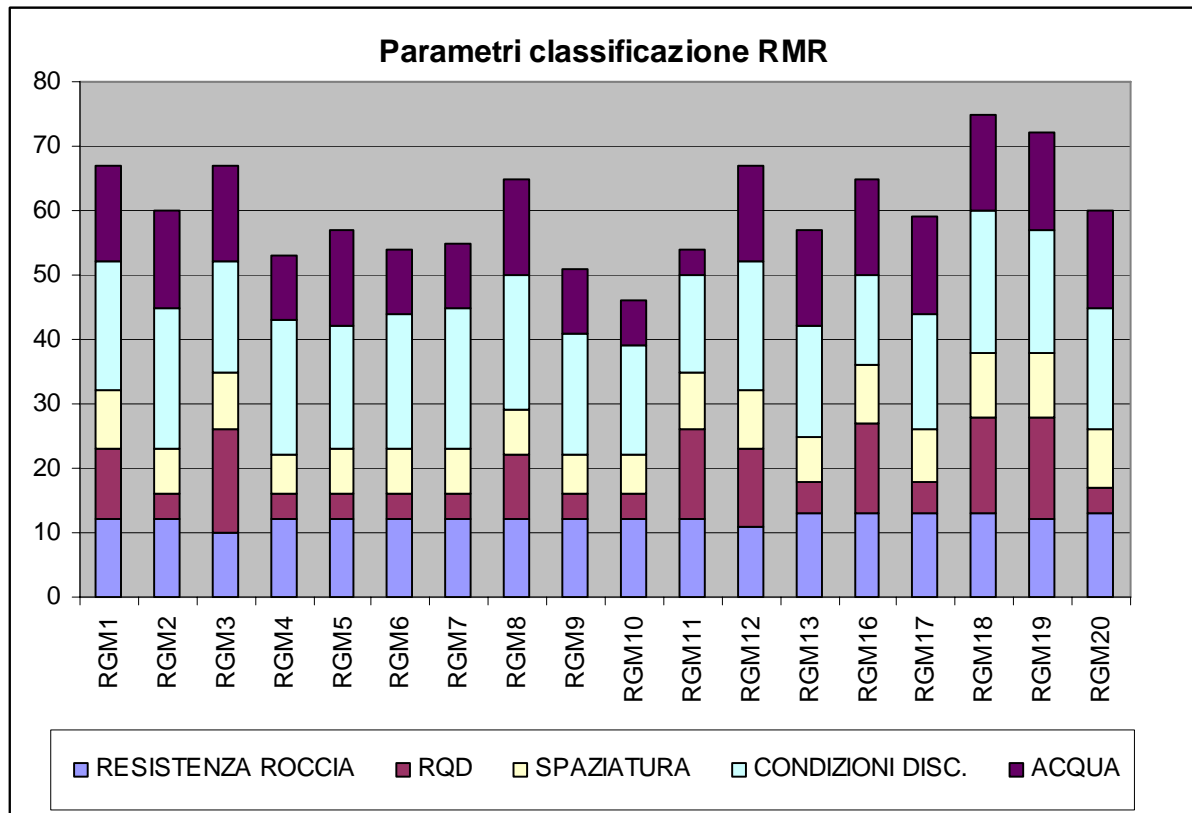


Figura 2.5 Parametri attribuiti per la classificazione RMR di Bieniawski

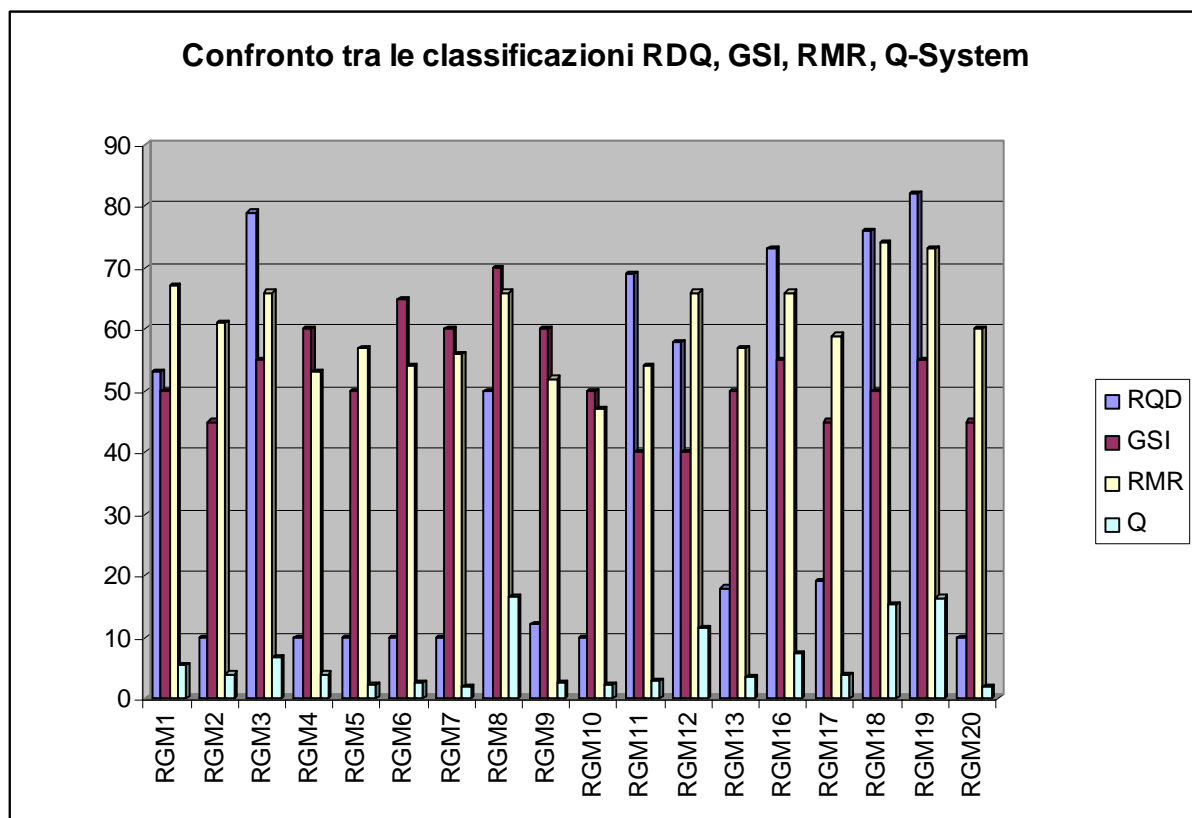


Figura 2.6: Confronto fra le classificazioni geomeccaniche RMR, GSI, RQD e Q-System

Sintesi dei risultati per ogni RGM

Si riporta di seguito la sintesi delle caratteristiche rilevate sugli affioramenti oggetto di RGM, ubicati nell'area di cava. I dati raccolti sugli affioramenti sono successivamente stati analizzati con metodologie statistiche per la definizione delle distribuzioni dei parametri delle discontinuità (vedi Capitolo 3) utilizzate per la modellazione del reticolo di discontinuità (vedi Capitolo 5).

L'RGM 1 posto in superficie, a quota 1582 m s.l.m. si trova all'interno dell'unità "Gneiss e micascisti del Tonale", sul fianco orientale della cava dismessa, a pochi metri dal contatto quarzo-incassante. Elementi caratteristici dell'affioramento sono l'elevata dispersione dell'orientazione delle giaciture e la conseguente difficoltà nell'individuare le famiglie di discontinuità. La quasi totalità dei giunti è chiusa, con assenza di riempimento e di circolazione idrica; le spazature medie sono dell'ordine di qualche decimetro.

L'RGM 2, posto in superficie a quota 1555 m s.l.m. è diviso in due porzioni in funzione delle diverse litologie presenti. L'incassante (gabbro) ed il quarzo sono quindi stati caratterizzati singolarmente, permettendo, tra l'altro, di valutare le differenze fra le caratteristiche delle due porzioni a diversa litologia. Nel quarzo, l'osservazione della proiezione stereografica mostra 4 set di fratture evidenti; rispetto alla litologia gabbbrica diminuiscono la spazatura, l'apertura e la rugosità delle pareti di discontinuità, mentre riempimento e contenuto idrico sono assenti. Il gabbro presenta giaciture molto più disperse ma una minor intensità di fratturazione rispetto al quarzo. Ciò è giustificabile con la diversa risposta delle due litologie ad uno stesso stato tensionale, ma potrebbe anche essere indicativo di una diversa storia tensionale delle due porzioni, con fasi deformative antiche registrate dal gabbro (incassante) ma non dal quarzo (intruso).

L'RGM 3 posto a quota 1552 m s.l.m. è ubicato al di sopra del portale in calcestruzzo, costruito nell'anno 2009, a protezione dell'imbocco della discenderia che conduce al primo livello sotterraneo. Rispetto all'RGM 1, anch'esso svolto su affioramenti gneissici, si individuano con maggior chiarezza 4 set di discontinuità i cui poli risultano poco dispersi intorno al valore medio; vengono inoltre confermate l'elevata spazatura fra i giunti così come l'assenza di riempimento e circolazione idrica. Le fratture sono moderatamente lisce con JRC compreso fra 6 e 10.

L'RGM 19 è stato effettuato in superficie a quota 1560 m s.l.m. sulla parete Nord della vecchia cava in esterno lungo un affioramento di area pari a circa 600 m².

L'ammasso è inalterato e solamente alcune fratture mostrano una lieve decolorazione. Sono ben evidenti 4 set di discontinuità, 3 dei quali presentano spaziatura media dell'ordine di 30-40 cm, mentre il set K5 è meno fitto e mostra valori dell'ordine del metro. L'apertura è di tutti i set ricade nella classe "aperta", con riempimento assente in tutti i set ed assenza di circolazione idrica. l'alterazione è minima,

Per l'ammasso è stato valutato un GSI pari a 55 e l'RQD è risultato pari a 82. I sistemi di classificazione geomeccanica applicati all'ammasso hanno fornito valori pari a 16.4 per il Q-System e 73 per l'indice RMR rientrando quindi nella classe II, buona.

L'ubicazione degli 8 rilievi eseguiti in sotterraneo è stata scelta secondo uno schema di campionamento casuale, adattato in funzione dell'accessibilità dei siti e delle condizioni di esposizione dei fronti. I siti di indagine sono quindi stati ubicati in maniera per quanto possibile omogenea all'interno dell'area di cava in modo tale da indagare le eventuali variazioni dei parametri in punti diversi dei livelli di coltivazione accessibili. In secondo luogo sono stati privilegiati gli affioramenti formati da pareti con orientazioni diverse (incroci fra gallerie) che permettono di osservare l'ammasso tridimensionalmente, garantendo la migliore esposizione delle strutture. Sono stati eseguiti rilievi geomeccanici sia nelle porzioni centrali della lente di quarzo costituente il giacimento che in corrispondenza dei contatti con l'incassante per verificarne analogie e differenze geologico - strutturali imputabili a una variazione del campo di sforzi.

L'RGM 4 è posizionato circa a metà di una camera di coltivazione posta al primo livello (quota 1518 m s.l.m.), è caratterizzato da 4 famiglie di discontinuità con spaziature molto strette che originano blocchi di volume roccioso unitario (VRU) di piccole dimensioni. Le discontinuità sono caratterizzate da aperture serrate, alterazione e riempimento assenti, ma con discreta presenza d'acqua lungo l'intera lunghezza dell'affioramento.

L'RGM 5 è ubicato nella porzione più orientale della cava, a pochi metri dal contatto con l'incassante, in corrispondenza dell'imbocco della rampa che conduce ad un livello di coltivazione superiore (quota 1520 m s.l.m.). Sono state individuate 3 famiglie di fratture, di cui quella con immersione nord è la meglio rappresentata e si presenta concentrata attorno al

valore medio. Caratteristica è la bassa rugosità (valori di JRC inferiori a 10), l'assenza di riempimento e la mancanza di acqua sulle pareti delle discontinuità. Le classificazioni geomeccaniche effettuate indicano (così come per l'RGM 11 proposto nel seguito) una mediocre qualità dell'ammasso roccioso. La scadente qualità complessiva è giustificata dalla posizione periferica, in prossimità del contatto con l'incassante, dove si risente maggiormente delle fasi intrusive/deformative che caratterizzano la messa in posto della lente quarzosa.

L'RGM 6 è collocato al centro della lente di quarzo formante il giacimento; così come l'RGM 4, trovandosi lontano da contatti litologici e lineamenti tettonici principali, può considerarsi rappresentativo delle condizioni generali della porzione interna dell'ammasso di quarzo. Le proiezioni stereografiche mostrano chiaramente la presenza di 4 famiglie di discontinuità (Figura 2.7). L'assetto geometrico delle fratture è piuttosto omogeneo per le tre famiglie ed è coerente con l'orientazione media dei set all'interno dell'intera area di cava, nonostante le variazioni giacitureali legate alle fasi deformative e fragili.

Le discontinuità che formano l'ammasso sono ondulate, chiuse, inalterate, senza presenza di riempimento e con una famiglia costantemente caratterizzata da circolazione idrica (stillicidio); la qualità complessiva è buona come dimostrato dall'applicazione delle classificazioni.

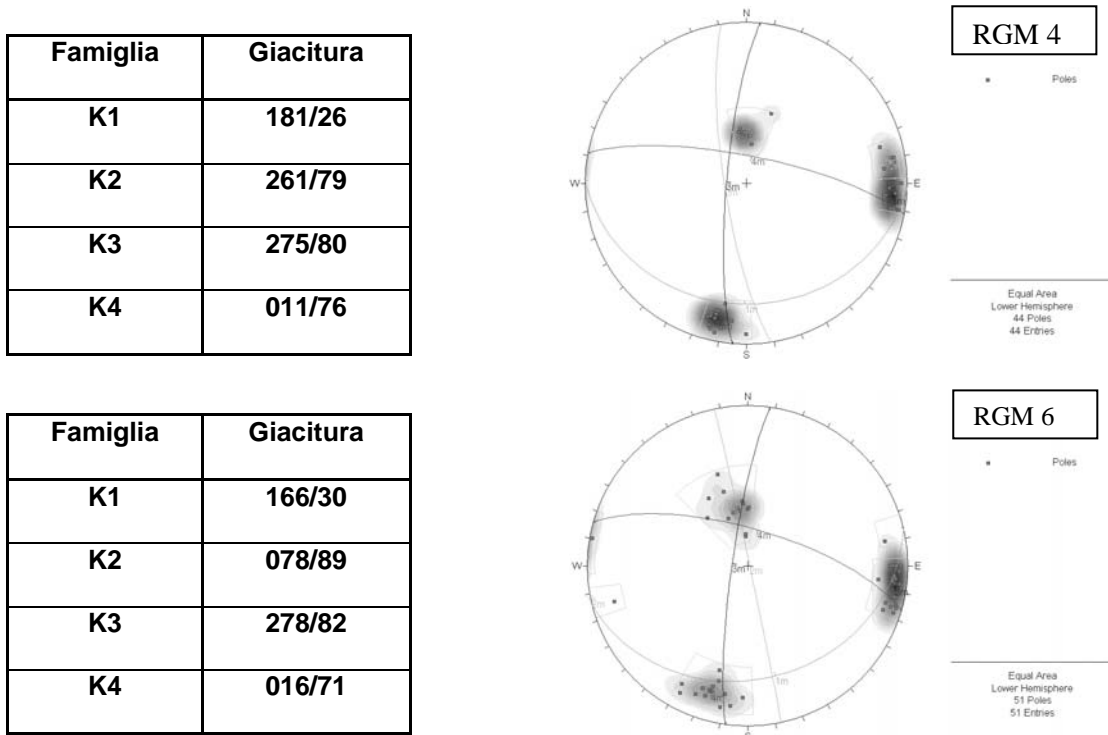


Figura 2.7: Proiezioni stereografiche e tabelle esplicative delle famiglie di discontinuità osservate in prossimità degli RGM 6 (in alto) e RGM 4 (in basso)

L'RGM 7 è posizionato a metà della rampa fra livello basso ed intermedio, in prossimità di una biforcazione verso un camerone di coltivazione; le famiglie di discontinuità non sono ben definibili a causa dell'elevata dispersione delle giaciture, imputabile alla vicinanza con il contatto e con la faglia più estesa. Le fratture sono chiuse, nonostante ciò un set presenta patine di riempimento coesivo probabilmente dovuto a deposizione di solidi in carico alle acque circolanti; la qualità globale dell'ammasso è risultata buona.

L'RGM 8 è posto all'imbocco della rampa che conduce al primo livello ed all'inizio di un camerone impostato a quota 1508 m s.l.m. Le caratteristiche peculiari rispecchiano quelle degli RGM 4 e 6 considerati rappresentativi dell'intero ammasso: discontinuità chiuse, poco o per nulla alterate, con riempimento assente e scarse venute d'acqua. La spaziatura è leggermente superiore alla media.

L'RGM 9, sul fondo di uno slargo lungo la strada di collegamento fra le camere di coltivazione al secondo livello (nella porzione orientale dell'area di cava), è caratterizzato da 3 famiglie di discontinuità ben definite; i giunti sono chiusi, inalterati e con spaziatura omogenea. Il set con immersione nord presenta materiali di riempimento di natura coesiva dovuti alla vicinanza con il piano campagna; questa famiglia mostra evidenze di flusso idrico particolarmente abbondanti e continue.

L'RGM 10 si trova al primo livello (quota 1518 m s.l.m.) in prossimità dell'imbocco della galleria di coltivazione in cui si è svolto anche il rilievo geomeccanico 4. Le 3 famiglie evidenziate rispecchiano molto bene quelle individuate in Figura 2.7; ancora una volta il set immergente verso nord presenta materiali di riempimento coesivi da relazionare a deposizione di particelle in carico alle acque, in associazione a venute d'acqua continue. L'area ha subito un'intensa fratturazione, giustificata dalla vicinanza della faglia principale che attraversa la zona di cava. Il disturbo tettonico mostrato dalla compagine rocciosa determina indici di qualità globale dell'ammasso piuttosto bassi (RMR 45).

L'RGM 11, ubicato all'inizio della rampa di raccordo fra primo e secondo livello, è stato effettuato in prossimità del contatto con l'incassante, che in questa porzione è costituito da gneiss. Anche in questo caso, come osservato in genere negli affioramenti di incassante in prossimità del contatto, si è riscontrata un'elevata dispersione dell'orientazione dei giunti, tale

da rendere quasi impossibile il raggruppamento in famiglie delle discontinuità. Caratteristici sono gli alti gradi di alterazione, l'elevata spaziatura propria degli gneiss; l'apertura ricade nella classe "aperta". L'affioramento è interessato da ingenti venute d'acqua. La qualità complessiva dell'ammasso è mediocre.

Oltre agli RGM eseguiti in corrispondenza dell'area di cava, sono stati effettuati una serie di rilievi geomeccanici sul gabbro e sullo gneiss che costituiscono l'incassante del filone di quarzo. I rilievi sono stati eseguiti entro un raggio di qualche centinaio di metri dall'ammasso di quarzo la cui caratterizzazione costituisce il principale obiettivo di questa tesi.

Particolare attenzione è stata posta nel valutare le caratteristiche geomeccaniche degli ammassi ubicati in corrispondenza dei lineamenti strutturali presenti, al fine di valutare le caratteristiche idrogeologiche di queste strutture, potenziali elementi dominanti della circolazione idrica nell'area. I rilievi sono stati eseguiti secondo modalità speditive che hanno comunque permesso di raccogliere un numero di dati sufficiente a stabilire un buon grado di coerenza tra l'assetto strutturale del quarzo e quello dell'incassante. I risultati, che per ragioni di brevità non saranno analizzati singolarmente, sono inclusi nei grafici riassuntivi visualizzati nelle figure 2.3-2.6. da cui appare chiaramente una certa omogeneità delle caratteristiche geomeccaniche degli ammassi all'interno di gruppi definiti in funzione del litotipo. Il quarzo si presenta in media intensamente fratturato, con valori di spaziatura media tra le discontinuità intorno ai 10 cm e aperture medie inferiori a 0.5mm. Lo gneiss si caratterizza invece per una minore intensità di fratturazione, con valori di spaziatura intorno ai 30-40 cm e aperture dell'ordine del millimetro. Il gabbro, infine, mostra caratteristiche intermedie, con spaziature nell'ordine dei 20-30 cm ma, fra i tre litotipi presenti, è quello che mostra le maggiori aperture, con valori compresi tra 1 e 2 mm.

2.2.2 Rilievo Geomeccanico in sotterraneo

Metodologia di lavoro e parametri rilevati

La seconda metodologia di rilevamento dati ha previsto l'esecuzione di un rilievo geomeccanico in sotterraneo, eseguito in continuo lungo tutta l'estensione delle gallerie accessibili. Durante questa fase si sono rilevati e descritti oltre 650 piani di discontinuità principali, osservati in corrispondenza delle loro intersezioni con le gallerie e le camere di coltivazione. Le fratture rilevate possono essere suddivise, anche all'interno di una stessa famiglia, in discontinuità caratterizzate da elevata persistenza (100%) e discontinuità minori.

Le discontinuità del primo tipo, di seguito indicate come “discontinuità primarie o principali”, rappresentano vie preferenziali di circolazione idrica e sono state rilevate singolarmente e rappresentate graficamente sulla planimetria di cava.

Discontinuità primarie

Per ogni discontinuità primaria sono descritte le caratteristiche peculiari (orientazione media, grado di planarità, spaziatura fra le discontinuità della stessa famiglia, eventuali terminazioni contro altre strutture primarie, apertura massima e minima, presenza di riempimento, quantità d'acqua, grado e colore d'alterazione, estensione, geometria, condizione strutturale dell'ammasso nell'intorno del giunto. Le informazioni sono state raccolte facendo riferimento alle tabelle descrittive suggerite dall'ISRM per la descrizione delle fratture e sono state acquisite immagini fotografiche a corredo dei dati raccolti. Le misure acquisite sono state localizzate e georeferenziate sulla base cartografica realizzata dal titolare della concessione mineraria (Minerali Industriali) a supporto dell'attività di coltivazione del giacimento. La planimetria disponibile era in gran parte aggiornata all'effettiva configurazione geometrica delle gallerie; in caso di discordanza si sono apportate, per quanto possibile, le opportune correzioni.

L'acquisizione delle caratteristiche geometriche delle discontinuità è stata effettuata riportando in pianta le tracce delle intersezioni rilevate in calotta, mentre le informazioni raccolte lungo i piedritti sono riportate proiettando in pianta il contorno della galleria.

La spaziatura è stata suddivisa in due categorie: quella primaria, definita come la distanza ortogonale fra le fratture principali appartenenti alla stessa famiglia, e quella secondaria, valutata nell'intorno della frattura principale e definita come la distanza media fra i giunti secondari appartenenti allo stesso set di quelli primari, ma caratterizzati da minor persistenza, apertura minima o nulla ed alterazione generalmente assente.

Il grado di alterazione viene definito secondo lo standard ISRM, in base alle classi WD1, WD2, WD3 e WD4 che caratterizzano rispettivamente le discontinuità inalterate, leggermente decolorate, fortemente decolorate e molto alterate; queste sono successivamente denominate come classi 1, 2, 3 e 4 per agevolare l'analisi statistica. In base all'esistenza ed al tipo di riempimento sono costruite 4 classi denominate 1, 2, 3 e 4 corrispondenti all'assenza, alla presenza di materiale incoerente, sabbioso-limoso e limoso-sabbioso-argilloso. La presenza d'acqua è stata registrata utilizzando 6 classi per la descrizione delle condizioni idriche delle discontinuità; le sei classi non corrispondono a quelle definite dall'ISRM ma sono state attribuite in funzione del livello di dettaglio con cui si volevano caratterizzare le venute

d'acqua: 1) discontinuità asciutta; 2) discontinuità bagnata, senza filtrazione; 3) leggero stillicidio (1 goccia minuto, circa); 4) stillicidio discontinuo; 5) stillicidio continuo 6) flusso continuo d'acqua.

Informatizzazione dei dati ed elaborazioni preliminari

I dati raccolti durante la fase di campagna sono stati digitalizzati e georeferenziati (vedi Figura 2.8) in modo tale da renderli facilmente gestibili durante la fase di elaborazione statistica e geostatistica. Il Database delle informazioni geologico-strutturali è stato costruito utilizzando il software ArcGIS 9.3 della ESRI©. Ogni discontinuità è inserita sotto forma di punto o linea la cui orientazione riflette la direzione del piano della frattura; nella tabella attributi (Figura 2.9) sono inserite tutte le informazioni relative alla frattura.

In Figura 2.8 e 2.9 sono riportate le strutture principali rilevate, georeferenziate sulla base cartografica. La rappresentazione è di tipo mappa tematica classificata in cui il colore del simbolo dipende dal livello di coltivazione in cui è stato rilevato il dato: in verde, azzurro ed arancione sono contrassegnati i giunti e le gallerie appartenenti rispettivamente al primo, secondo e terzo livello.

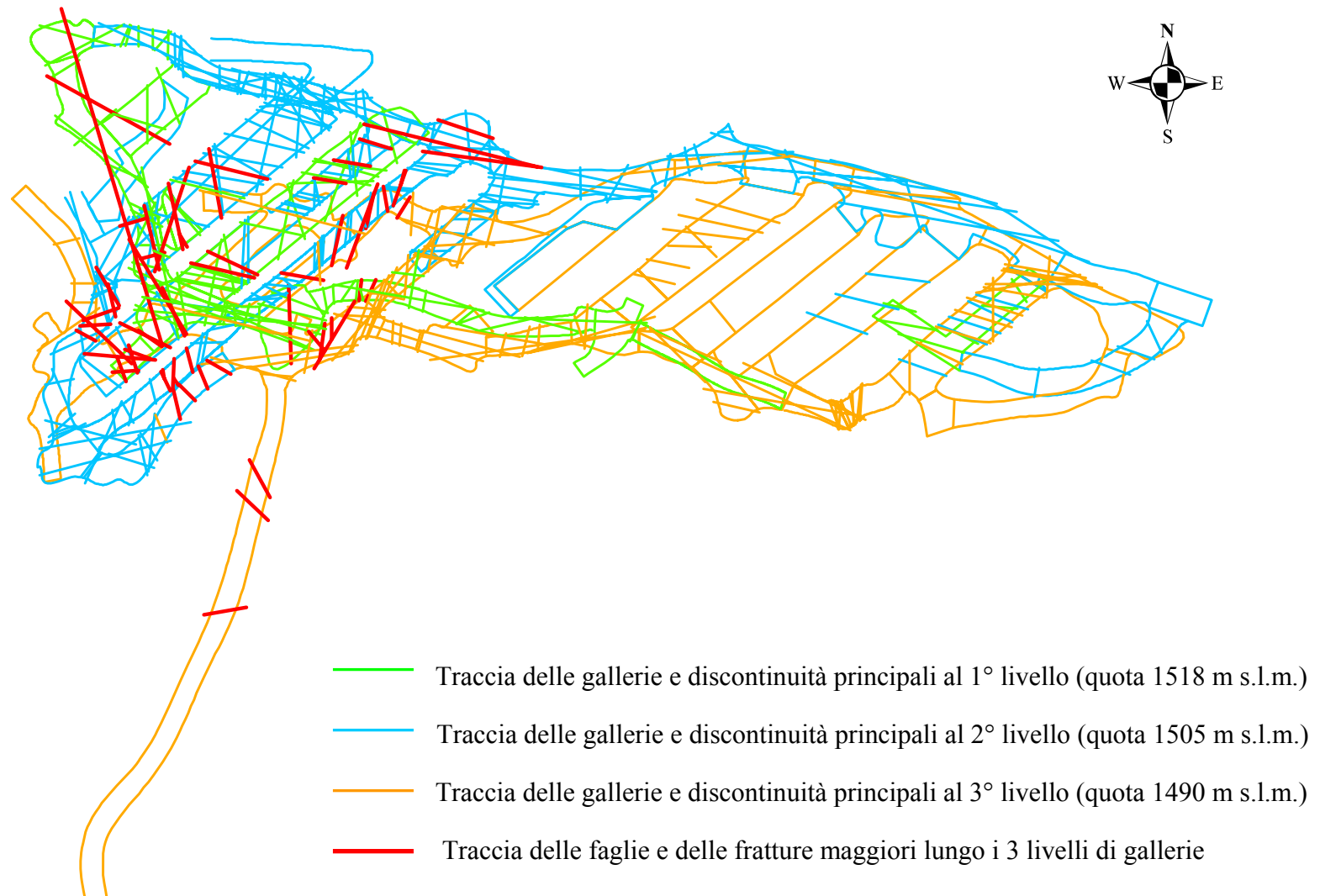
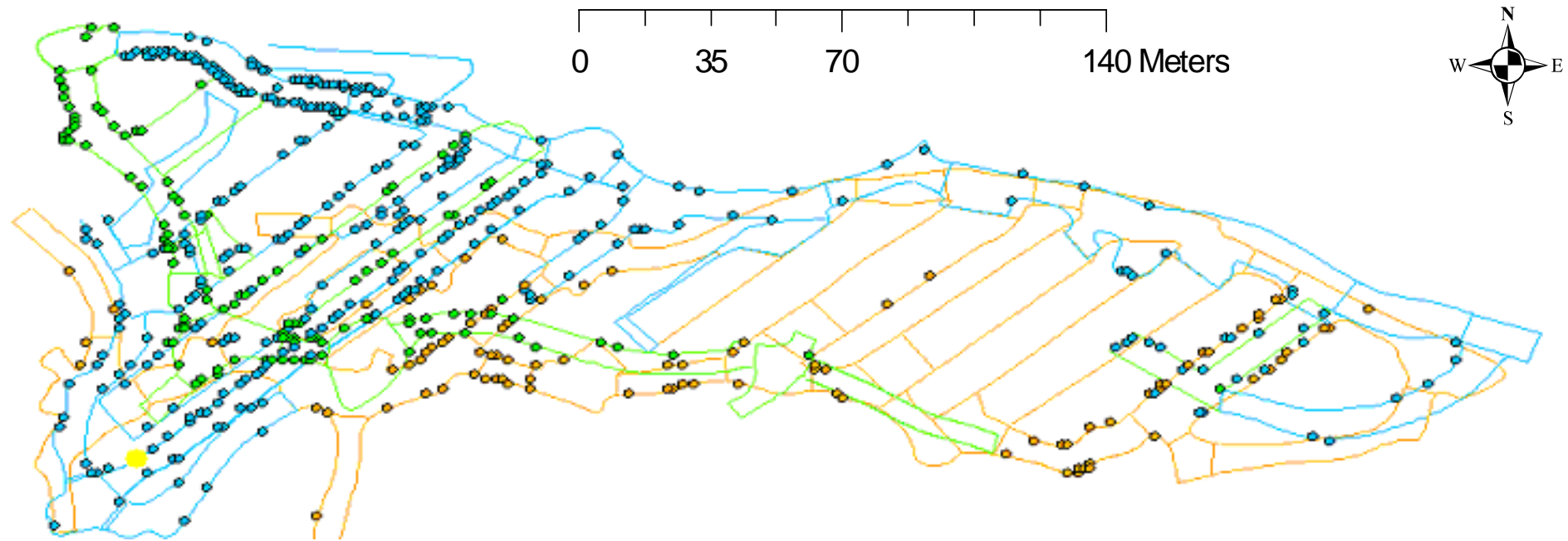


Figura 2.8: Planimetria dell'area di cava e ubicazione delle discontinuità principali rilevate (verde, azzurro, arancione) e dei lineamenti tettonici principali (rosso)



Attributes of Discontinuità_finale_tesi

FID	Shape	DIP	DIP DIR	Livello	TIPO	SPAZ CM	SPAZ PR CM	SPAZ PR CM	SPAZ II CM	SPAZ II CM	APERT CM	APERT CM	RIEMPIM	ACQUA	TERMINAZ	ALTERAZ	COLORE ALT	GEOMETRIA
2	Point	30	140	1	1 Moderata	50		50			0.05	0.2	A	1	Contro 6	1		Ondulata
3	Point	30	145	1	1 Moderata	50		50			0.05	0.2	A	1	Contro 6	1		Ondulata
4	Point	69	148	2	2 Larga	20		25			1	5	I	3		4 Br		A gradini (ampiezza 20cm)
5	Point	55	148	2	1 Larga	150		180			0.1	0.5	I	3	Roccia	2 Ru		Planare
6	Point	57	153	2	2						0.1	0.5	A	1		1		Planare
7	Point	50	160	1	1 Larga	70		80	20	20	0.1	0.5	I	1		1	2 Br	Ondulata
8	Point	32	162	1	1 Moderata	60		70	30	40	0.1	0.1	A	3	Contro 1	1		Ondulata
9	Point	54	164	1	1 Larga	70		80	20	30	0.1	0.5	I	1		2 Br		Ondulata
10	Point	61	164	2	1 Larga	140		150			0.05	0.05	A	1		1		Planare
11	Point	60	166	2	1 Larga	130		180	20	20			A	1		1		Planare

Record: 0 Show: All Selected Records (1 out of 629 Selected) Options

Figura 2.9: Planimetria dell'area di cava con ubicazione delle fratture principali. A titolo esemplificativo si riporta uno stralcio della tabella degli attributi collegati alle discontinuità rilevate. Nell'esempio sono visibili i valori di spaziatura tra le fratture primarie e tra le fratture secondarie appartenenti alla stessa famiglia; l'apertura, il tipo di riempimento, le condizioni idriche, eventuali terminazioni osservabili ecc... Colonne ripetute indicano il range di variazione (max e min)

L'analisi dell'orientamento delle strutture principali, effettuata con l'ausilio del software DIPS della ©RocScience, versione 5.1, mostra l'esistenza di 4 famiglie di discontinuità (Figura 2.10).

Famiglia	Giacitura
K1	188/53
K2	253/88
K3	283/88
K4	016/67

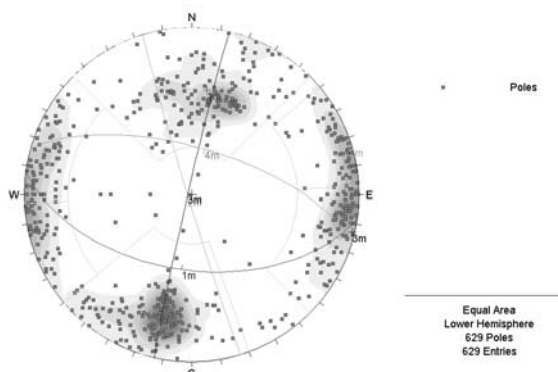


Figura 2.10: Suddivisione delle discontinuità principali in 4 famiglie principali e relative giaciture medie.

In Figura 2.10 è mostrato lo stereogramma dei poli delle fratture primarie. Sono evidenti tre principali nuvole di addensamento dei poli, oltre ad un certo numero di giaciture piuttosto disperse. Sulla base delle osservazioni di terreno, i poli orientati E/W sono stati suddivisi in due diversi set aventi inclinazione molto elevata attorno agli 80° - 90° .

In previsione di una successiva analisi geostatistica bidimensionale inerente la distribuzione spaziale delle principali caratteristiche delle discontinuità, le fratture sono state proiettate lungo la direzione di immersione su un piano di riferimento (1512 m s.l.m.), arbitrariamente scelto a quota intermedia tra il livello massimo e quello minimo di misura (Figura 2.11). Questo artificio geometrico risolve il problema della sovrapposizione in pianta di punti posti a quota diversa che hanno una differenza altimetrica talvolta superiore alla trentina di metri (camere di coltivazione sovrapposte); l'analisi geostatistica assumerebbe distanze quasi nulle fra le discontinuità sovrapposte, rappresentando condizioni non reali. Come è logico aspettarsi, conseguenza della trasformazione è il cambiamento della posizione del dato che risulta proiettato lungo il piano della discontinuità (con la necessaria assunzione di planarità della stessa).

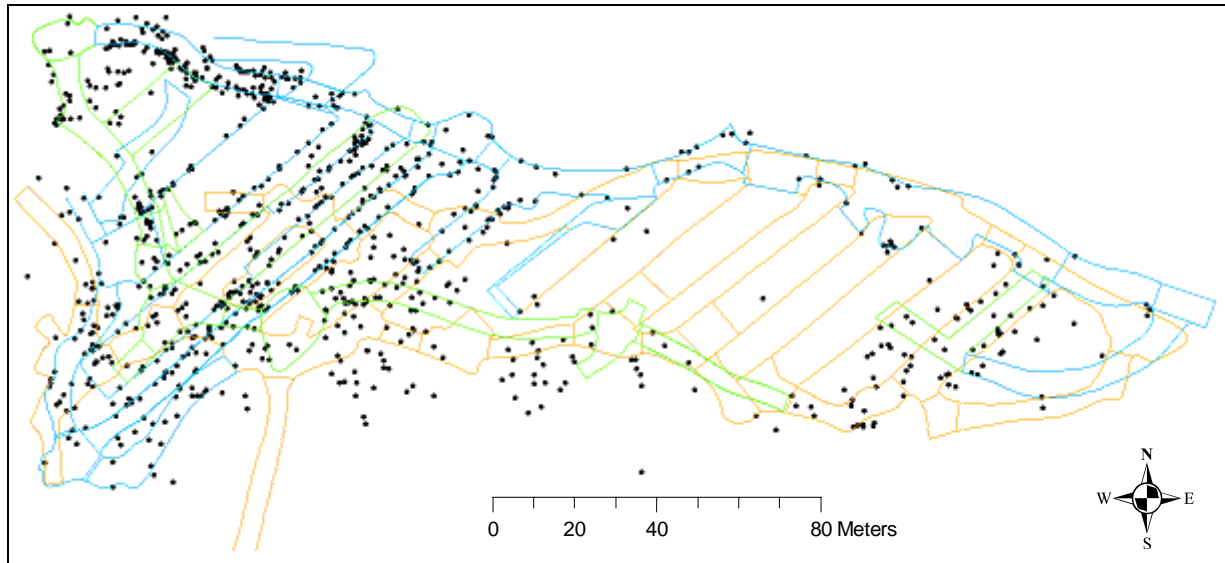


Figura 2.11: Proiezione dei giunti sul piano di riferimento arbitrariamente posto a quota 1512 m s.l.m.

L'esposizione delle strutture rilevate in galleria non permette in genere di valutarne la persistenza reale che si estende oltre l'area di intersezione con la galleria. La planarità e la persistenza delle strutture principali (faglie) è stata quindi valutata prolungando tridimensionalmente i piani (con la loro giacitura) a partire da un punto di misura arbitrariamente scelto e verificando la coerenza fra le intersezioni calcolate graficamente e le posizioni delle strutture rilevate a quote diverse (Figura 2.12). Laddove i piani prolungati graficamente intercettano i cunicoli, è stata verificata in sito l'effettiva posizione delle strutture (Figura 2.13). Per la costruzione geometrica tridimensionale è stato utilizzato il programma AUTOCAD 2010, ©Autodesk. L'analisi eseguita ha permesso di confermare l'ipotesi di sostanziale planarità per le faglie e per alcune delle fratture caratterizzate da maggior apertura. Ciò significa che le faglie e le discontinuità principali mantengono le rispettive peculiarità all'interno di un'area estesa, permettendo quindi di ipotizzare una geometria planare e un'elevata persistenza delle strutture primarie.

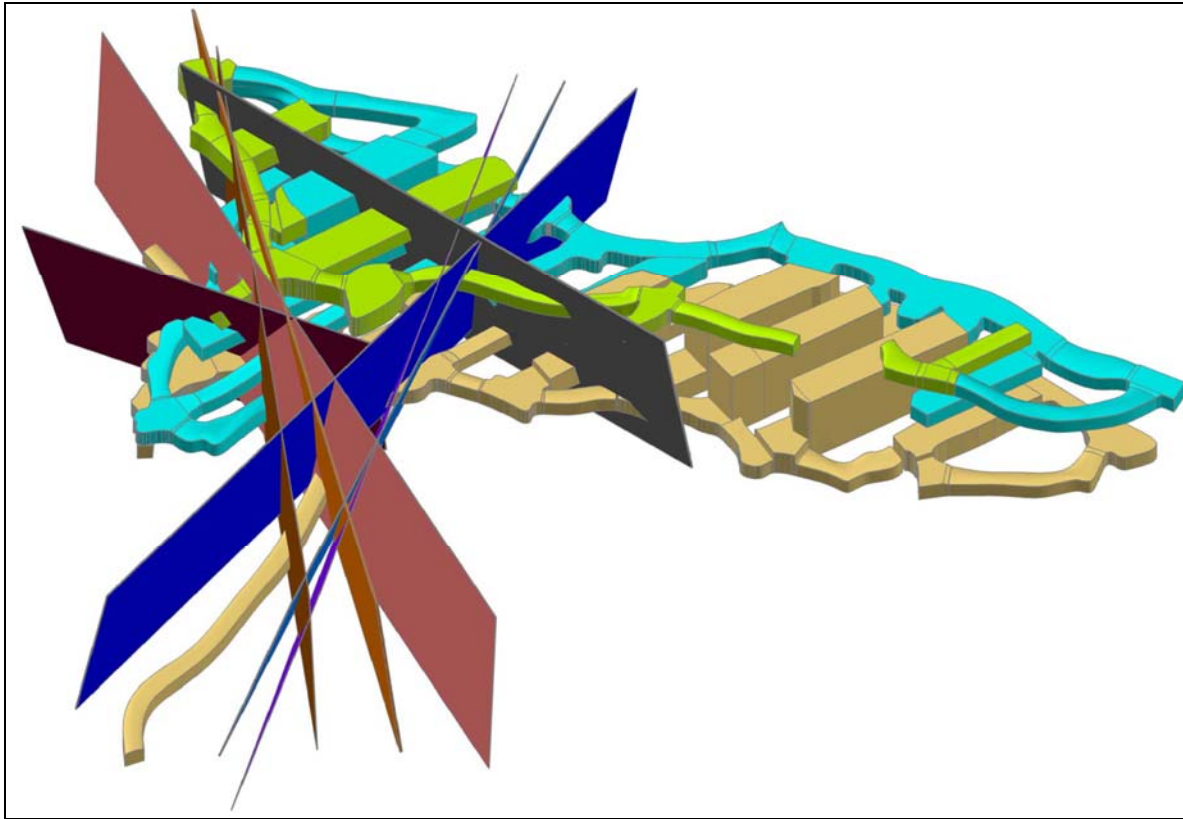


Figura 2.12: Prolungamento geometrico dei piani di faglia all'interno del volume di cava

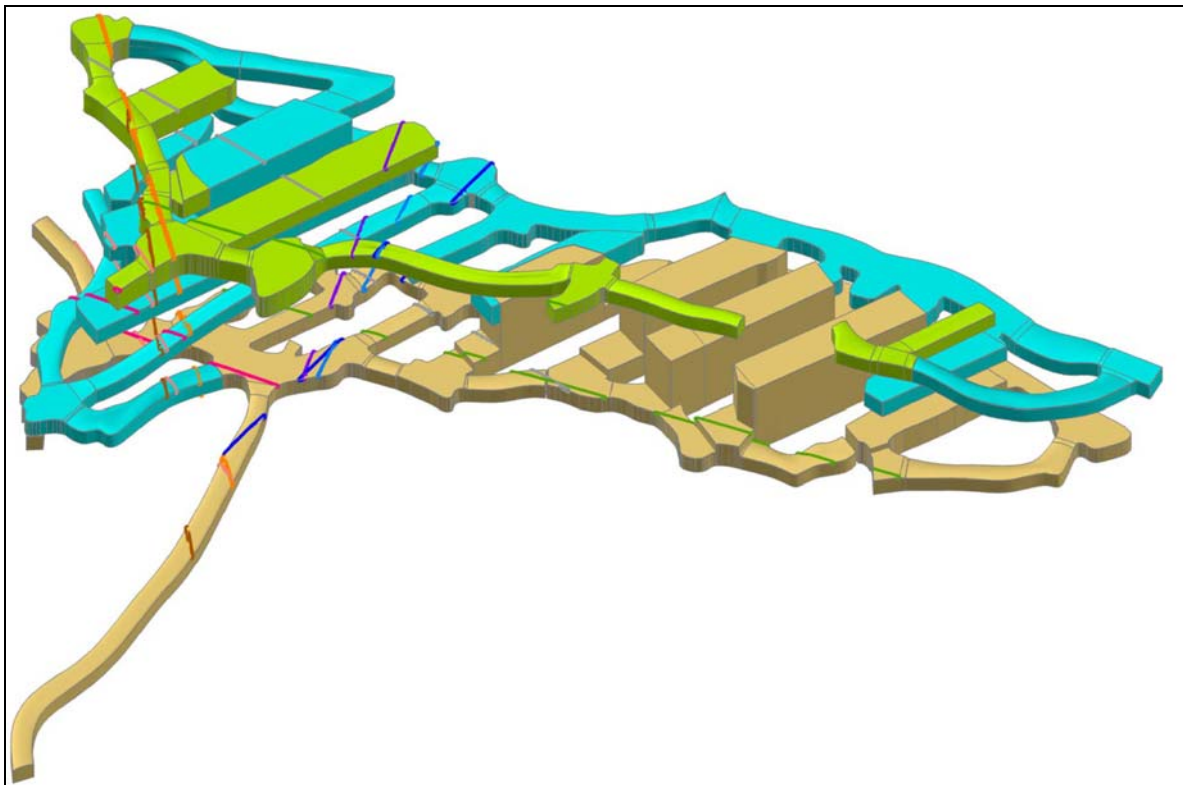


Figura 2.13: Tracce dei piani di faglia calcolati lungo i tre livelli e successivamente confermati mediante sopralluogo in sito.

Conclusioni relative alle strutture principali

L'ammasso di quarzo è intersecato, nella sua porzione occidentale, da due fasci di faglie sub parallele, aventi direzioni NNO-SSE e NNE-SSO (figura 2.14). La faglia principale è più evidente lungo i tre livelli, attraversa l'area di cava in direzione NNO-SSE, mostra cinematica destra con strie immergenti verso sud e inclinazione 5° . L'apertura è compresa tra 30 e 60 cm con riempimento costituito da quarzo brecciato localmente milonitico. Nell'immediato intorno delle faglie si osserva inoltre una zona intensamente fratturata, estesa per 50/100 cm.

La porzione di ammasso compresa tra i due principali fasci di faglie (figura 2.14) mostra assetto strutturale piuttosto disorganizzato. Le 4 famiglie principali di discontinuità modificano leggermente la loro giacitura media, con un generale aumento dell'inclinazione e una dispersione molto maggiore dei poli. Nella porzione orientale, fino ad una seconda faglia di giacitura simile, si intensifica la fratturazione caratteristica delle 4 famiglie di discontinuità principali. La presenza di faglie minori sub parallele alle principali determina variazioni giaciture e un sensibile aumento dell'intensità di fratturazione, con conseguente diminuzione dei blocchi rocciosi, soprattutto in vicinanza del contatto con l'incassante. Nelle porzioni centrali del giacimento, ovvero lungo le camere di coltivazione, l'ammasso appare invece interessato da un reticolo di fratturazione piuttosto regolare, caratterizzato da fratture sub parallele, raggruppate in fasci a spaziatura moderata tra loro distanti qualche metro e proprietà geomeccaniche nell'insieme uniformi. E' altresì vero che le misure effettuate non sono numericamente tali da trarre conclusioni certe sull'influenza della vicinanza del contatto nei confronti della disposizione spaziale e delle caratteristiche delle discontinuità. Si rende quindi necessario indagare il problema dell'assetto strutturale utilizzando tecniche geostatistiche e simulazioni del reticolo di fratturazione che verranno ampiamente trattate nei capitoli seguenti. Le osservazioni riportate permettono comunque di suddividere il giacimento in domini con caratteristiche approssimativamente omogenee, che verranno trattati in modo specifico nel successivo processo di modellizzazione. In base alle considerazioni esposte ed interpretando criticamente i risultati delle indagini eseguite, si è quindi provato a suddividere l'area di cava in due volumi separati dalla principale delle faglie sopra menzionate (Figura 2.14). Viste le inclinazioni delle faglie prossime ai 90° , le posizioni delle relative tracce in corrispondenza dei tre livelli variano in maniera limitata, permettendo di considerarle come un piano perfettamente verticale senza commettere sensibili errori nelle elaborazioni.

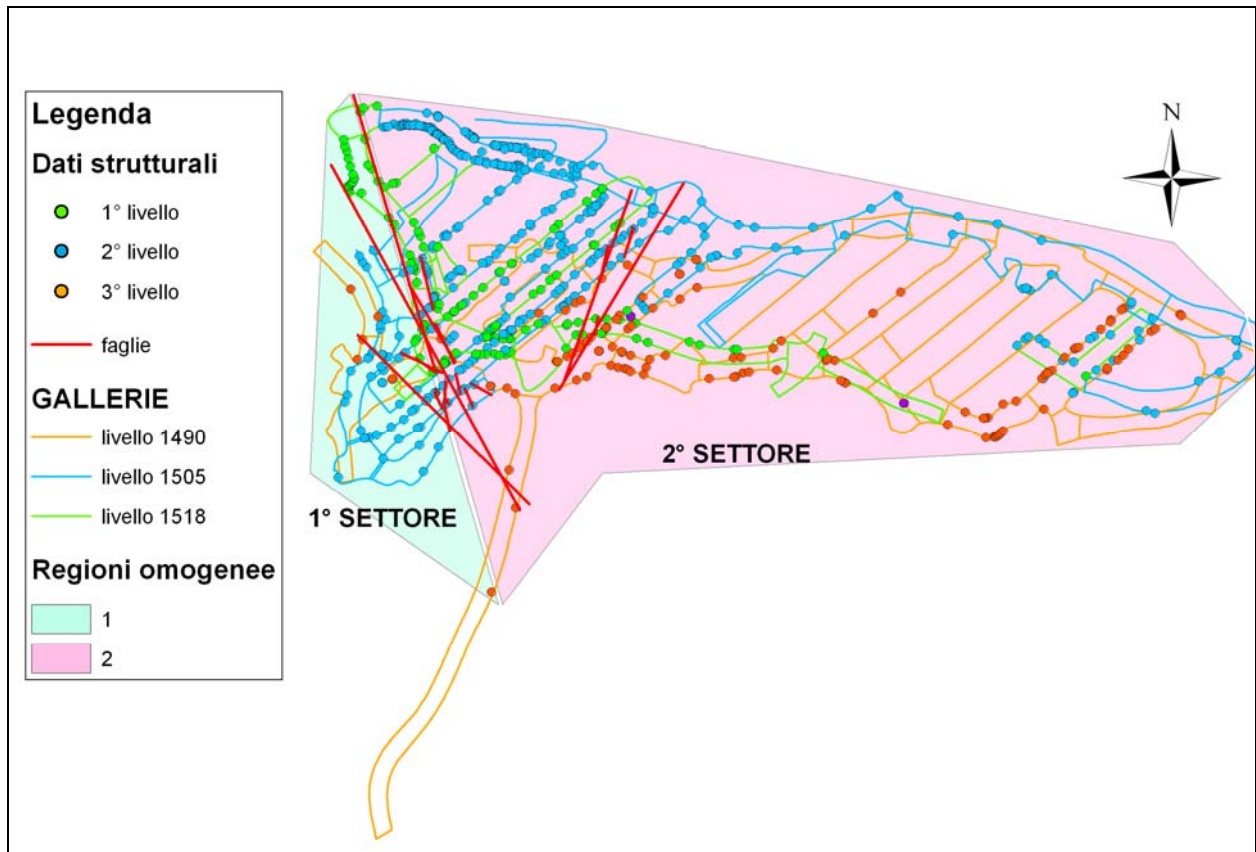


Figura 2.14 Suddivisione dell'area di cava in due settori con caratteristiche delle discontinuità omogenee, traccia delle faglie principali (segmenti rossi).

Le Figure 2.15 e 2.16 mostrano la dispersione dei poli delle discontinuità nei due settori. Le proiezioni stereografiche riguardanti le fratture principali vengono confrontate nelle immagini con quelle relative alle giaciture delle discontinuità secondarie a limitata persistenza, rilevate e georeferenziate durante la fase di indagine. Dalle immagini si osserva una sostanziale coerenza tra le giaciture delle strutture principali e quelle delle strutture secondarie nelle due aree in cui è stato suddiviso il volume di cava.

1° SETTORE	
DISCONTINUITA' PRINCIPALI	GIACITURE COMPLESSIVE
Equal Area – Lower Hemisphere	Equal Area – Lower Hemisphere
112 poli	470 poli

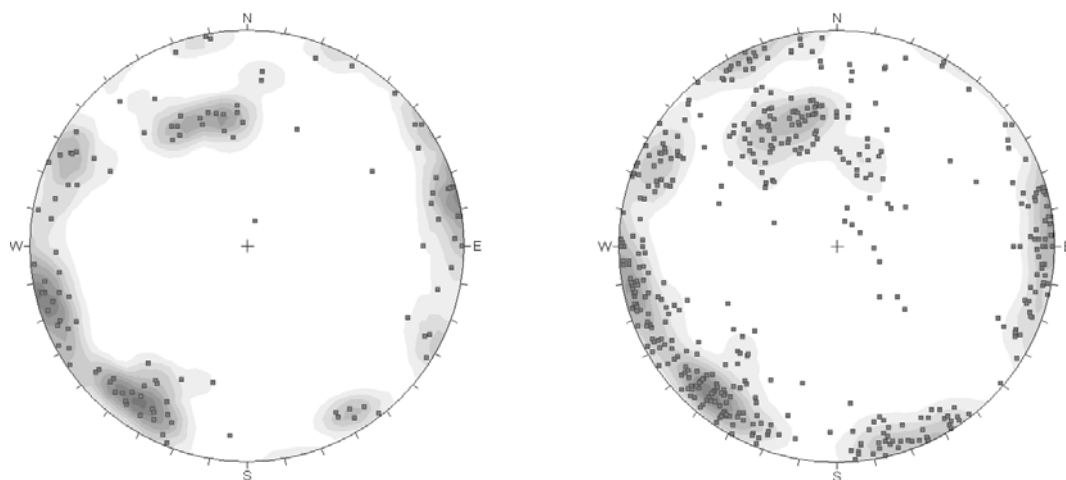


Figura 2.15: Poli delle discontinuità principali (sinistra) e giaciture totali nel 1° settore (destra)

2° SETTORE	
DISCONTINUITA' PRINCIPALI	GIACITURE COMPLESSIVE
Equal Area - Lower Hemisphere	Equal Area - Lower Hemisphere
517 poli	1791 poli

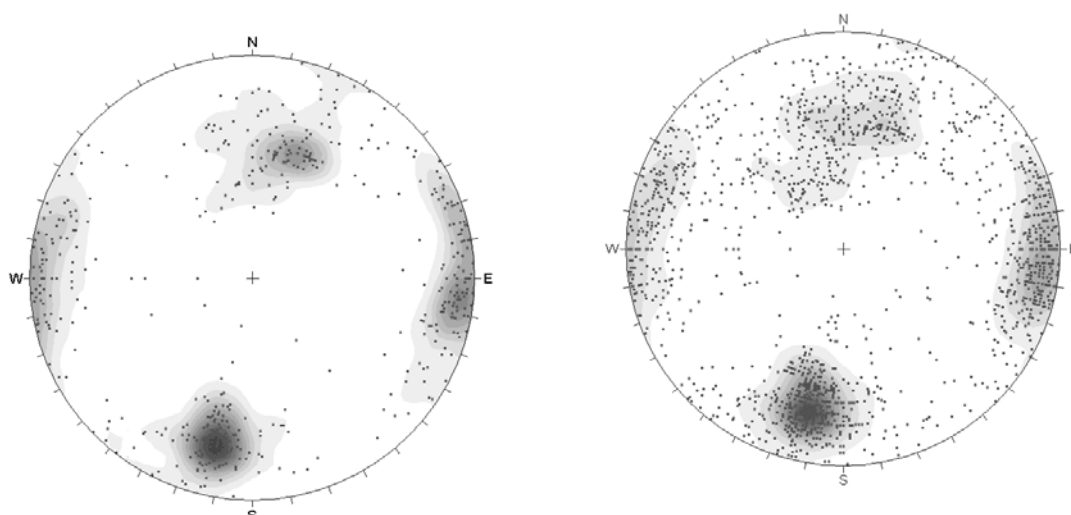


Figura 2.16: Poli delle discontinuità principali (sinistra) e giaciture totali nel 1° settore (destra).

2.2.3 Acquisizione giaciture in aree localizzate

Al fine di validare i risultati delle simulazioni geostatistiche e stocastiche sono state effettuate una serie di stazioni di misura, in ognuna delle quali sono rilevati un centinaio di piani di frattura casualmente selezionati. Tali giaciture sono state acquisite, senza che siano state georeferenziate singolarmente, all'interno di un dominio spaziale di estensione limitata, lungo i piedritti in un'area di circa 10 m di diametro. Questa procedura consente di ottenere un grande numero di misure, distribuite su un'area ristretta (50-100 m²), in un tempo ragionevolmente contenuto; i dati ottenuti, non sono stati utilizzati nell'interpolazione geostatistica, ma, essendo rilevati entro un'area spazialmente referenziata, possono essere impiegati per validarne i risultati. Tre di queste zone si collocano al livello intermedio (lungo una camera avente direzione NE-SO), tre al livello inferiore e le rimanenti due all'imbocco ed alla sommità della rampa collegante il terzo al secondo livello. Due ulteriori dataset di giaciture sono stati acquisiti lungo i piedritti del secondo e del quarto camerone (linee rosse in Figura 2.17). Questi dati, di fatto georeferenzati lungo lo stendimento di misura sono però stati acquisiti solo in un secondo tempo, allo scopo di validare i risultati delle modellazioni in zone dove nella prima fase di acquisizione dati non si era potuto operare per ragioni di sicurezza. Anche questi dati, quindi non sono stati utilizzati per il condizionamento dei modelli ma solamente in fase di validazione dei risultati raggiunti. In figura 2.17 è mostrata la posizione delle zone di acquisizione dei dati.

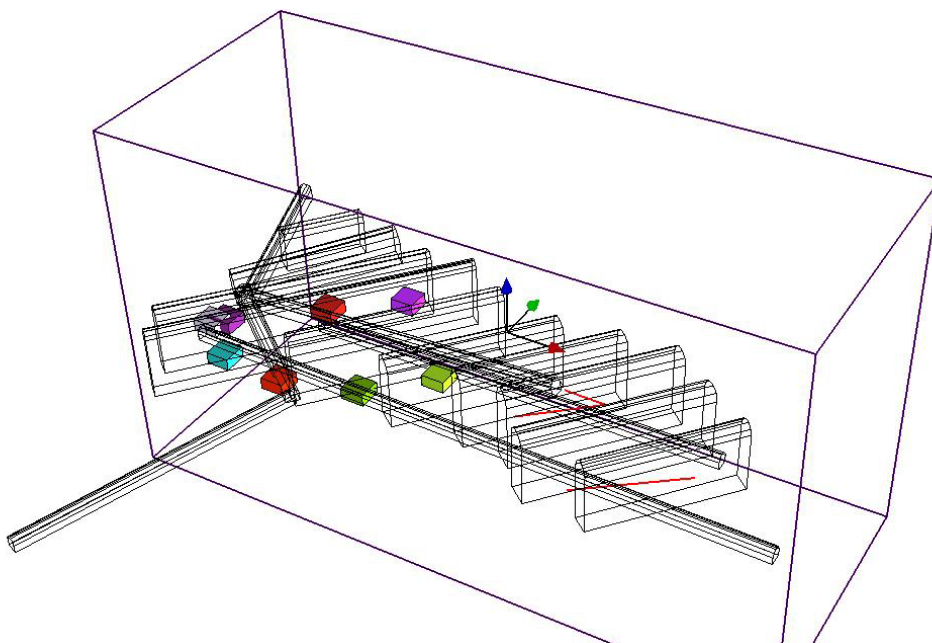


Figura 2.17: Posizione delle aree di acquisizione dei dati non georeferenziate vista da Sud Est

3 Capitolo 3

Analisi ed elaborazione dei dati geomeccanici.

Lo studio qualitativo e quantitativo del reticolo di fratturazione necessita di una precisa definizione delle caratteristiche geometriche, geomeccaniche e idrogeologiche delle discontinuità che intersecano e suddividono l'ammasso. I dati ottenuti durante il lavoro di campagna sono stati opportunamente gestiti ed elaborati al fine di identificare i fenomeni da essi descritti, permettendo di trarre conclusioni generali sulle caratteristiche del reticolo di fratturazione a partire da misure puntuali distribuite in modo il più possibile omogeneo nello spazio. I dati sperimentali costituiscono infatti solo un'informazione grezza dalla cui elaborazione è possibile acquisire una conoscenza del fenomeno rappresentato, con un'incertezza statisticamente quantificabile. I passaggi per raggiungere l'obiettivo sono: la raccolta dei dati allo scopo di ottenere informazioni su un dato fenomeno, l'analisi delle informazioni raccolte e la loro formalizzazione in fatti, la definizione dei fatti stessi ed il passaggio alla conoscenza dei parametri e dei fenomeni. L'analisi statistica delle misure è finalizzata all'individuazione delle proprietà statistiche della popolazione da cui è stato prelevato il campione di dati. La comprensione di un determinato fenomeno richiede lo studio delle relazioni fra i dati, al fine di individuare eventuali correlazioni e possibili dipendenze di tipo causa-effetto. L'analisi dei dati deve essere fatta in modo da minimizzare l'interpretazione soggettiva dei valori, evitando di trarre conclusioni soggettive potenzialmente fuorvianti.

La statistica è una scienza che consente di prendere decisioni nei casi di incertezza, sulla base dei dati disponibili e non sulle opinioni personali; l'aspetto probabilistico ed il grado di incertezza dei risultati dipendono comunque dalla qualità e dalla numerosità del campione disponibile. Allargare i risultati ottenuti su un campione al fenomeno studiato, in tutta la sua complessità, implica l'introduzione di un errore che dovrà essere il più piccolo possibile. La statistica è costituita da una serie di metodologie implementate per la raccolta, l'analisi, la presentazione ed interpretazione dei dati in situazioni di incertezza. Il fatto di poter trarre delle conclusioni riguardo alle caratteristiche di un dato parametro di una popolazione, attraverso lo studio di una piccola parte di essa, costituisce il motivo principale per il suo utilizzo. Da questa esigenza nasce l'inferenza statistica, ovvero l'estrapolazione ed estensione delle informazioni contenute nel campione all'intera popolazione.

3.1 I dati statistici

3.1.1 Qualità e tipologia dei dati

La conoscenza dei metodi statistici, sia per i problemi legati al campionamento quanto per quelli connessi alla preparazione e gestione dei dati, è un prerequisito necessario nell'analisi dei fenomeni naturali; l'elaborazione e presentazione dei dati deve seguire criteri codificati e riconosciuti universalmente validi. La qualità dei dati richiede una buona conoscenza dei procedimenti di misura e di registrazione, sebbene nessun numero di dati sia sufficiente per provare la bontà dello stesso; per questo motivo è necessario assicurarsi che i dati ottenuti producano il tipo di risultati che da essi ci si aspetta. La buona conoscenza del comportamento statistico degli errori di misura permette comunque in molti casi la riduzione dell'effetto delle incertezze sul risultato finale; errori dovuti alle misurazioni possono essere circoscritti attraverso il prelievo di un elevato numero di dati. Per facilitare la comprensione dei dati si segue uno schema specifico basato sulla descrizione statistica delle caratteristiche più importanti della distribuzione (media, mediana, deviazione standard); il secondo passo prevede la descrizione dei risultati allo scopo di permettere la valutazione della correttezza delle ipotesi da verificare. Confrontando un numero basato su di una previsione teorica con un numero sperimentale e ponendosi il problema se siano concordi o meno, è necessario disporre di un criterio per valutare la precisione dell'uno rispetto all'altro.

I dati raccolti sono di tipo qualitativo (qualità nominali che caratterizzano il singolo elemento), oppure quantitativo qualora esprimano una caratteristica mediante un valore numerico in scala continua o discreta. Le informazioni di tipo qualitativo o categoriale vengono quantificate con punteggi privi di relazioni ordinali reciproche, suddivise secondo la classificazione di Siegel (1956) in:

- *Nominali*, qualora non esista un ordine significativo delle categorie; è il livello più basso di misurazione ed è usata quando i risultati sono raggruppati in categorie qualitative. I caratteri nominali sono variabili i cui attributi non assumono alcun ordine preconstituito; i dati attribuiti alla stessa classe sono tra loro equivalenti, rispetto alla proprietà usata nella classificazione.
- *Ordinali*, rappresentano una misurazione contenente una quantità di informazioni superiore a quella nominale; le categorie sono organizzate secondo un ordine significativo, in genere sequenziale, crescente o decrescente. La scala è irregolare e gli intervalli non costanti, per cui lo scopo è assegnare solamente un ordine relativo alle osservazioni. Alla proprietà di

equivalenza fra gli individui della stessa classe si aggiunge una graduazione tra le classi. Tale tipologia di dati mostra però l'impossibilità di quantificare differenze d'intensità fra le osservazioni e fornisce l'informazione su di una scala ordinale con raggruppamenti convenzionali in classi di frequenza variabili.

Alle variabili così misurate si applicano test statistici non parametrici, mentre non è possibile usare quei test che fanno riferimento alla distribuzione normale dei dati poiché non sono definibili le distanze fra i valori. Quest'indicazione sull'uso della statistica non parametrica è superata dall'osservazione che variabili nominali si distribuiscono in modo normale qualora il numero di dati sia discretamente elevato.

I dati quantitativi possono invece essere suddivisi in:

- *Discreti*, qualora la variabile assuma solo valori numerici finiti (numeri interi)
- *Continui*, se la variabile assume valori numerici associati a un dato intervallo di valori reali.

3.1.2 L'approccio sperimentale

Per condurre in modo corretto la ricerca, cioè per raccogliere un campione sufficiente di dati in grado di fornire informazioni qualitativamente affidabili, occorre seguire alcuni passaggi procedurali riassunti nell'elenco seguente:

1) Conoscenza del territorio ed investigazione preliminare del sito

Lo studio di un qualsiasi fenomeno naturale deve essere preceduto da una ricerca bibliografica che permetta di inquadrare la problematica sulla base delle informazioni pregresse disponibili. L'analisi della cartografia esistente a scala regionale/di dettaglio permette l'inquadramento del fenomeno nelle condizioni naturali e l'identificazione delle condizioni al contorno.

2) Pianificazione delle attività conoscitive

Definizione delle attività da svolgere in termini qualitativi e quantitativi al fine di descrivere con precisione le condizioni ambientali in cui si verifica il fenomeno; descrizione delle tecniche di indagine utilizzate per il tipo di campionamento scelto.

3) Campionamento

Raccolta dati in funzione dello scopo della ricerca. Uno dei problemi della statistica è la definizione del numero di campioni da acquisire, che deve essere il più piccolo possibile per

minimizzare i costi d'indagine ma deve garantire, nello stesso tempo, di raggiungere delle conclusioni generali e statisticamente affidabili, sulla distribuzione del parametro in oggetto.

4) Procedure di trattamento dei dati

Le procedure vengono selezionate in funzione dell'obiettivo da raggiungere, sulla base dei risultati delle indagini e delle informazioni necessarie per risolvere i problemi connessi alla definizione dei limiti spaziali dell'area di studio e degli errori tollerabili nelle decisioni finali.

5) Analisi statistica preliminare

Informatizzazione dei dati rilevati e calcolo dei principali indici e test statistici. I dati devono essere rappresentati mediante grafici, mappe tematiche e tabelle di sintesi che facilitino la comprensione del fenomeno rappresentato.

6) Scelta dei test per l'inferenza

Il test statistico è un processo logico-matematico che indica se poter o meno rifiutare l'ipotesi della casualità mediante il calcolo della probabilità di commettere un errore con queste affermazioni. L'ipotesi nulla afferma che le differenze fra due o più gruppi, oppure tra un gruppo ed il valore atteso, siano imputabili essenzialmente al caso; per giungere a queste conclusioni si ricorre all'inferenza statistica, che permette di trarre conclusioni generali sulla popolazione utilizzando un numero limitato di dati variabili. Si sottolinea come nell'uso della statistica solo una corretta applicazione del campionamento ed una scelta appropriata del test permettano di rispondere alla domanda inferenziale di verifica dell'ipotesi nulla. Se tale probabilità risulta alta (di norma uguale o superiore al 5%), si imputano le differenze a fattori puramente casuali, mentre se è inferiore al valore fissato si accetta che le differenze siano riconducibili a fattori non casuali e si rifiuta quindi l'ipotesi nulla.

7) Analisi della struttura spaziale della distribuzione

L'analisi caratterizza le variabili in funzione della loro distribuzione spaziale nella porzione di territorio su cui agiscono (dominio spaziale); tale distribuzione delle osservazioni sperimentali individua la presenza di trend e di possibili anisotropie del fenomeno. L'analisi è fondata sulla georeferenziazione dei dati che assegna a ciascun valore della variabile una precisa posizione nello spazio attraverso un sistema di coordinate appartenenti ad un sistema geografico (coordinate geografiche o chilometriche) oppure geometrico (coordinate di disegno).

8) Elaborazione finale di mappe tematiche

Viene sfruttato il concetto di georeferenziazione delle osservazioni di una variabile per rappresentarne la distribuzione bidimensionale o tridimensionale attraverso l'utilizzo dei metodi d'interpolazione deterministici e probabilistici (kriging).

3.1.3 Tipologie di analisi e strategie di campionamento

La statistica è suddivisa in descrittiva ed inferenziale; quella descrittiva fornisce le metodologie per raccogliere, organizzare, rappresentare e sintetizzare i dati con indici matematici, allo scopo di individuare le caratteristiche fondamentali del campione. Quella inferenziale verifica le ipotesi, coinvolgendo anche i processi di stima per l'elaborazione di un modello probabilistico di comportamento del fenomeno, e permette di individuare le caratteristiche della popolazione a partire dai dati statistici del campione. La scelta dello schema di campionamento è fondamentale per raggiungere risultati statistici significativi, soprattutto in funzione del numero di campioni necessari per ottenere un dato livello di significatività. Uno schema ben organizzato consente di supportare le decisioni relative ad una variabile geologica, determinare di quanto differiscono le caratteristiche di due popolazioni, stimarne gli indici statistici, delimitare aree anomale determinandone la natura, identificare e controllare le tendenze nei dati ambientali. Nel definire un piano di campionamento è fondamentale il concetto di popolazione, comprendente tutte le unità che rappresentano l'obiettivo della ricerca, poiché su di essa si traggono le conclusioni. Lo schema di campionamento deve specificare numero, tipo e localizzazione spaziale delle unità di campionamento da selezionare per le misure. In quanto l'obiettivo dello studio è la correlazione spaziale fra osservazioni, prima di effettuare le analisi statistiche è opportuno ricostruire una mappa relativa alle distribuzioni dei dati sul territorio che consente un esame visivo dell'uniformità di campionamento, della densità e delle relazioni fra un punto e l'altro. La strategia di campionamento adottata (campionamento casuale) per indagare la distribuzione spaziale dei dati nell'area della cava di quarzo di Sondalo, rappresenta la metodologia d'indagine più semplice, ove la registrazione delle misure è effettuata in modo tale che tutti i campioni abbiano la stessa probabilità di essere selezionati, evitando errori legati alla soggettività e cercando di rendere la popolazione più omogenea possibile. In tale campionamento, giustificato dalla presenza di zone impraticabili o inaccessibili (corpo dei diaframmi), la maggior parte dei dati viene rilevata nelle aree più agevolmente raggiungibili, garantendo la selezione di un campione rappresentativo della situazione generale dell'area.

3.1.4 L'analisi esplorativa dei dati

Al fine di ottenere una formulazione corretta del fenomeno investigato ed eliminare ogni causa di errore sistematico, si esegue uno studio approfondito dei dati disponibili (Analisi Esplorativa dei Dati o EDA) applicando metodi di analisi statistica esplorativa/descrittiva e partendo dallo

studio di una variabile per poi concentrarsi eventualmente su due o più di esse. L'utilizzo di software specifici per delineare le caratteristiche generali dei dati, consente di rappresentare gli stessi mediante grafici, calcolare gli indici statistici di base, verificare tendenze nella distribuzione ed individuare valori anomali. La rappresentazione visiva dei dati fornisce molte informazioni, tra cui la valutazione preliminare della distribuzione; tra le metodologie disponibili per la presentazione dei valori si riassumono di seguito le più efficaci:

Grafici a scatola (box-plot)

Il grafico è utile per analizzare dataset poco numerosi che risulterebbero di difficile rappresentazione mediante gli istogrammi di frequenza e per confrontare distribuzioni differenti in poco spazio. Il box-plot (Figura 3.1) è composto da un corpo principale racchiudente la maggior parte dei dati, le due code ed i baffi, evidenziano il grado di dispersione dei valori che si estendono fino ai valori estremi della distribuzione. I margini orizzontali delimitanti la scatola indicano il primo (limite inferiore) ed il terzo quartile (chiusura superiore). La distanza interquartilica, che racchiude il 50% delle osservazioni, riproduce la dispersione della distribuzione. Qualora l'intervallo sia piccolo, la metà delle misurazioni si trova concentrata attorno alla mediana, mentre al crescere di tale distanza aumenta la dispersione dei dati centrali. Le distanze fra quartili e mediana esprimono la forma della distribuzione che, qualora un intervallo sia diverso dall'altro, risulta asimmetrica.

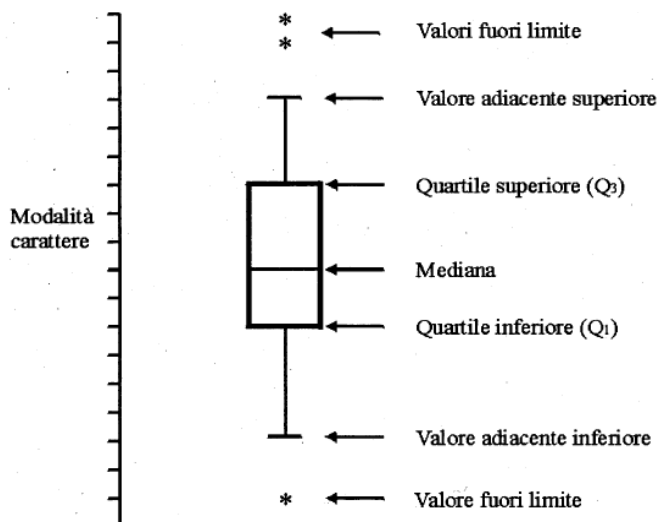


Figura 3.1 Grafico box-plot e visualizzazione degli indicatori statistici principali

Istogrammi e distribuzioni di frequenza

Gli istogrammi danno un'idea visiva della numerosità dei punti in ogni classe; se la larghezza degli intervalli non varia da classe a classe, le aree risulteranno proporzionali alle frequenze. Avere classi troppo ampie comporta la distorsione delle proprietà dei dati. Il profilo di un istogramma è approssimato con una curva, descritta da una funzione matematica (densità di probabilità) utilizzata per riassumere l'ipotetica distribuzione di probabilità della popolazione. Dispersione e forma della curva dipendono da più costanti (parametri matematici della funzione densità), legate ai parametri statistici. Alcuni metodi di stima forniscono risultati affidabili a condizione che la distribuzione delle osservazioni approssimi quella normale (gaussiana) vista l'importanza che quest'ultima riveste nella definizione del teorema del limite centrale (Davis, 2002). Nei fenomeni di natura geologica le distribuzioni sono spesso caratterizzate da un numero elevato di osservazioni con valori bassi e da pochi dati con valori alquanto elevati (distribuzione log-normale).

3.2 Analisi statistica dei dati raccolti

3.2.1 Spaziatura a grande scala delle famiglie di discontinuità

L'analisi dei dati raccolti evidenzia, all'interno di uno stesso set di fratture, discontinuità più persistenti ed evidenti, che si ipotizza possano rappresentare le vie preferenziali di circolazione idrica dell'intero corpo quarzifero. La spaziatura rilevata fra i giunti principali viene denominata "spaziatura a grande scala" (GS), mentre quella che separa le discontinuità minori non persistenti, costituenti il fitto reticolo fessurativo fra due giunti principali, rappresenta la "spaziatura a piccola scala" (PS). L'acquisizione dei dati sul terreno per entrambe le tipologie è stata fatta valutando il range di variazione del parametro e registrando il valore minimo e quello massimo; per affrontare l'analisi statistica, essendo richiesto un solo valore rappresentativo, è stata poi calcolata la media. Primo passo per lo studio della variabile georeferenziata è l'analisi statistica dei dati, utile per valutare distribuzione e frequenza con la quale si presentano le misurazioni effettuate (Figure 3.2-3.6). Essendo alcuni metodi di stima affidabili solo nel caso in cui la distribuzione delle osservazioni è prossima alla gaussiana, è necessario trasformare i dati non normalmente distribuiti, attraverso l'applicazione di semplici funzioni matematiche che riportino alla normalità. Per l'esecuzione dell'analisi statistica dei valori è stato utilizzato il software SPSS (acronimo di Statistical Package for Social Science).

Di seguito vengono proposte le tabelle riassuntive dei principali indicatori statistici caratterizzanti la distribuzione delle spaziature e i relativi istogrammi di frequenza, calcolati tanto per la distribuzione complessiva dei dati, quanto per ogni famiglia analizzata separatamente.

N° valid	426
Mean	138.09
Median	100.00
Mode	80
Std. Deviation	101.452
Variance	10,292.51
	5
Skewness	1.756
Kurtosis	3.315
Range	563
Minimum	13
Maximum	575
Percentiles	25 80.00
	50 100.00
	75 175.00

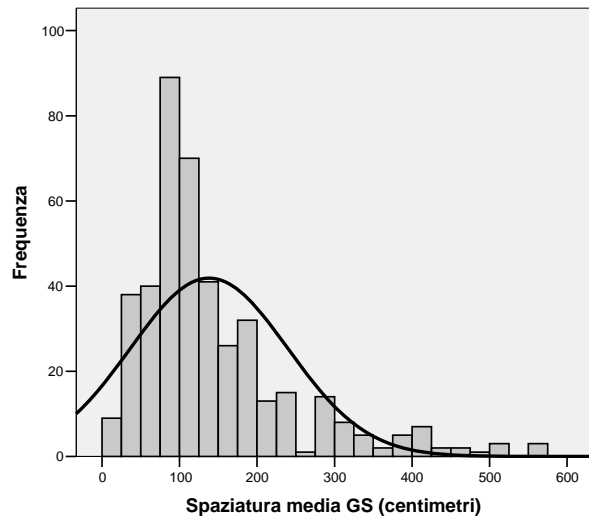


Figura 3.2: Parametri statistici e istogramma di frequenza relativi alla spaziatura a grande scala (cm)

N° valid	93
Mean	128.76
Median	100
Mode	100
Std. Deviation	103.950
Variance	10,805.655
Skewness	2.055
Kurtosis	4.584
Range	535
Minimum	15
Maximum	550
Percentiles	25 72.50
	50 100.00
	75 147.50

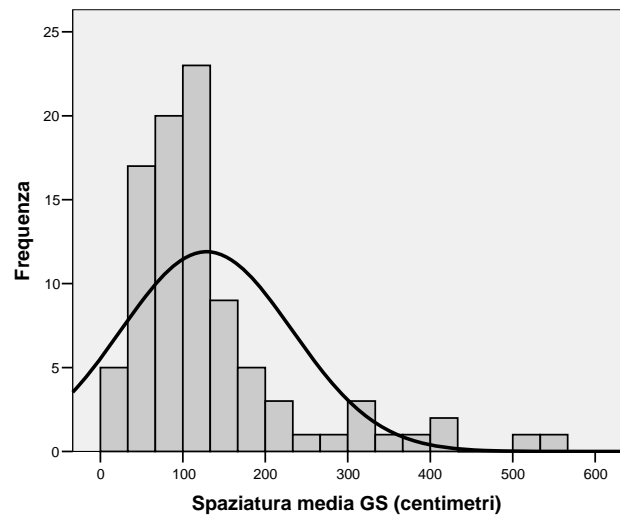


Figura 3.3: Parametri statistici e istogramma di frequenza relativi alla spaziatura media a grande scala (cm) per le discontinuità della Famiglia K1

N° valid	58
Mean	160.948276
Median	122.5
Mode	80
Std. Deviation	113.981
Variance	12,991.629
Skewness	1.686
Kurtosis	3.043
Range	550
Minimum	25
Maximum	575
Percentiles	25 83.75
	50 122.50
	75 205.00

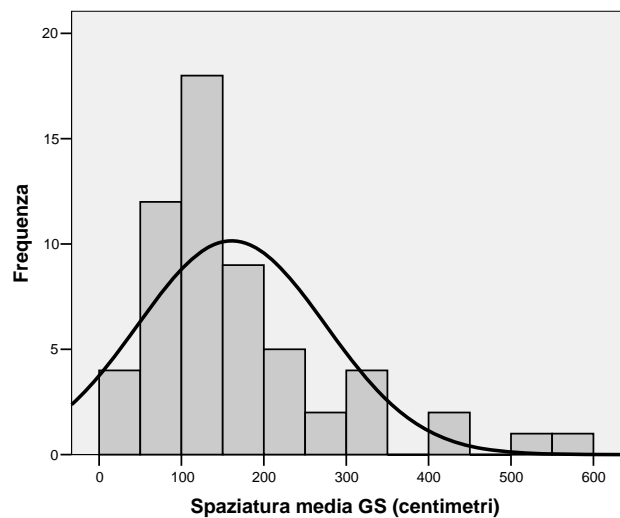


Figura 3.4: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi alla spaziatura media a grande scala (cm); (Famiglia K2)

N° valid	117	
Mean	168.269231	
Median	130	
Mode	100	
Std. Deviation	115.325	
Variance	13,299.834	
Skewness	1.118	
Kurtosis	0.560	
Range	507.5	
Minimum	12.5	
Maximum	520	
Percentiles		
	25	85.00
	50	130.00
	75	225.00

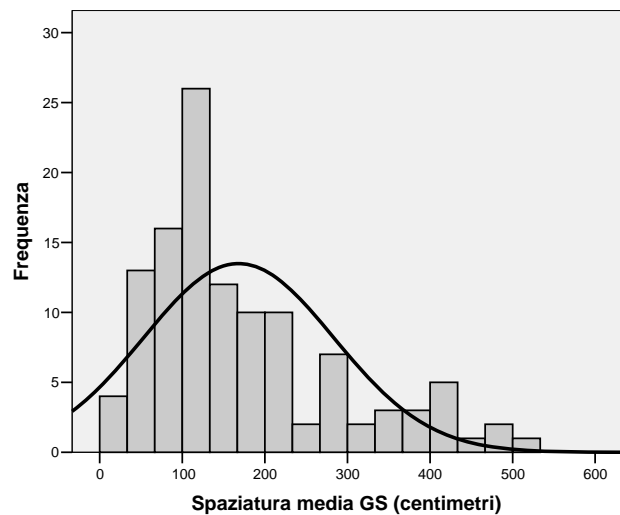


Figura 3.5: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi alla spaziatura media a grande scala (cm); (Famiglia K3)

N° valid	146	
Mean	112.945205	
Median	90	
Mode	80	
Std. Deviation	73.235	
Variance	5,363.335	
Skewness	2.296	
Kurtosis	9.004	
Range	530	
Minimum	20	
Maximum	550	
Percentiles		
	25	80.00
	50	90.00
	75	142.50

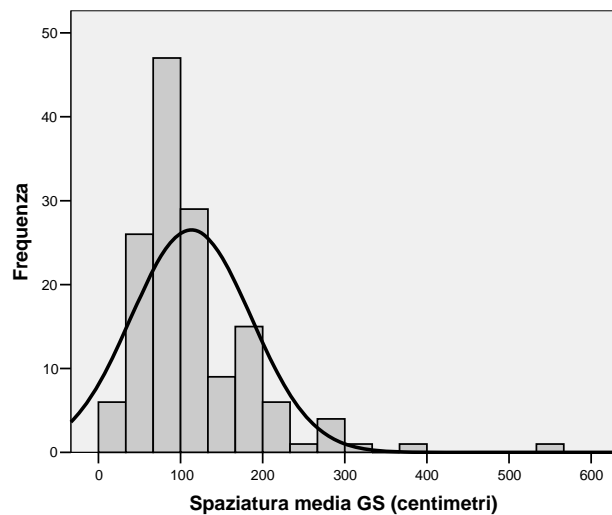


Figura 3.6: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi alla spaziatura media a grande scala (cm); (Famiglia K4)

Appare evidente dai grafici come la distribuzione di frequenza della spaziatura non sia normale, né per quanto riguarda l'analisi totale, né per le famiglie di discontinuità studiate singolarmente; un numero maggiore di valori tende infatti a concentrarsi nella porzione iniziale degli istogrammi (spaziatura inferiore ai due metri), mentre all'aumentare della spaziatura, la frequenza dei dati diminuisce sensibilmente. La distribuzione appare quindi caratterizzata da una rapida crescita iniziale, fino al raggiungimento del valore massimo di frequenza, seguita da una più lenta decrescita fino alla coda opposta, ed assume l'andamento tipico di una distribuzione log-normale. A partire da dati distribuiti secondo una distribuzione di tipo log normale è comunque possibile ricondursi ad una distribuzione normale mediante la trasformazione

logaritmica del valore originale. Nelle Figure 3.7-3.11 sono riportati gli istogrammi di frequenza dei dati trasformati.

N° valid	426
Mean	2.03930
Median	2
Mode	1.90309
Std. Deviation	0.29954
Variance	0.08972
Skewness	-0.09075
Kurtosis	0.08368
Range	1.66276
Minimum	1.09691
Maximum	2.75967
Percentiles	
25	1.90309
50	2
75	2.24304

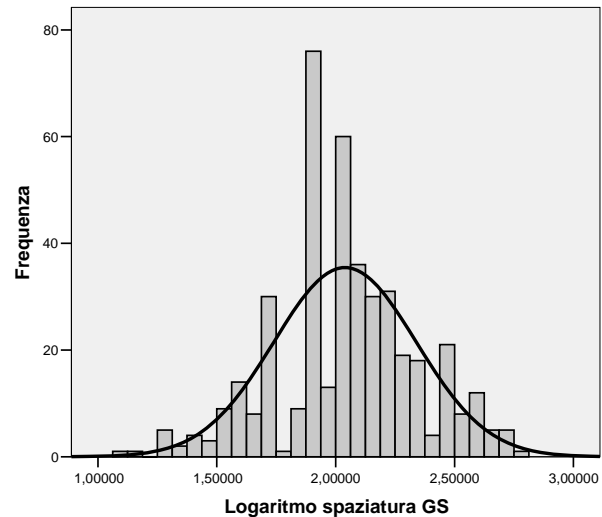


Figura 3.7: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi al logaritmo della spaziatura media a grande scala, per tutte le famiglie

N° valid	93
Mean	1.99846
Median	2
Mode	2.00000
Std. Deviation	0.31123
Variance	0.09686
Skewness	0.04455
Kurtosis	0.14042
Range	1.56427
Minimum	1.17609
Maximum	2.74036
Percentiles	
25	1.86008
50	2
75	2.16873

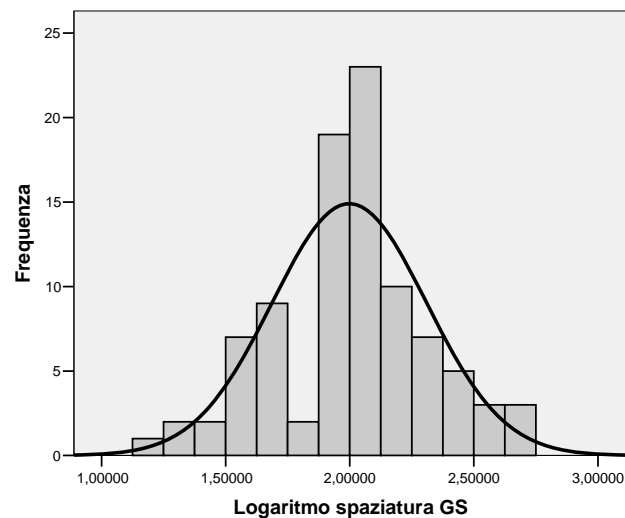


Figura 3.8: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi al logaritmo della spaziatura media a grande scala (*Famiglia KI*)

N° valid	58	
Mean	2.11413	
Median	2.08804563	
Mode	1.90309	
Std. Deviation	0.28701	
Variance	0.08237	
Skewness	-0.00545	
Kurtosis	0.02706	
Range	1.36173	
Minimum	1.39794	
Maximum	2.75967	
Percentiles		
	25	1.92284
	50	2.08804563
	75	2.31138

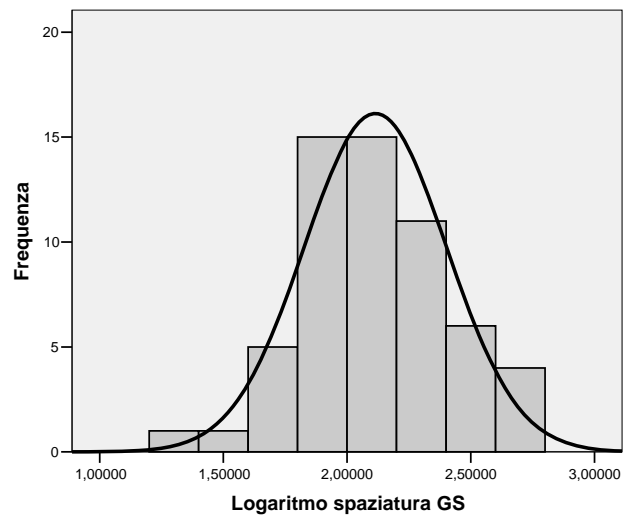


Figura 3.9: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi al logaritmo della spaziatura media a grande scala (*Famiglia K2*)

N° valid	117	
Mean	2.12199	
Median	2.11394335	
Mode	2.00000	
Std. Deviation	0.31710	
Variance	0.10055	
Skewness	-0.40922	
Kurtosis	0.20749	
Range	1.61909	
Minimum	1.09691	
Maximum	2.71600	
Percentiles		
	25	1.92942
	50	2.11394335
	75	2.35218

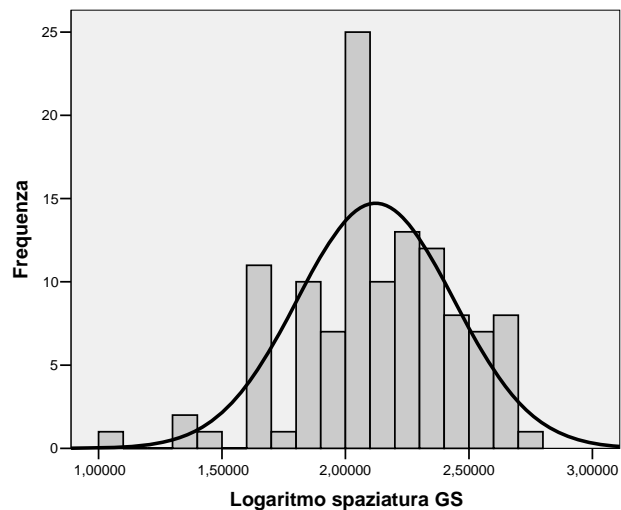


Figura 3.10: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi al logaritmo della spaziatura media a grande scala (*Famiglia K3*)

N° valid	146	
Mean	1.97707	
Median	1.95424251	
Mode	1.90309	
Std. Deviation	0.26027	
Variance	0.06774	
Skewness	-0.17913	
Kurtosis	0.52881	
Range	1.43933	
Minimum	1.30103	
Maximum	2.74036	
Percentiles		
	25	1.90309
	50	1.95424251
	75	2.15362

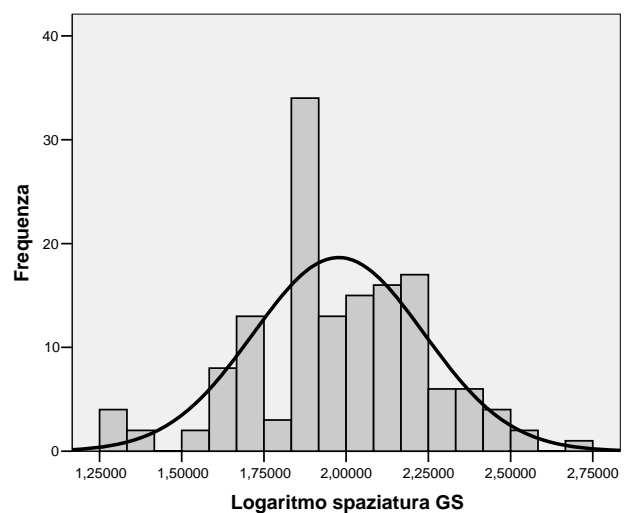


Figura 3.11: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi al logaritmo della spaziatura media a grande scala (*Famiglia K4*)

In Tabella 3.1 vengono riportati i valori estremi della distribuzione di frequenza relativa al valore del logaritmo della spaziatura a grande scala, mentre la Tabella 3.2 riporta i valori percentili della distribuzione di frequenza relativa al logaritmo della spaziatura a grande scala.

I grafici box-plot e Q-Q (Figura 3.12) permettono di valutare lo scostamento della distribuzione dalla normalità, comparando i valori reali con quelli calcolati per una distribuzione teorica normale.

FAMIGLIA			Case Number	Value	FAMIGLIA			Case Number	Value
1	Highest	1	145	2.74036	3	Highest	1	284	2.71600
		2	52	2.70757			2	423	2.67669
		3	51	2.62839			3	419	2.67210
		4	66	2.60206			4	417	2.65321
		5	41	2.57978			5	418	2.62839
	Lowest	1	144	1.17609		Lowest	1	398	1.09691
		2	44	1.35218			2	395	1.30103
		3	27	1.35218			3	422	1.39794
		4	111	1.47712			4	400	1.47712
		5	64	1.47712			5	385	1.60206
2	Highest	1	193	2.75967	4	Highest	1	571	2.74036
		2	268	2.69897			2	432	2.57403
		3	171	2.60206			3	485	2.51188
		4	204	2.60206			4	467	2.43933
		5	223	2.51188			5	496	2.43933
	Lowest	1	246	1.39794		Lowest	1	581	1.30103
		2	212	1.54407			2	577	1.30103
		3	221	1.60206			3	574	1.30103
		4	237	1.65321			4	500	1.30103
		5	245	1.69897			5	579	1.39794

Tabella 3.1 Valori estremi della distribuzione di frequenza relativa al valore del logaritmo della spaziatura a grande scala, in funzione delle famiglie di discontinuità

FAMIGLIA		PERCENTILI						
		5	10	25	50	75	90	95
1	Weighted Average	1.47712	1.56726	1.86008	2.00000	2.16873	2.46201	2.58647
2	Weighted Average	1.59916	1.69897	1.92284	2.08805	2.31138	2.50582	2.60691
3	Weighted Average	1.60206	1.69897	1.92942	2.11394	2.35218	2.57403	2.60469
4	Weighted Average	1.54407	1.65321	1.90309	1.95424	2.15362	2.27733	2.41864

Tabella 3.2 Valori percentili della distribuzione di frequenza relativa al valore del logaritmo della spaziatura a grande scala, in funzione delle famiglie di discontinuità

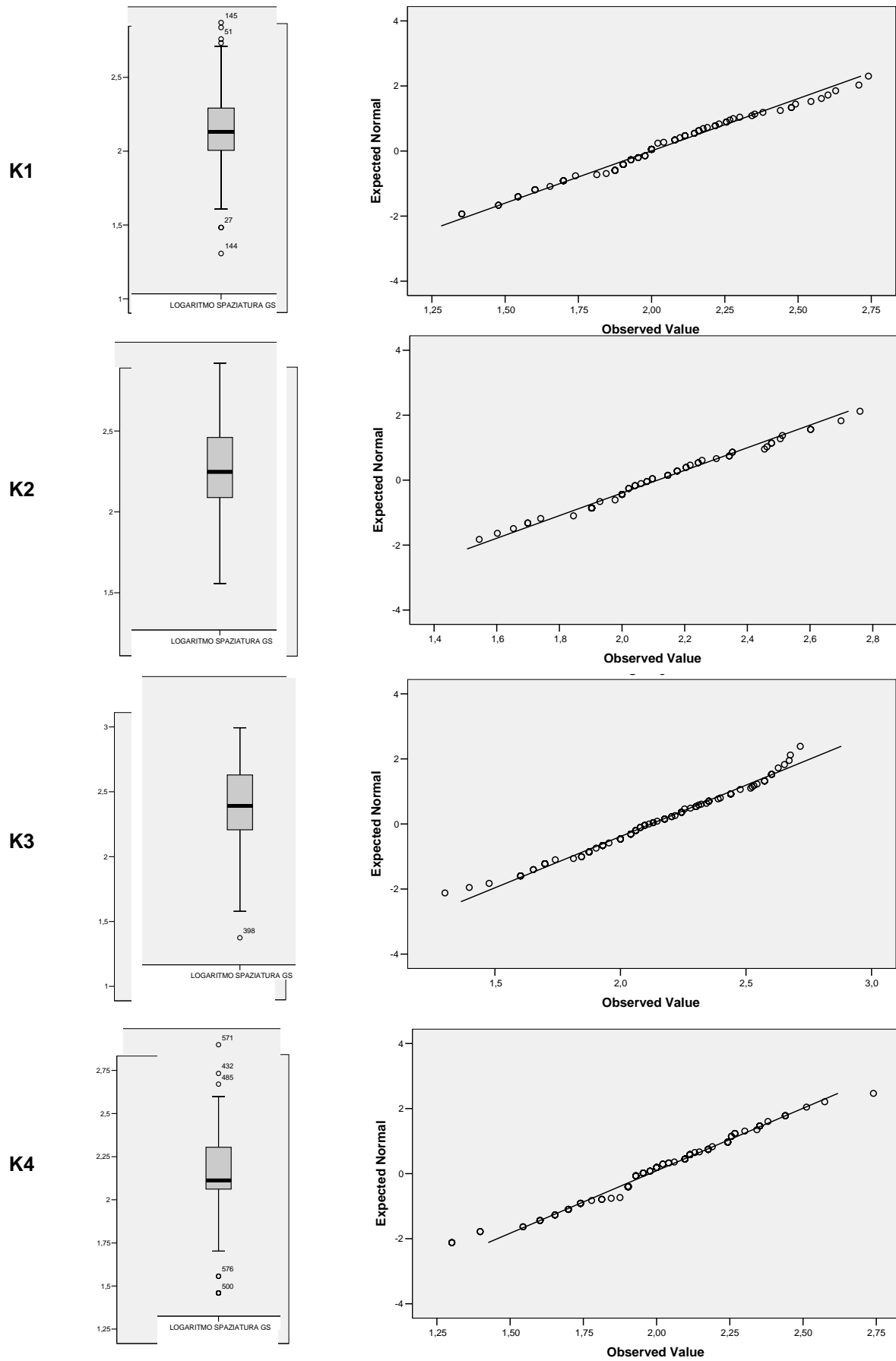


Figura 3.12: Grafici boxplot (sinistra) e Q-Q (destra); dall'alto, Famiglie K1, K2, K3, K4

L'analisi visiva degli istogrammi e delle Q-Q plot conferma il raggiungimento delle condizioni di normalità dopo l'applicazione della trasformazione logaritmica dei valori. L'ipotesi è comunque stata verificata tramite l'applicazione dei test non parametrici di Kolmogorov-Smirnov e di Shapiro-Wilk; entrambi confermano la normalità delle distribuzioni trasformate.

4.2.2) Spaziatura a piccola scala delle famiglie di discontinuità

La procedura di analisi dei dati riguardante la spaziatura a piccola scala delle famiglie di discontinuità rispecchia quanto già esposto per quelle a grande scala; si noti come anche in questo caso i dati rilevati abbiano richiesto la trasformazione logaritmica dei valori per soddisfare la condizione di normalità. Nelle Figure 3.13-3.17 sono mostrati i risultati dell'analisi.

N° valid	366
Mean	1.13276597
Median	1.09691001
Mode	1.09691001
Std. Deviation	0.238
Variance	0.057
Skewness	0.223
Kurtosis	0.315
Range	1.26324143
Minimum	0.47712125
Maximum	1.74036269
Percentiles	
25	1.00
50	1.10
75	1.30

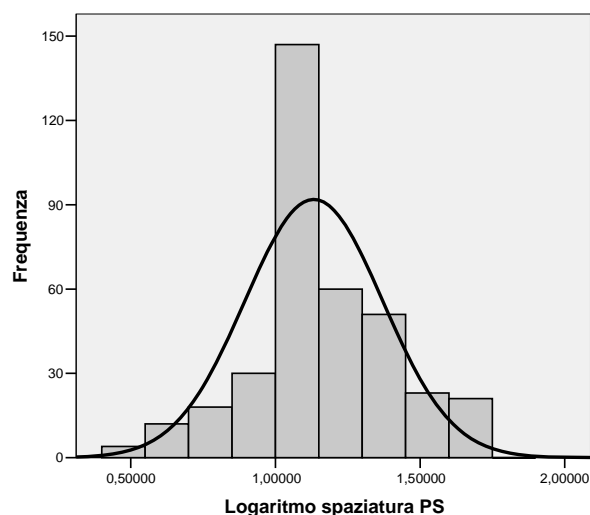


Figura 3.13: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi alla spaziatura media a piccola scala (PS)

N° valid	79	
Mean	1.20726257	
Median	1.17609126	
Mode	1.09691001	
Std. Deviation	0.230	
Variance	0.053	
Skewness	0.474	
Kurtosis	-0.182	
Range	1.04139269	
Minimum	0.69897	
Maximum	1.74036269	
Percentiles		
	25	1.10
	50	1.18
	75	1.30

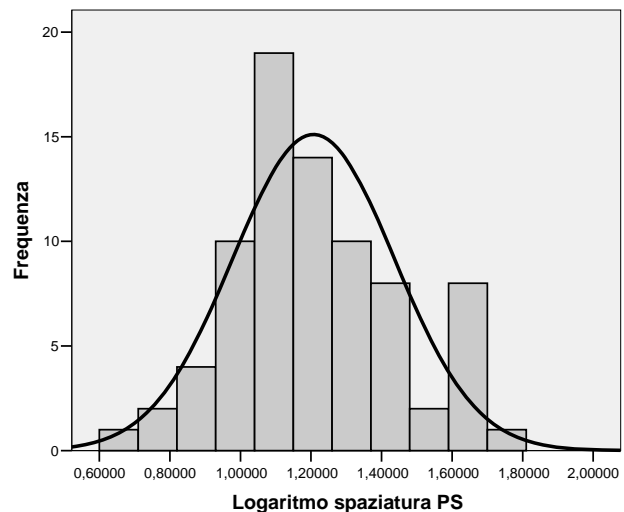


Figura 3.14: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi alla spaziatura media a piccola scala (*Famiglia K1*)

N° valid	55	
Mean	1.1712286	
Median	1.17609126	
Mode	1.09691001	
Std. Deviation	0.230	
Variance	0.053	
Skewness	0.256	
Kurtosis	0.201	
Range	1.09691001	
Minimum	0.60205999	
Maximum	1.69897	
Percentiles		
	25	1.00
	50	1.18
	75	1.30

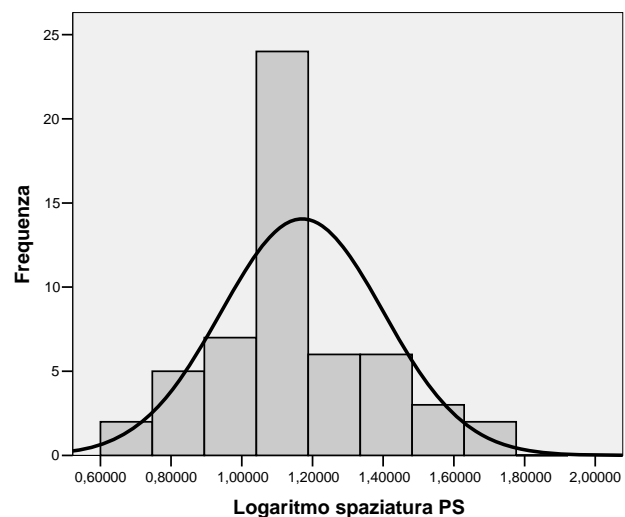


Figura 3.15: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi alla spaziatura media a piccola scala (*Famiglia K2*)

N° valid	96	
Mean	1.09845838	
Median	1.09691001	
Mode	1.09691001	
Std. Deviation	0.207	
Variance	0.043	
Skewness	0.264	
Kurtosis	0.462	
Range	1	
Minimum	0.69897	
Maximum	1.69897	
Percentiles		
	25	1.00
	50	1.10
	75	1.18

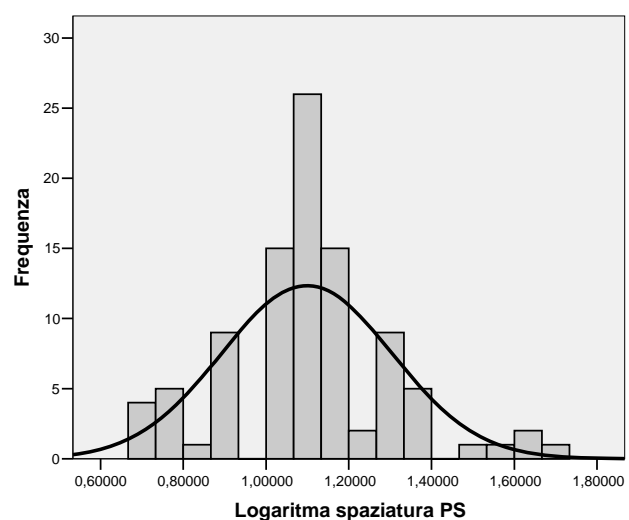


Figura 3.16: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi alla spaziatura media a piccola scala (*Famiglia K3*)

N° valid	127
Mean	1.10333247
Median	1.09691001
Mode	1.09691001
Std. Deviation	0.253
Variance	0.064
Skewness	0.201
Kurtosis	0.390
Range	1.26324143
Minimum	0.47712125
Maximum	1.74036269
Percentiles	
	25 1.00
	50 1.10
	75 1.18

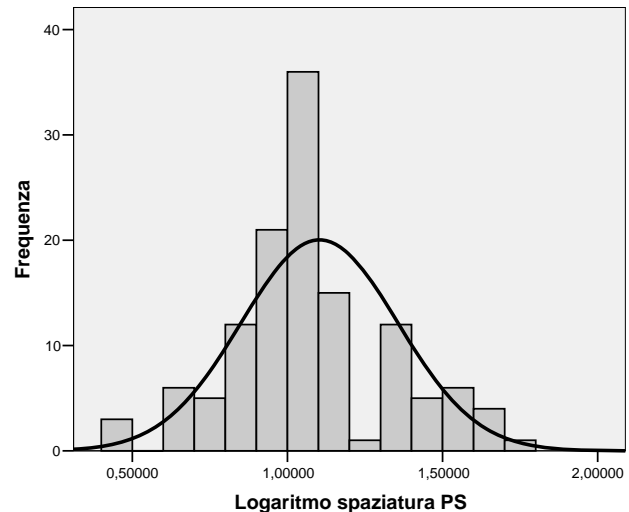


Figura 3.17: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi alla spaziatura media a piccola scala (Famiglia K4)

FAMIGLIA			Case Number	Value	FAMIGLIA			Case Number	Value
1	Highest	1	152	1.74036	3	Highest	1	404	1.69897
		2	70	1.69897			2	272	1.60206
		3	148	1.69897			3	347	1.60206
		4	147	1.65321			4	338	1.54407
		5	108	1.60206			5	423	1.47712
	Lowest	1	144	0.69897	Lowest	1	422	0.69897	
		2	158	0.81291		2	395	0.69897	
		3	128	0.81291		3	346	0.69897	
		4	165	0.87506		4	270	0.69897	
		5	163	0.87506		5	397	0.74036	
2	Highest	1	252	1.69897	4	Highest	1	463	1.74036
		2	187	1.65321			2	587	1.69897
		3	215	1.60206			3	598	1.69897
		4	240	1.60206			4	533	1.65321
		5	210	1.54407			5	531	1.60206
	Lowest	1	255	0.60206	Lowest	1	588	0.47712	
		2	216	0.74036		2	586	0.47712	
		3	170	0.81291		3	584	0.47712	
		4	246	0.87506		4	577	0.69897	
		5	212	0.87506		5	574	0.69897	

Tabella 3.3: Valori estremi della distribuzione di frequenza relativa al valore del logaritmo della spaziatura a piccola scala, in funzione delle famiglie di discontinuità

FAMIGLIA		PERCENTILES						
		5	10	25	50	75	90	95
1	Weighted Average	0.87506	1.00000	1.09691	1.17609	1.30103	1.60206	1.65321
2	Weighted Average	0.79840	0.87506	1.00000	1.17609	1.30103	1.50390	1.61229
3	Weighted Average	0.73415	0.80248	1.00000	1.09691	1.17609	1.36591	1.48716
4	Weighted Average	0.69897	0.77059	1.00000	1.09691	1.17609	1.47712	1.57403

Tabella 3.4: Valori percentili della distribuzione di frequenza relativa al valore del logaritmo della spaziatura a piccola scala, in funzione delle famiglie di discontinuità

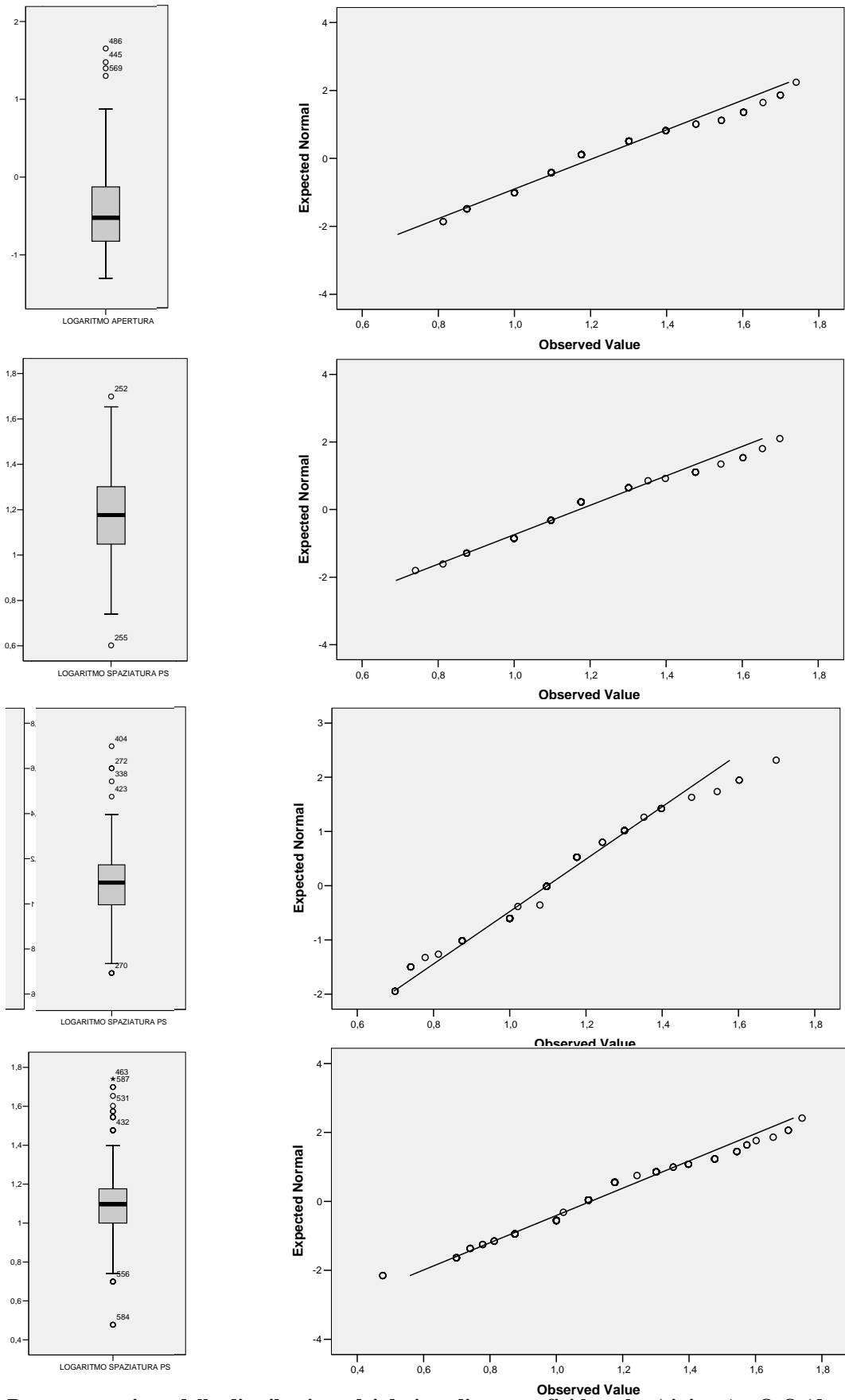


Figura 3.18: Rappresentazione della distribuzione dei dati mediante grafici boxplot (sinistra) e Q-Q (destra); dall'alto, rispettivamente *Famiglie K1, K2, K3, K4*

3.2.2 Apertura delle famiglie di discontinuità

Il parametro apertura delle discontinuità è particolarmente significativo ai fini della definizione delle caratteristiche del flusso idrico nell'ammasso. L'apertura contribuisce infatti in modo determinante alla definizione della permeabilità di una frattura. Nella valutazione del parametro è comunque necessario considerare che l'utilizzo di esplosivo nell'abbattimento dei fronti di scavo provoca un generale disturbo nell'ammasso ed un conseguente aumento dell'apertura.

L'apertura di cavità sotterranee nelle rocce, quali gallerie o cavità di maggiori dimensioni, determina infatti una perturbazione dello stato di sforzo agente sul mezzo e una conseguente redistribuzione degli sforzi accompagnata da deformazioni prevalentemente fragili dell'ammasso roccioso nella porzione immediatamente adiacente allo scavo. (Vedi Capitolo 4.1.1).

Vista l'irregolarità e la mancanza di parallelismo delle pareti che formano un giunto, i valori misurati variano notevolmente in un range abbastanza ampio anche per misure eseguite a poca distanza le une dalle altre sulla stessa frattura; durante il rilevamento si è quindi cercato di quantificare il range di variabilità del parametro eseguendo più misure e individuando gli estremi del campo di variabilità. Nell'analisi statistica dei dati si è scelto di utilizzare la media aritmetica delle misure, considerata rappresentativa dell'apertura dei giunti. Le distribuzioni di frequenza (Figura 3.19-3.23) mostrano come i valori siano, per la quasi totalità, al di sotto del centimetro, mentre all'aumentare dell'apertura gli istogrammi presentano frequenze via via minori, registrando i pochi valori ad elevata apertura misurati in corrispondenza dei lineamenti tettonici principali che attraversano l'area. L'elevata persistenza di queste strutture causa l'intercettazione di molti sistemi di fratture disposti su più livelli, costituendo così le direttrici principali di flusso nonostante il numero limitato di strutture presenti. Apparendo ancora la distribuzione dei dati log-normale, si applica la trasformazione logaritmica dei valori per cercare di ricondursi alla condizione di normalità. I risultati (Figura 3.24-3.28) mostrano un miglioramento della situazione iniziale, ma i test parametrici applicati non verificano la condizione di normalità della distribuzione che richiederebbe quindi l'utilizzo di trasformazioni matematiche più complesse.

N° valid	537
Mean	1.94704842
Median	0.35
Mode	0.3
Std. Deviation	5.830
Variance	33.991
Skewness	5.221
Kurtosis	30.986
Range	54.95
Minimum	0.05
Maximum	55
Percentiles	25 0.20
	50 0.35
	75 0.75

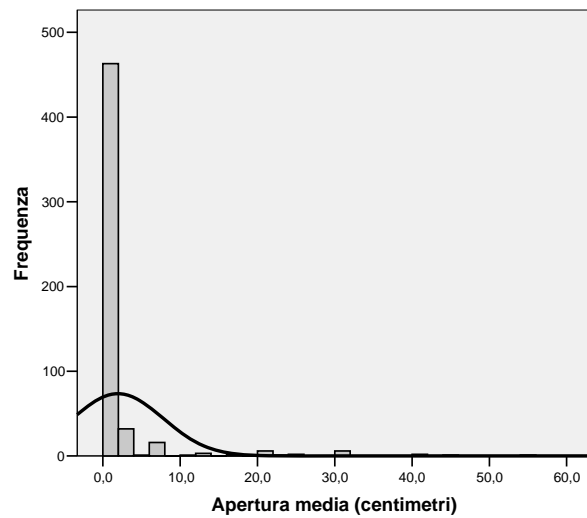


Figura 3.19: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi all'apertura media

N° valid	133
Mean	0.85808271
Median	0.3
Mode	0.3
Std. Deviation	2.202
Variance	4.848
Skewness	6.159
Kurtosis	46.183
Range	19.95
Minimum	0.05
Maximum	20
Percentiles	25 0.15
	50 0.30
	75 0.53

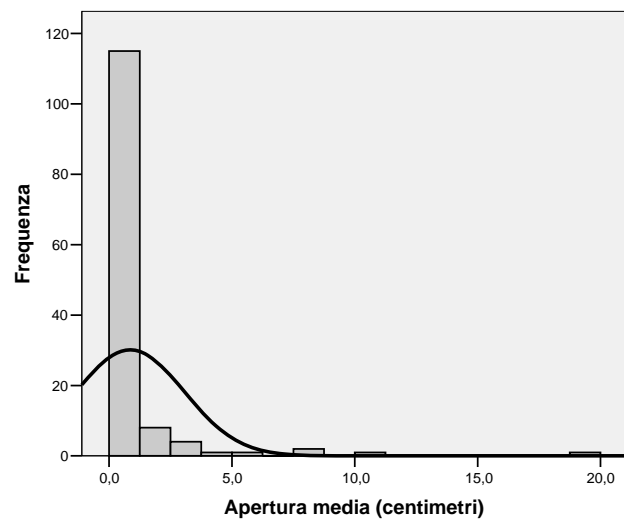


Figura 3.20: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi all'apertura media (*Famiglia K1*)

N° valid	83
Mean	4.40512048
Median	0.35
Mode	0.35
Std. Deviation	10.146
Variance	102.933
Skewness	3.165
Kurtosis	10.356
Range	54.95
Minimum	0.05
Maximum	55
Percentiles	25 0.30
	50 0.35
	75 2.00

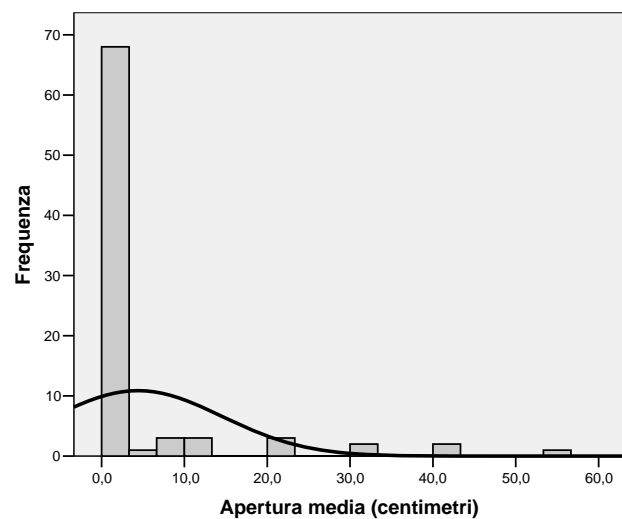


Figura 3.21: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi all'apertura media (*Famiglia K2*)

N° valid	140	
Mean	2.30125	
Median	0.375	
Mode	0.3	
Std. Deviation	5.663	
Variance	32.066	
Skewness	3.764	
Kurtosis	14.030	
Range	29.95	
Minimum	0.05	
Maximum	30	
Percentiles		
	25	0.30
	50	0.38
	75	1.44

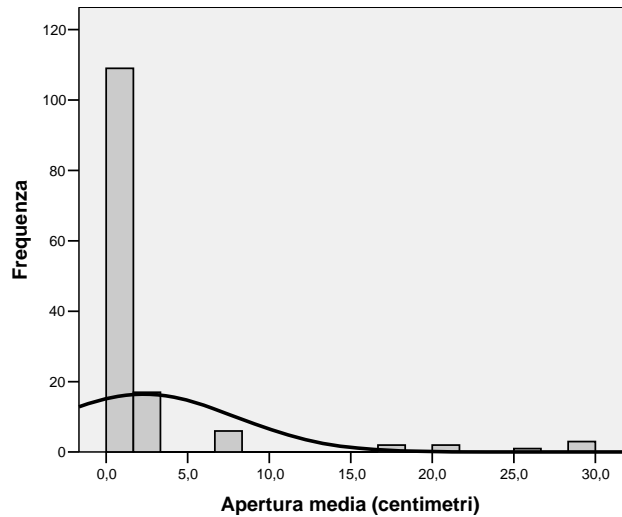


Figura 3.22: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi all'apertura media (Famiglia K3)

N° valid	164	
Mean	1.43402439	
Median	0.3	
Mode	0.55	
Std. Deviation	4.902	
Variance	24.028	
Skewness	6.642	
Kurtosis	48.752	
Range	44.95	
Minimum	0.05	
Maximum	45	
Percentiles		
	25	0.15
	50	0.30
	75	0.75

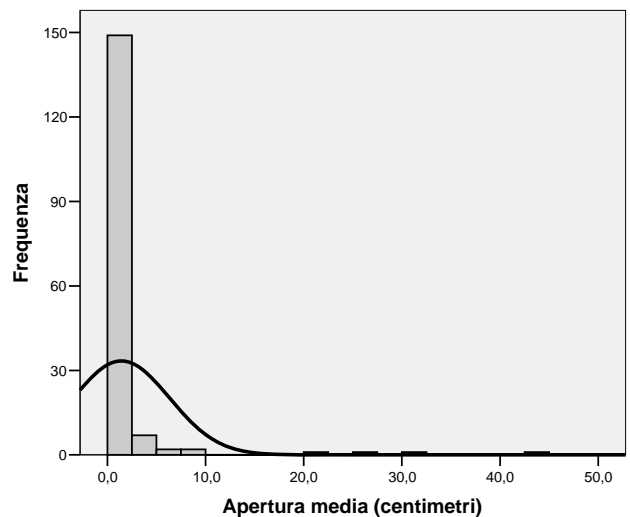


Figura 3.23: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi all'apertura media (Famiglia K4)

N° valid	537	
Mean	-0.31874926	
Median	-0.45593196	
Mode	-0.52287875	
Std. Deviation	0.595	
Variance	0.354	
Skewness	1.125	
Kurtosis	1.426	
Range	3.04139269	
Minimum	-1.30103	
Maximum	1.74036269	
Percentiles		
	25	-0.70
	50	-0.46
	75	-0.12

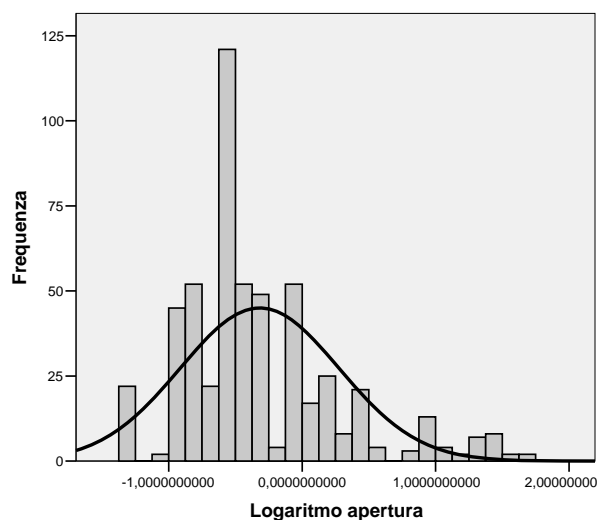


Figura 3.24: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi al logaritmo dell'apertura media

N° valid	133	
Mean	-0.47503622	
Median	-0.52287875	
Mode	-0.52287875	
Std. Deviation	0.494	
Variance	0.244	
Skewness	1.090	
Kurtosis	1.615	
Range	2.60205999	
Minimum	-1.30103	
Maximum	1.30103	
Percentiles		
	25	-0.82
	50	-0.52
	75	-0.28

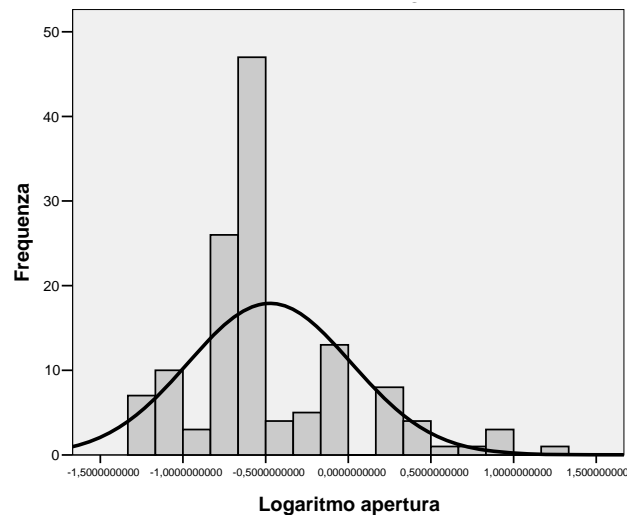


Figura 3.25: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi al logaritmo dell'apertura media (*Famiglia K1*)

N° valid	83	
Mean	-0.10445764	
Median	-0.45593196	
Mode	-0.45593196	
Std. Deviation	0.746	
Variance	0.556	
Skewness	0.914	
Kurtosis	0.025	
Range	3.04139269	
Minimum	-1.30103	
Maximum	1.74036269	
Percentiles		
	25	-0.52
	50	-0.46
	75	0.30

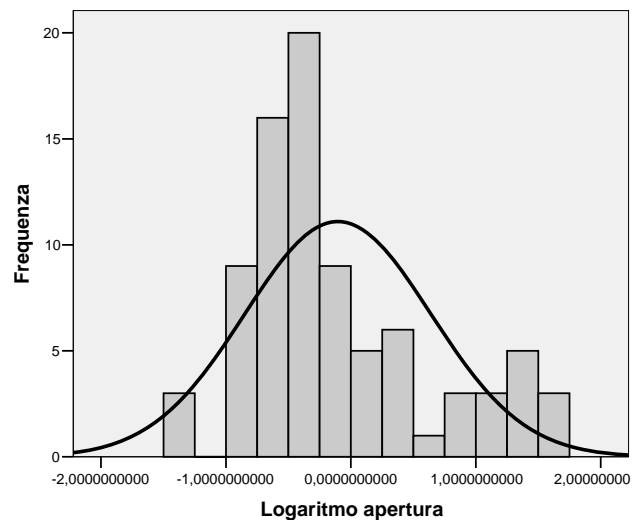


Figura 3.26: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi al logaritmo dell'apertura media (*Famiglia K2*)

N° valid	140	
Mean	-0.18913274	
Median	-0.42693598	
Mode	-0.52287875	
Std. Deviation	0.589	
Variance	0.347	
Skewness	1.045	
Kurtosis	1.099	
Range	2.77815125	
Minimum	-1.30103	
Maximum	1.47712125	
Percentiles		
	25	-0.52
	50	-0.43
	75	0.16

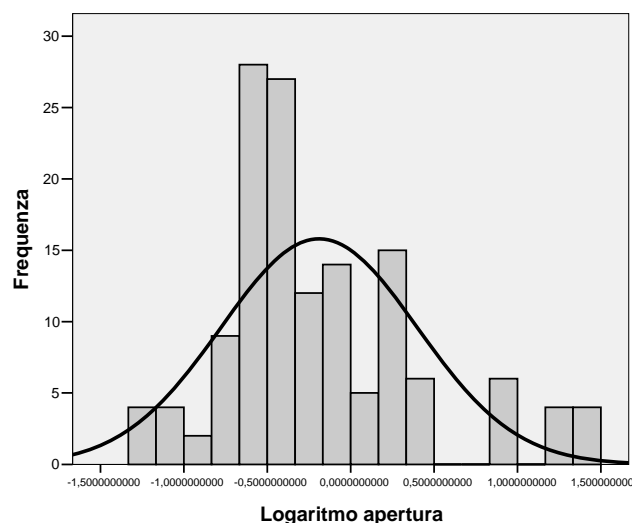


Figura 3.27: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi al logaritmo dell'apertura media (*Famiglia K3*)

N° valid	164
Mean	-0.37815986
Median	-0.52287875
Mode	-0.25963731
Std. Deviation	0.540
Variance	0.291
Skewness	1.118
Kurtosis	2.043
Range	2.95424251
Minimum	-1.30103
Maximum	1.65321251
Percentiles	
	25 -0.82
	50 -0.52
	75 -0.12

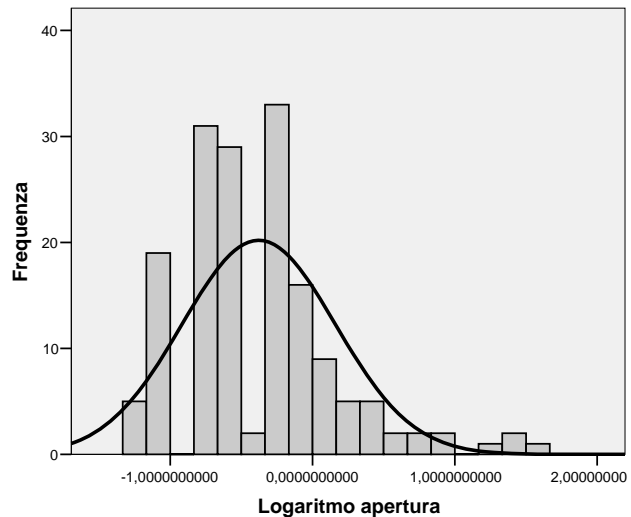


Figura 3.28: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi al logaritmo dell'apertura media (Famiglia K4)

FAMIGLIA	Case Number	Value	FAMIGLIA	Case Number	Value
1	Highest	1 74 1.30103	3	Highest	1 316 1.47712
		2 71 1.00000			2 321 1.47712
		3 68 0.87506			3 357 1.47712
		4 126 0.87506			4 420 1.39794
		5 72 0.77815			5 317 1.30103
	Lowest	1 144 -1.30103		Lowest	1 406 -1.30103
		2 139 -1.30103			2 404 -1.30103
		3 109 -1.30103			3 399 -1.30103
		4 51 -1.30103			4 397 -1.30103
		5 48 -1.30103			5 365 -1.00000
2	Highest	1 169 1.74036	4	Highest	1 486 1.65321
		2 168 1.60206			2 445 1.47712
		3 203 1.60206			3 468 1.39794
		4 171 1.47712			4 569 1.30103
		5 217 1.47712			5 582 0.87506
	Lowest	1 254 -1.30103		Lowest	1 579 -1.30103
		2 246 -1.30103			2 559 -1.30103
		3 245 -1.30103			3 531 -1.30103
		4 257 -1.00000			4 467 -1.30103
		5 212 -1.00000			5 487 -1.25964

Tabella 3.5: Valori estremi della distribuzione di frequenza relativa al valore del logaritmo dell'apertura media, in funzione delle famiglie di discontinuità

FAMIGLIA	PERCENTILES						
	5	10	25	50	75	90	95
1	Weighted Average -1.30103	-1.00000	-0.82391	-0.52288	-0.28033	0.25105	0.51460
2	Weighted Average -1.00000	-0.82391	-0.52288	-0.45593	0.30103	1.21938	1.47712
3	Weighted Average -1.00000	-0.69897	-0.52288	-0.42694	0.15630	0.83527	1.24304
4	Weighted Average -1.00000	-1.00000	-0.82391	-0.52288	-0.12494	0.30103	0.71963

Tabella 3.3: Valori percentili della distribuzione di frequenza relativa al valore del logaritmo dell'apertura media, in funzione delle famiglie di discontinuità

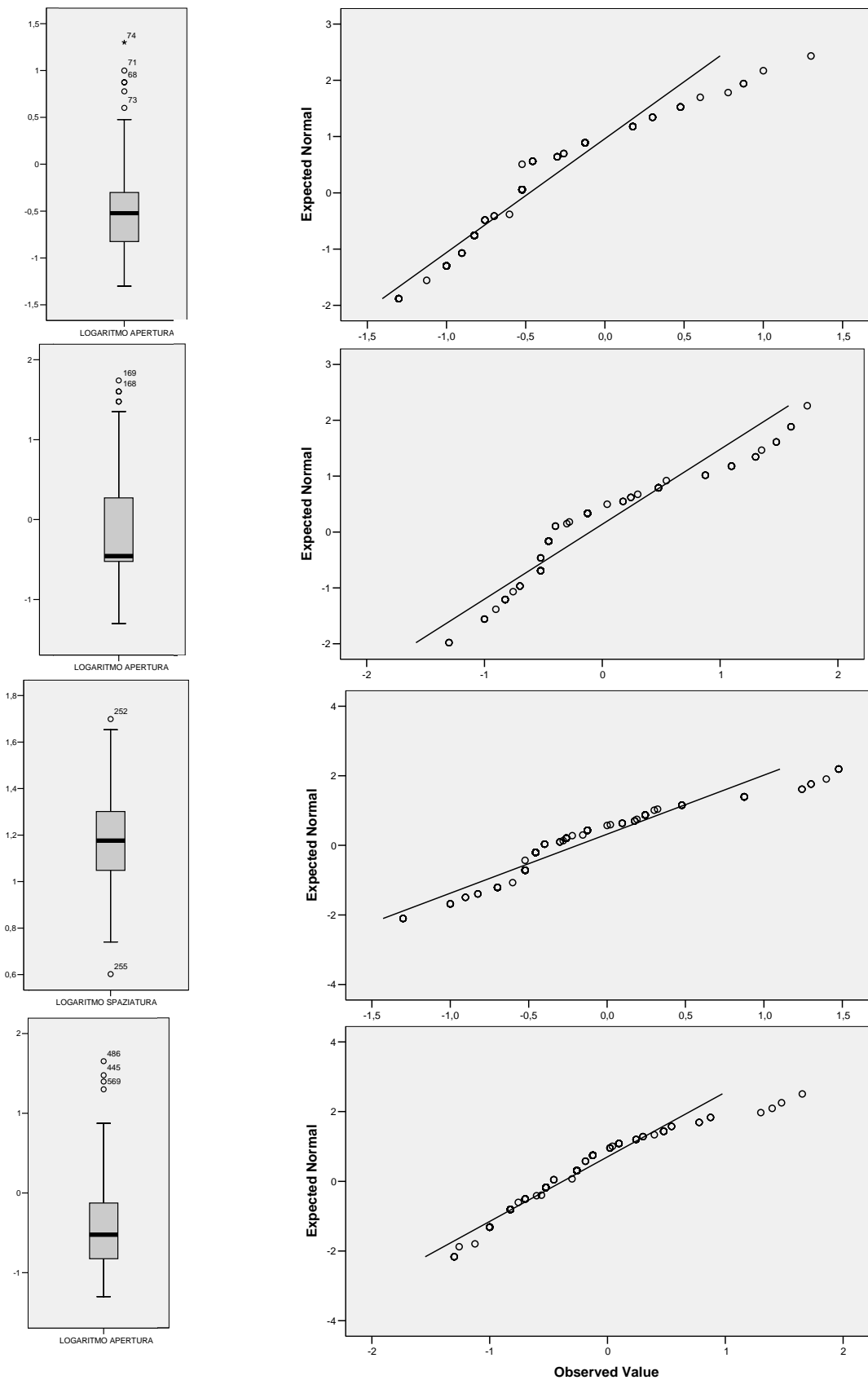


Figura 3.29: Rappresentazione della distribuzione dei dati mediante grafici boxplot (sinistra) eQ-Q (destra); dall'alto, rispettivamente *Famiglie K1, K2, K3, K4*

La mancanza di alcuni valori negli istogrammi relativi al logaritmo dell'apertura media (Figura 3.24-3.28), è il motivo principale per cui l'applicazione dei test statistici non parametrici per la verifica della normalità della distribuzione, dà esiti negativi; tale problema deriva dalle modalità, per classi di aperture, con cui sono stati acquisiti i dati. Durante il lavoro di terreno si è deciso, infatti, di adottare il sistema classificativo proposto dall'ISRM (1981) per la descrizione delle aperture, integrato da ulteriori suddivisioni delle classi. Questa metodologia permette di caratterizzare accuratamente la distribuzione per valori di apertura inferiori al mezzo centimetro, mentre, a causa dell'ampiezza delle classi utilizzate, maggiori problematiche nascono per aperture comprese fra mezzo e pochi centimetri, ove si introduce una notevole approssimazione del dato reale.

3.2.3 Alterazione, riempimento e presenza d'acqua nelle famiglie di discontinuità

L'analisi statistica dei parametri alterazione, riempimento e presenza d'acqua nelle famiglie di discontinuità è stata condotta dapprima considerando la totalità dei valori (Figura 3.30, 3.35 e 3.40), distinguendoli poi in funzione delle famiglie al fine di studiare la variabilità dei parametri tra i diversi set (Figure 3.31-3.34, 3.36-3.39, 3.41-3.44). La suddivisione in classi delle tre variabili (secondo le indicazioni dell'ISRM) porta evidenti vantaggi durante il rilevamento, ai quali si contrappone lo svantaggio insito nel fatto di lavorare con variabili qualitative di tipo ordinale, con le limitazioni che ne derivano: costruzione di sole 4 classi per l'alterazione ed il riempimento, 6 in funzione del contenuto idrico crescente. Come già specificato nel capitolo 2, l'alterazione è stata classificata secondo lo standard ISRM, in quattro classi WD1, WD2, WD3 e WD4 che sono state successivamente denominate 1, 2, 3 e 4. Il riempimento è stato classificato in 4 classi denominate 1, 2, 3 e 4, corrispondenti all'assenza, alla presenza di materiale incoerente, sabbioso-limoso e limoso-sabbioso-argilloso. La presenza d'acqua è stata registrata utilizzando 6 classi: 1) discontinuità asciutta; 2) discontinuità bagnata, senza filtrazione; 3) leggero stillicidio (1 goccia minuto, circa); 4) stillicidio discontinuo; 5) stillicidio continuo 6) flusso continuo d'acqua.

N° valid	563
Mean	1.80817052
Median	2
Mode	1
Std. Deviation	0.935
Variance	0.874
Skewness	0.836
Kurtosis	-0.417
Range	3
Minimum	1
Maximum	4
Percentiles	25 1.00
	50 2.00
	75 2.00

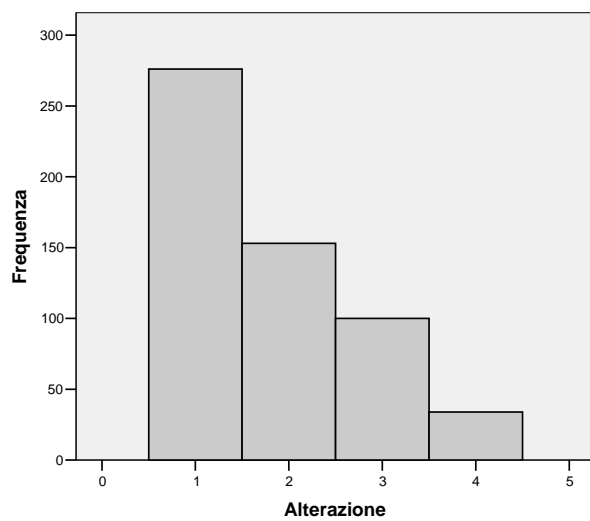


Figura 3.30: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi al grado di alterazione della totalità delle discontinuità

N° valid	140
Mean	1.62142857
Median	1
Mode	1
Std. Deviation	0.869
Variance	0.755
Skewness	1.155
Kurtosis	0.216
Range	3
Minimum	1
Maximum	4
Percentiles	25 1.00
	50 1.00
	75 2.00

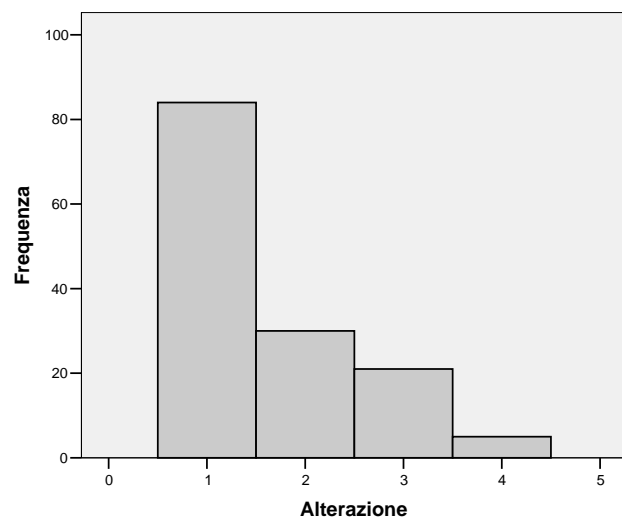


Figura 3.31: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi al grado di alterazione delle discontinuità (Famiglia K1)

N° valid	91
Mean	2.05494505
Median	2
Mode	1
Std. Deviation	0.982
Variance	0.964
Skewness	0.321
Kurtosis	-1.164
Range	3
Minimum	1
Maximum	4
Percentiles	25 1.00
	50 2.00
	75 3.00

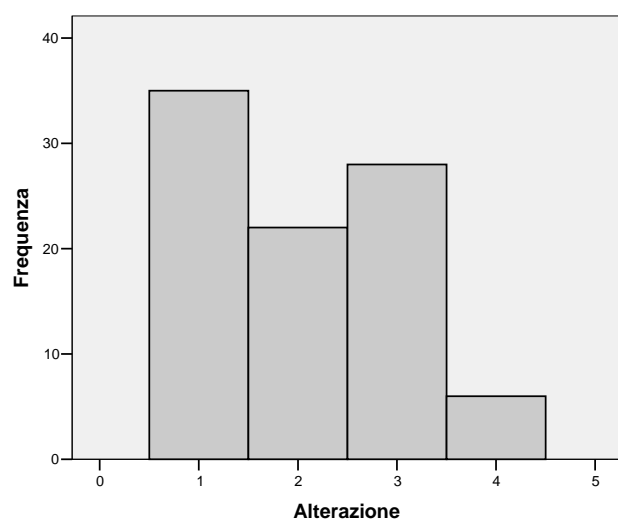


Figura 3.32: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi al grado di alterazione delle discontinuità (Famiglia K2)

N° valid	144
Mean	2.02083333
Median	2
Mode	1
Std. Deviation	1.048
Variance	1.097
Skewness	0.661
Kurtosis	-0.789
Range	3
Minimum	1
Maximum	4
Percentiles	25 1.00
	50 2.00
	75 3.00

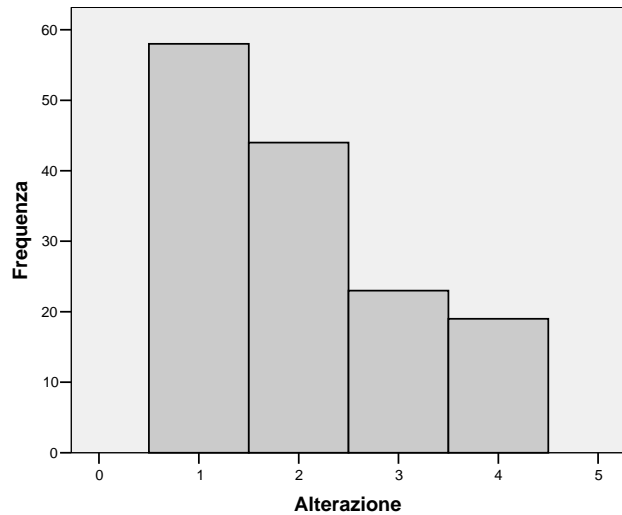


Figura 3.33: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi al grado di alterazione delle discontinuità (Famiglia K3)

N° valid	168
Mean	1.66666667
Median	1
Mode	1
Std. Deviation	0.816
Variance	0.667
Skewness	0.953
Kurtosis	-0.041
Range	3
Minimum	1
Maximum	4
Percentiles	25 1.00
	50 1.00
	75 2.00

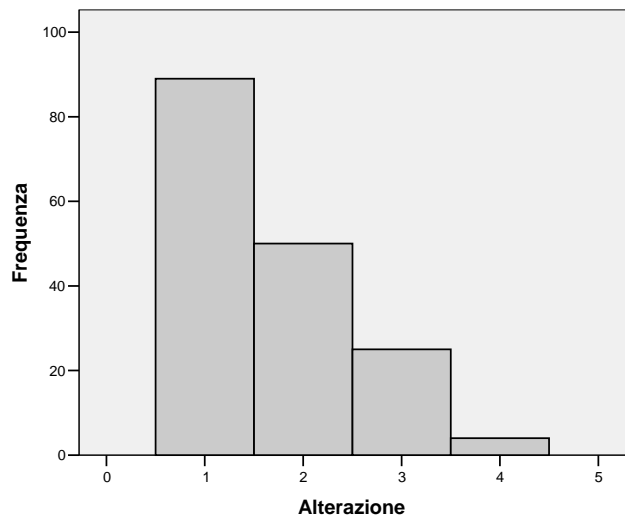


Figura 3.34: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi al grado di alterazione delle discontinuità (Famiglia K4)

N° valid	553
Mean	1.62025316
Median	1
Mode	1
Std. Deviation	0.759
Variance	0.577
Skewness	1.183
Kurtosis	1.104
Range	3
Minimum	1
Maximum	4
Percentiles	25 1.00
	50 1.00
	75 2.00

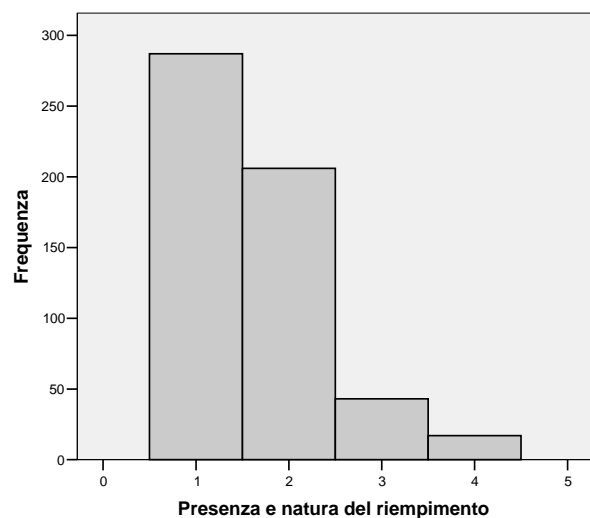


Figura 3.35: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi alla presenza e natura del riempimento della totalità delle discontinuità

N° valid	140	
Mean	1.53571429	
Median	1	
Mode	1	
Std. Deviation	0.877	
Variance	0.768	
Skewness	1.645	
Kurtosis	1.796	
Range	3	
Minimum	1	
Maximum	4	
Percentiles		
	25	1.00
	50	1.00
	75	2.00

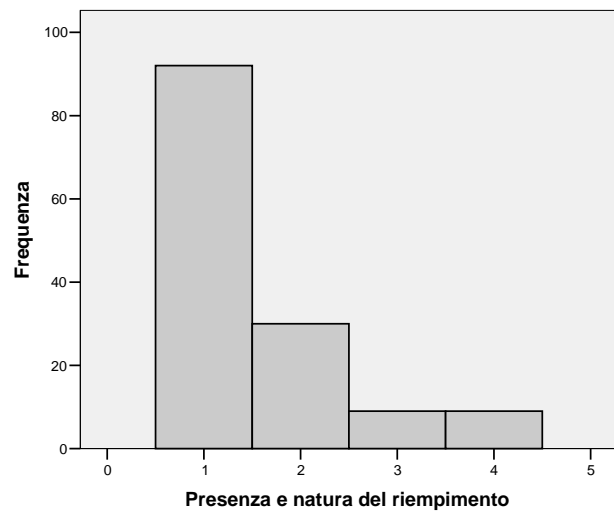


Figura 3.36: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi alla presenza e natura del riempimento delle discontinuità (*Famiglia K1*)

N° valid	85	
Mean	1.68235294	
Median	2	
Mode	1	
Std. Deviation	0.694	
Variance	0.481	
Skewness	0.520	
Kurtosis	-0.804	
Range	2	
Minimum	1	
Maximum	3	
Percentiles		
	25	1.00
	50	2.00
	75	2.00

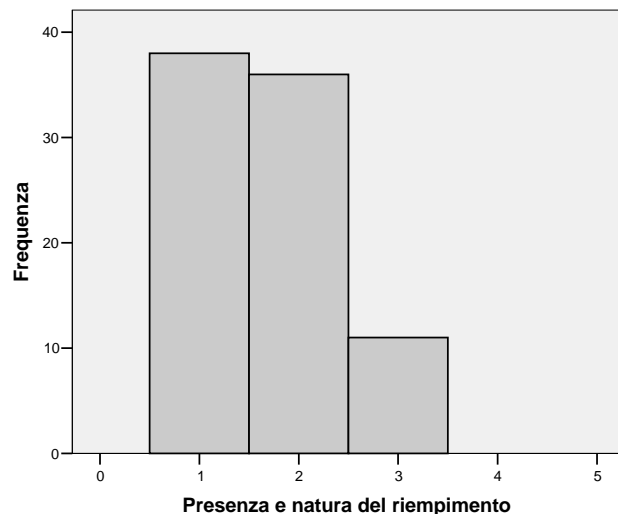


Figura 3.37: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi alla presenza e natura del riempimento delle discontinuità (*Famiglia K2*)

N° valid	142	
Mean	1.64788732	
Median	2	
Mode	2	
Std. Deviation	0.686	
Variance	0.471	
Skewness	0.987	
Kurtosis	1.303	
Range	3	
Minimum	1	
Maximum	4	
Percentiles		
	25	1.00
	50	2.00
	75	2.00

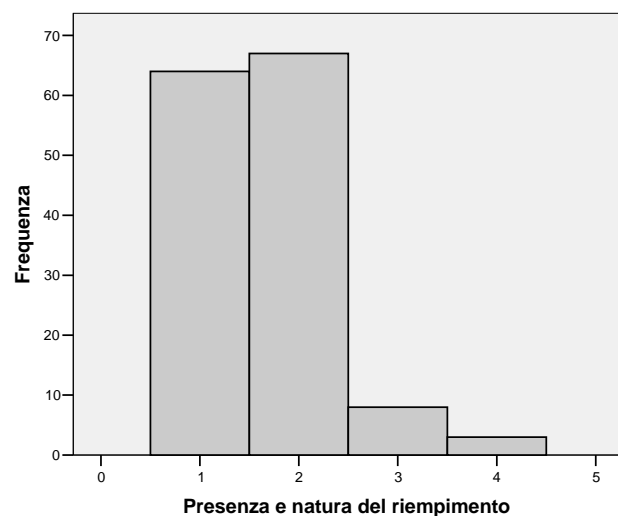


Figura 3.38: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi alla presenza e natura del riempimento delle discontinuità (*Famiglia K3*)

N° valid	166
Mean	1.6746988
Median	2
Mode	1
Std. Deviation	0.764
Variance	0.584
Skewness	1.041
Kurtosis	0.801
Range	3
Minimum	1
Maximum	4
Percentiles	25 1.00
	50 2.00
	75 2.00

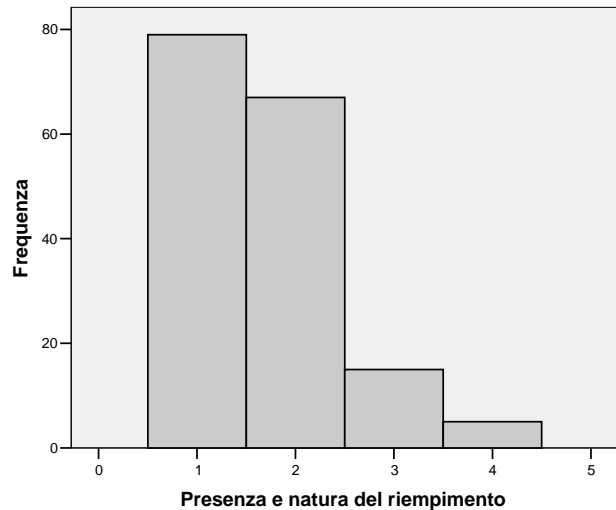


Figura 3.39: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi alla presenza e natura del riempimento delle discontinuità (*Famiglia K4*)

N° valid	559
Mean	2.47406082
Median	1
Mode	1
Std. Deviation	1.771
Variance	3.135
Skewness	0.750
Kurtosis	-0.871
Range	5
Minimum	1
Maximum	6
Percentiles	25 1.00
	50 1.00
	75 4.00

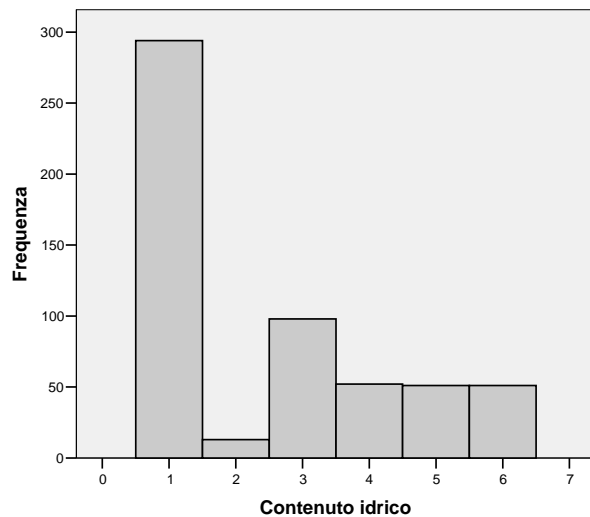


Figura 3.40: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi al contenuto idrico della totalità delle discontinuità

N° valid	140
Mean	2.12857143
Median	1
Mode	1
Std. Deviation	1.644
Variance	2.703
Skewness	1.122
Kurtosis	-0.152
Range	5
Minimum	1
Maximum	6
Percentiles	25 1.00
	50 1.00
	75 3.00

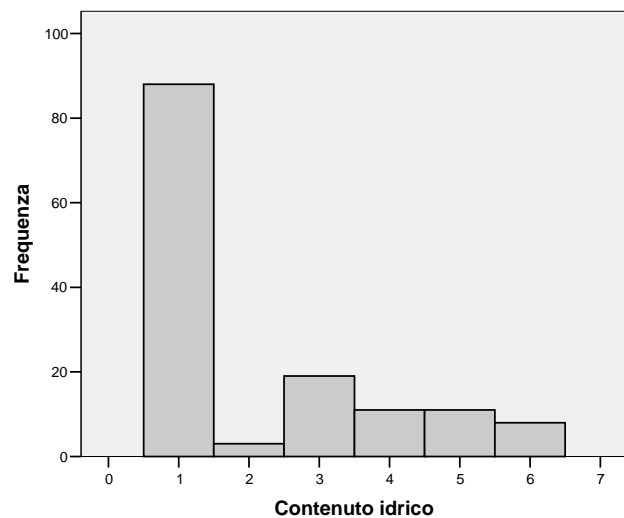


Figura 3.41: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi al contenuto idrico delle discontinuità (*Famiglia KI*)

N° valid	87	
Mean	2.37931034	
Median	2	
Mode	1	
Std. Deviation	1.594	
Variance	2.540	
Skewness	0.851	
Kurtosis	-0.331	
Range	5	
Minimum	1	
Maximum	6	
Percentiles		
	25	1.00
	50	2.00
	75	3.00

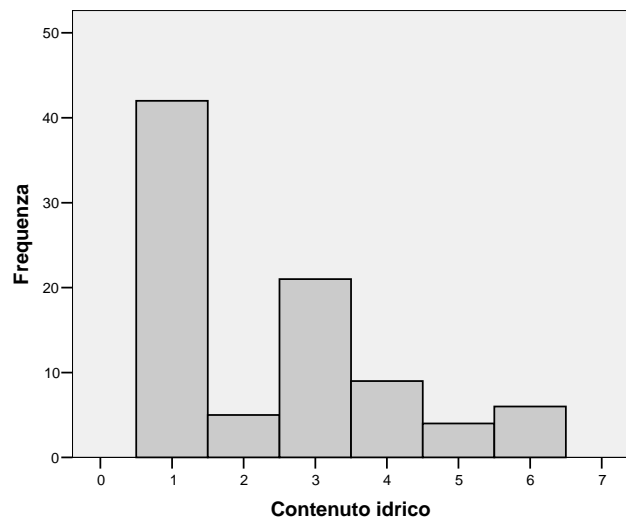


Figura 3.42: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi al contenuto idrico delle discontinuità (*Famiglia K2*)

N° valid	144	
Mean	2.32638889	
Median	1	
Mode	1	
Std. Deviation	1.729	
Variance	2.991	
Skewness	0.915	
Kurtosis	-0.565	
Range	5	
Minimum	1	
Maximum	6	
Percentiles		
	25	1.00
	50	1.00
	75	4.00

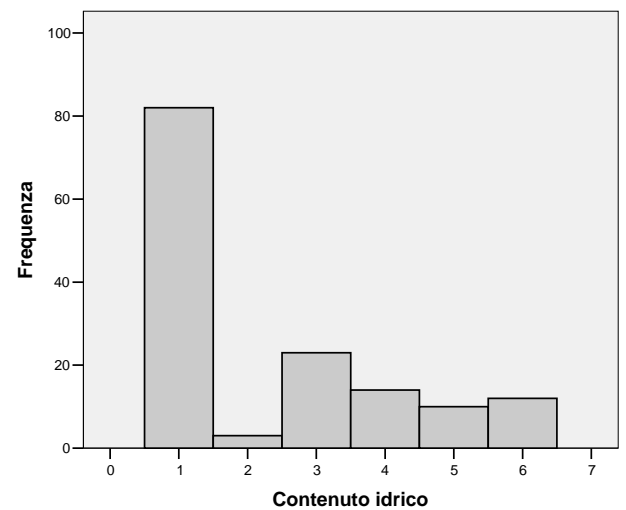


Figura 3.43: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi al contenuto idrico delle discontinuità (*Famiglia K3*)

N° valid	168	
Mean	2.91071429	
Median	3	
Mode	1	
Std. Deviation	1.936	
Variance	3.746	
Skewness	0.363	
Kurtosis	-1.432	
Range	5	
Minimum	1	
Maximum	6	
Percentiles		
	25	1.00
	50	3.00
	75	5.00

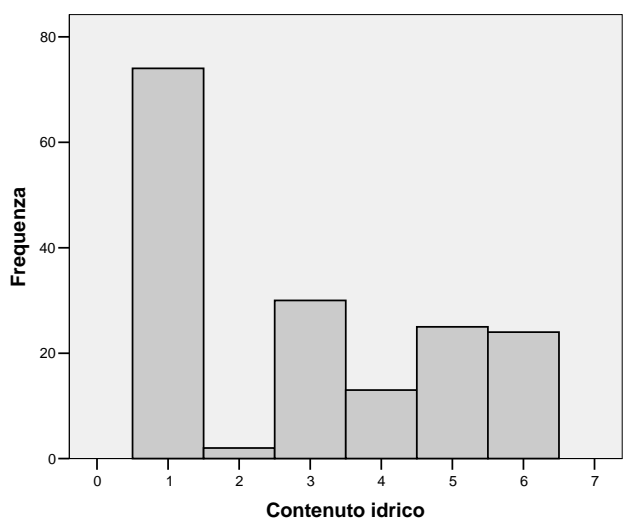


Figura 3.44: Parametri statistici principali e istogramma di frequenza relativi al contenuto idrico delle discontinuità (*Famiglia K4*)

Gli istogrammi di frequenza presentati mostrano un andamento simile, con leggeri scostamenti, solo per i set K2 e K3, che mostrano un grado d'alterazione leggermente maggiore. Negli istogrammi relativi al contenuto idrico (Figura 3.40-3.44), la classe 1, secca, è la più frequente, rappresentando circa il 50% dei casi totali. Ciò nel complesso evidenzia come le strutture principali siano molto spesso sede di circolazione idrica più o meno intensa. La sostanziale somiglianza riscontrata fra le quattro famiglie di discontinuità, è giustificata dal fatto che le variazioni spaziali dei tre parametri studiati siano da imputare più alla posizione delle discontinuità all'interno dell'area di cava che alla loro appartenenza ad una determinata famiglia.

3.3 Analisi geostatistica dei dati

3.3.1 Introduzione teorica

I primi studi di analisi geostatistica furono proposti da Kolmogorov, Weiner, Matern e Grandin nei primi anni del 1900; nonostante ciò, la geostatistica nasce ufficialmente solo negli anni '60 ad opera dell'ingegnere minerario Krige e dello statistico Sichel, con l'obiettivo di risolvere problematiche nel campo della ricerca mineraria. L'approccio geostatistico permette la modellizzazione stocastica del fenomeno studiato, attraverso una funzione aleatoria caratterizzata da una legge spaziale.

La geostatistica fornisce un insieme di tecniche probabilistiche per l'analisi delle informazioni arealmente distribuite con l'obiettivo di trovare un modello che descriva la dipendenza spaziale fra le osservazioni e di utilizzare questo modello per stimare i valori della variabile in punti non campionati (con un errore che descriva l'incertezza di tale stima). Il modello è tanto più conforme alla realtà quanto più i dati di partenza rappresentano un'immagine fedele della realtà stessa. Ogni punto interno ad un'area rappresenta un campione di una distribuzione che sarà differente nella forma, media e varianza a seconda della posizione occupata. Il problema principale legato ad un fenomeno geologico è la rappresentazione della variabilità della funzione nello spazio; la soluzione geostatistica interpreta ogni valore come una particolare realizzazione di una variabile aleatoria nel punto. I vantaggi legati all'efficacia dei metodi probabilistici devono essere confrontati con le reali difficoltà di manipolazione dei dati. Alcuni processi fisici che generano i data set sono conosciuti con un dettaglio tale che bastano pochi campioni per un'accurata descrizione del fenomeno e per l'applicazione di un modello deterministico; questo non accade per i processi geologici, che non sono abbastanza conosciuti da permettere

l'applicazione di tale modello. Le variabili d'interesse sono il risultato di un vasto numero di processi le cui complesse interazioni sono difficilmente descrivibili quantitativamente.

Le variabili regionalizzate

Nella gran parte dei dataset si palesano incertezze sul comportamento del fenomeno nello spazio compreso fra un campione e l'altro; i modelli relativi alla funzione casuale riconoscono tale incertezza, fornendo i mezzi per stimare i valori della variabile regionalizzata in punti non campionati, una volta stabilite le ipotesi circa le caratteristiche statistiche del fenomeno. La maggior parte delle variabili geologiche mostrano, oltre ad un trend a grande scala che può essere ragionevolmente descritto da funzioni deterministiche, anche una serie di variazioni a piccola scala; l'idea base della geostatistica ipotizza l'esistenza di una correlazione fra valori situati a differenti distanze, ossia si basa sull'ipotesi che campioni vicini siano più simili di campioni lontani (Tobler, 1970).

I processi e le fasi deformative che hanno interessato il giacimento di quarzo sono molto complessi e la conoscenza che ne abbiamo non è sufficiente a descriverli completamente; ciò implica la difficoltà di prevederne il comportamento dove non si hanno valori campionati. Sebbene i dati trattati non siano il risultato di processi casuali, un tale concetto può risultare utile nei problemi di stima dei valori sconosciuti; è possibile dunque affermare che un processo casuale genera una serie qualsiasi di dati e che le procedure più usate in geostatistica non richiedano una completa definizione statistico-matematica del fenomeno, ma che sia sufficiente specificarne alcuni parametri (media e variabilità).

Il termine "variabile regionalizzata" fu scelto per evidenziare due aspetti caratteristici delle variabili: uno "casuale" che enfatizza la nozione di variabile aleatoria, tenendo conto delle irregolarità locali del fenomeno naturale, ed uno "generale" che riflette le tendenze a grande scala del fenomeno. Nel caso estremo in cui manchi la componente casuale, la variabile regionalizzata può essere descritta dal solo trend rappresentabile attraverso una funzione matematica. Un obiettivo della geostatistica è l'identificazione delle due componenti al fine di risolvere il problema della stima di una variabile regionalizzata a partire da informazioni puntuali quali quelle fornite dai campioni rilevati. Lo studio geostatistico di un fenomeno naturale si articola in una serie di fasi di seguito descritte.

Analisi della struttura di correlazione spaziale della variabile regionalizzata: studio del variogramma

Il concetto di struttura e continuità spaziale di un fenomeno naturale è rappresentato graficamente dal variogramma; ai fini della stima di una variabile risulta essenziale lo studio della variabilità spaziale della popolazione effettuato tramite l'analisi del variogramma sperimentale. La variabilità, legata alla distanza fra i campioni, indica l'interdipendenza dei valori di una variabile in due punti separati da una certa distanza (h) al variare della stessa; essendo due punti ravvicinati maggiormente correlabili, la varianza ($\gamma(h)$) aumenta all'aumentare di h . Fissata una direzione di ricerca, il variogramma indica come cambiano i valori della variabile all'aumentare della distanza fra le coppie di campioni; variando l'angolo di costruzione si evidenziano le caratteristiche direzionali del parametro studiato (anisotropia). Da un punto di vista matematico il variogramma è la media delle differenze quadratiche fra le coppie di valori, calcolata per ogni classe di distanza di separazione. Attraverso il variogramma viene valutata l'influenza di un dato, localizzato in un certo punto dello spazio, sui valori assunti dalle misure circostanti; l'obiettivo è ottenere la stima del valore della variabile oggetto di studio in punti limitrofi non campionati. Calcolo ed interpretazione del variogramma sperimentale costituiscono il primo passo dello studio geostatistico; le principali operazioni da seguire riguardano la definizione delle sue proprietà, individuando il modello teorico che meglio approssima il modello sperimentale.

Modellizzazione del variogramma sperimentale

Il metodo più semplice per raffrontare due dati è il calcolo della loro differenza ma, volendo confrontare un elevato numero di coppie di campioni, è necessario elevare al quadrato il valore della differenza evitando così che differenze positive e negative vengano sommate annullandosi in media. L'espressione analitica del variogramma è espressa dalla relazione:

$$\gamma(h) = \frac{1}{2} E \left\{ [Z(x_0) - Z(x_0 + h)]^2 \right\}$$

Su di un grafico x-y sono riportate, in ordinata, le differenze quadratiche medie fra campioni separati da una certa distanza h che viene riportata in ascissa. Calcolato il variogramma, si passa alla sua interpretazione, cioè alla ricerca di un modello, descritto da funzioni matematiche, che meglio approssima la forma del variogramma sperimentale; questo processo di modellizzazione permette di ricavare i parametri che descrivono la variabilità spaziale della variabile. La rapidità

con cui il variogramma “cresce” al variare della distanza indica quanto velocemente l’influenza di un dato diminuisce con la distanza; quando la curva raggiunge un valore asintotico (soglia), non esiste più alcuna correlazione spaziale fra le misure. Questa distanza critica (range) definisce la “zona d’influenza”; la teoria dimostra come il valore del variogramma alla distanza dove non esiste più correlazione corrisponde alla varianza della popolazione. Range limitati indicano una rapida perdita di correlazione tra i dati all’aumentare della distanza; range elevati indicano invece una buona correlazione spaziale dei valori su grandi distanze. I parametri che caratterizzano la forma e, quindi, le proprietà del variogramma sono riassunti nell’elenco seguente:

- *Comportamento all’origine o effetto pepita (nugget effect)* indica la variabilità campionaria a piccola scala, e quindi la mancanza di correlazione spaziale per campioni molto vicini. L’effetto pepita esprime la componente casuale (non strutturata) dei dati; la maggior parte dei variogrammi presenta un effetto pepita più o meno marcato.
- Il *range* corrisponde al valore del lag in corrispondenza del quale il variogramma assume valore costante; indica quindi la massima distanza di correlabilità tra le misure.
- La *soglia (sill)* è il valore assunto dal variogramma in corrispondenza del *range*.
- La *pendenza* del variogramma indica la continuità dei dati in una certa regione; pendenze poco accentuate individuano gradualità cambiamenti della variabilità su lunghe distanze.
- Il *passo (lag)* è la distanza utilizzata per confrontare le differenze fra le misure e dovrebbe essere scelto in funzione del modello di campionamento: se il campionamento è regolare il lag dovrebbe coincidere col passo della maglia di campionamento; per un campionamento casuale il passo si sceglie in genere pari alla distanza media fra i campioni. Lag troppo brevi formano variogrammi con numerose fluttuazioni, mentre lag troppo grandi danno luogo a variogrammi addolciti.

La parte più importante del variogramma è quella vicino all’origine, che stima la variabilità del dato per piccole distanze, ed è funzione della continuità e regolarità spaziale della variabile; si parla in questo caso di comportamento all’origine del variogramma.

Al fine di indagare la presenza di anisotropie nella distribuzione spaziale dei dati si calcolano i variogrammi direzionali lungo una specifica direzione e con una specifica tolleranza angolare. In geostatistica viene suggerito di eseguire l’analisi dell’anisotropia modellizzando i variogrammi per le direzioni 0, 45, 90 e 135 gradi, misurati rispetto al nord, con tolleranza angolare di 22.5°.

Esaminando le variazioni dei valori di range e soglia per i variogrammi calcolati lungo differenti direzioni si identificano gli assi di anisotropia, cioè le direzioni in cui il fenomeno si manifesta più o meno spiccatamente. Qualora i variogrammi non mostrino andamenti regolari (fluttuazioni della varianza all'aumentare della distanza di correlazione) è indispensabile studiare i diagrammi di dispersione relativi a ciascun passo; identificate le ragioni per le quali il variogramma manca di una chiara struttura, si riadattano i calcoli alla luce delle nuove conoscenze, eliminando eventualmente i campioni che portano ad un'eccessiva variabilità.

Ricerca di un modello teorico per la descrizione della correlazione spaziale

Un corretto studio variografico analizza in prima istanza la continuità spaziale della variabile attraverso la costruzione di un variogramma omnidirezionale, in cui la tolleranza angolare sia abbastanza ampia da comprendere tutte le direzioni dei vettori di separazione; tale tipologia di variogramma è considerato come la media di tutti i modelli direzionali. Il calcolo di un variogramma omnidirezionale non implica la continuità spaziale della variabile in tutte le direzioni, ma è il punto di partenza per stabilire i parametri richiesti nei calcoli variografici. Poiché la direzione non assume un ruolo determinante, in questa fase si cercano i parametri di distanza che producono la struttura più chiara e le prime indicazioni circa le irregolarità presenti nei variogrammi direzionali. Nel processo matematico di interpolazione per kriging, è richiesto un modello che comprenda il valore dei variogrammi per ogni possibile vettore di separazione. È quindi necessario definire un modello teorico di variogramma che soddisfi le condizioni matematiche imposte dal modello risolutivo. Tra i modelli possibili, quelli di più comune utilizzo sono di seguito descritti (Figura 3.45). Si ricorda che ogni combinazione lineare di modelli costituisce anch'essa un modello ammissibile; da ciò consegue che modelli diversi possono essere combinati per meglio rappresentare la forma di un variogramma sperimentale.

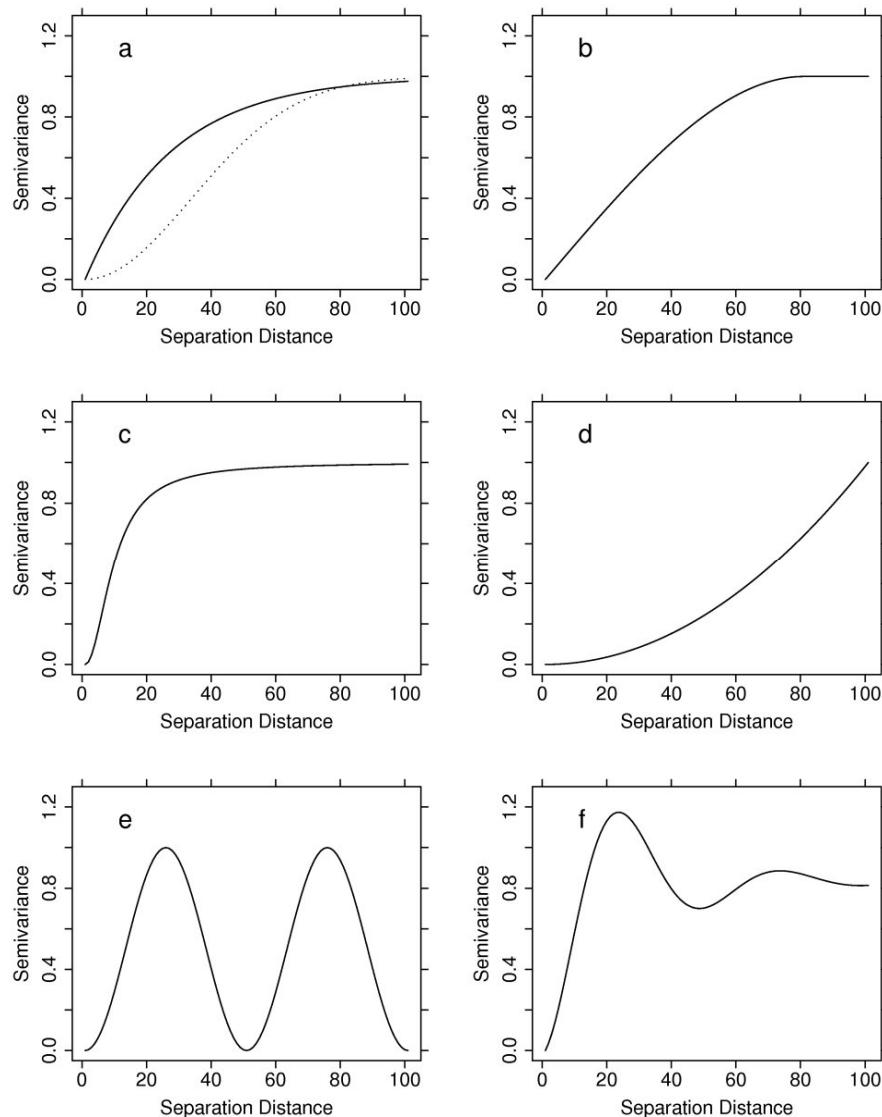


Figura 3.45: Modelli più comuni di variogramma. a = modello esponenziale (linea continua) e gaussiano (tratteggiato); b = modello sferico; c = modello quadratico; d = modello drift (deriva); e = modello “hole effect” puro; f = modello “hole effect” circoscritto

Questi modelli semplici ed applicabili in qualsiasi direzione sono distinguibili in due categorie a seconda che raggiungano un asintoto orizzontale, possedendo così un valore di soglia e range, oppure che aumentino indefinitamente all’aumentare della distanza di separazione; situazione che indica generalmente l’esistenza di un trend regionale (per la componente principale). I principali modelli ammissibili sono riassunti nell’elenco seguente:

- Il modello “*effetto pepita*”, non riportato in Figura 3.45 e rappresentato da una retta orizzontale parallela all’asse delle ascisse, è proprio di situazioni in cui la variabilità della variabile è totalmente casuale.

- Il modello *esponenziale* raggiunge la soglia in maniera asintotica e possiede un range definito come la distanza alla quale la semivarianza corrisponde al 95% della soglia.
- Il modello *gaussiano* è usato in presenza di fenomeni caratterizzati da elevata continuità.
- Il modello *sferico* mostra un comportamento lineare in prossimità dell'origine, fino ad appiattirsi per distanze elevate, raggiungendo così il valore soglia.
- Il modello *lineare* aumenta linearmente al crescere della distanza, senza mai raggiungere il valore di soglia.
- Nel modello *drift*, caso particolare di modello lineare, i variogrammi mostrano una curva parabolica, la cui forma è dovuta a dati con una variabilità locale e regionale, risultato di variabili continue che aumentano o diminuiscono per distanze fissate. Per analizzare la variabilità sarà in questo caso necessario descrivere matematicamente e quindi rimuovere il trend regionale.
- Il modello *ciclico* o *hole effect* presenta una curva caratterizzata da una certa periodicità dovuta ad una variabile le cui caratteristiche si ripetono nello spazio.

Procedure di stima della variabile in punti non campionati

La ricostruzione di una variabile spaziale mediante stima prevede il calcolo della stessa in punti non campionati a partire dai valori osservati in un limitato numero di posizioni; talvolta si cartografa solo una componente della variabilità spaziale per mettere in evidenza trend regionali (grande scala), oppure per individuare anomalie locali (piccola scala). Si filtra una componente, regionale o locale, soprattutto quando questa è causa di disturbo e maschera comportamenti delle variabili che, al contrario, si vogliono esaltare. Qualora costruendo la mappa della variabile si noti che il risultato dipende dalla dispersione spaziale della stessa, si ricorre ad una carta simulata che, al contrario di quella stimata, conserva la variabilità spaziale della realtà; si generano più carte simulate per ottenere diversi risultati, la cui distribuzione quantifica l'incertezza con cui sono note le variabili nell'area indagata.

L'interpolazione (contouring) usa, per la realizzazione delle mappe che rappresentano la distribuzione spaziale dei dati, le isolinee, definite come linee immaginarie congiungenti punti di ugual valore della variabile, riproducibili con accuratezza qualora siano disponibili osservazioni sufficienti ed abbastanza ravvicinate, oppure quando la variabile possa essere rappresentata da una superficie continua all'interno dell'area di studio e la superficie da creare possa essere stimata mediante un'equazione matematica.

Ogni pacchetto informatico di contouring ricostruisce la mappa ad isolinee applicando una relazione basata sulla geometria dei punti di controllo; le mappe così definite sono maggiormente realistiche nelle vicinanze di questi punti piuttosto che nelle aree dove non esistono campioni. Per la costruzione delle mappe ad isolinee vengono usate superfici descritte da un unico valore in ogni punto (variabile a valore singolo), continue all'interno dell'area investigata ed autocorrelate ad una distanza maggiore di quella fra i punti di controllo. Qualora la superficie sia molto autocorrelata, i dati vicini al punto da stimare hanno lo stesso valore; al contrario, qualora sia scarsamente autocorrelata, i punti di controllo hanno una scarsa relazione reciproca e con il punto da stimare.

Kriging e validazione incrociata

L'algoritmo di stima più largamente utilizzato è il kriging, che usa la stima pesata sulla distanza e la media mobile; i pesi ottimali sono ottenuti mediante il variogramma sperimentale. Problema centrale è la produzione di una mappa ad isovalori (contour map) e la costruzione di una griglia di valori stimati, affetti dunque da errori di stima. Nella stima di variabili regionalizzate, nessun algoritmo è in grado di fornirne il valore vero in una localizzazione non campionata; tuttavia l'accuratezza dipende dal numero di punti di osservazione, dalla qualità delle misure, dalla posizione dei punti all'interno dell'area esaminata, dalla distanza fra i punti di osservazione (attribuendo un peso maggiore ai valori osservati in vicinanza del punto da stimare) e dalla regolarità della variabile oggetto di studio, essendo la stima efficiente per variabili con una bassa dispersione. Il kriging è uno stimatore geostatistico esatto che restituisce, nei punti dove si ha l'informazione, il valore vero, e per ogni altro dato stimato la varianza di stima sulla base della quale si valuta l'incertezza connessa alla stima. Il kriging si differenzia dalle tecniche di interpolazione classiche poiché non assume che le variazioni fra i campioni siano indipendenti, e che i punti d'osservazione costituiscano un campione casuale. I vantaggi nell'applicazione del kriging sono legati all'analisi della struttura spaziale dei dati, al calcolo di soluzioni uniche in quanto il determinante della matrice dei coefficienti è strettamente positivo, garantendo la positività della varianza di stima, ed all'interpolazione esatta dei dati (varianza di stima nulla). Dal punto di vista pratico, il numero di osservazioni ottimali per la stima è ridotto ai punti che ricadono nell'area di influenza (range), ed è determinato dall'analisi del semivariogramma.

La validazione incrociata è una tecnica di confronto fra i valori stimati (escludendo un dato dal dataset e stimandolo dagli altri utilizzando il kriging) e quelli misurati, utilizzando esclusivamente le informazioni disponibili in prossimità dei punti di osservazione. Tale

procedura è ripetuta per tutti i valori rilevati nei punti di osservazione; le coppie di valori sono rappresentate su un grafico a dispersione, al fine d'individuare la presenza o meno di correlazioni. In questo modo è possibile analizzare le differenze fra i diversi modelli di stima applicati confrontando le distribuzioni dei relativi errori (residui) e selezionare quello che restituisce i migliori risultati.

3.3.2 Analisi geostatistica applicata al caso studio

L'analisi geostatistica è stata applicata da numerosi autori allo studio della variabilità spaziali dei parametri descrittivi di un ammasso roccioso (Long e Billaux, 1987; Barla e Scavia, 1987; Billaux e al., 1989;; Rafiee e Vinches, 2008e molti altri). Il metodo è diffusamente applicato, in particolare, per l'analisi dell'intensità di fratturazione delle rocce (Viruete e al., 2001); ma non sono pochi gli esempi di applicazione di tecniche geostatistiche alla valutazione di quasi tutti i parametri utilizzati per descrivere gli ammassi rocciosi (Yu e Mostyn, 1993)

Orientazione delle famiglie di discontinuità

Il parametro "orientazione delle discontinuità", essendo caratterizzato dalla presenza di due variabili (immersione ed inclinazione), presenta la complicazione di dover tener conto della variabilità accoppiata dei due parametri che insieme definiscono la giacitura. Analizzando in maniera congiunta le due componenti, si riconosce come queste varino insieme, cioè che il cambiamento di una influisca sul comportamento dell'altra. Un possibile metodo d'analisi che permette lo studio combinato dei due parametri è la dispersione angolare delle giaciture (ω), calcolata come la differenza angolare fra l'orientazione rappresentativa della famiglia e quella relativa ad ogni discontinuità (Apuani e al., 2009). Il vantaggio insito nell'utilizzo della dispersione angolare è rappresentato dal considerare la variabilità dei due parametri in maniera accoppiata. Il principale svantaggio nell'uso di tale metodologia di lavoro deriva però dalla formulazione stessa della dispersione angolare; in un unico valore infatti, vengono sommate e combinate tanto le variazioni angolari legate all'immersione quanto quelle legate all'inclinazione. Accade così, ad esempio, che considerando come rappresentativa della famiglia *KI* la giacitura 186/52, piani con orientazione 216/52 e 186/82 sarebbero considerati equivalenti, pur determinando condizioni assolutamente diverse ai fini dell'analisi del loro comportamento idraulico o meccanico. Accettare un simile livello di indeterminazione nella conoscenza della realtà, introdurrebbe errori e valutazioni errate nello studio proposto. I risultati sarebbero probabilmente più corretti da un punto di vista puramente concettuale, ma avrebbero poca

funzionalità pratica. Si è quindi deciso di eseguire un'analisi disaccoppiata dei due parametri, anche in considerazione delle caratteristiche del contesto tettonico e deformativo del caso in studio. Se è vero, infatti, che l'analisi simultanea dei due termini è da preferire in presenza di campi di sforzi e contesti geologici che abbiano prodotto trend continui di variabilità spaziale (pieghe), è altresì importante ricordare che nel caso in studio il comportamento tenso-deformativo dell'ammasso è essenzialmente fragile e non sono state riscontrate strutture plicative. Per questi motivi si è scelto di studiare, per ogni famiglia, la variazione spaziale del parametro orientazione delle discontinuità conducendo separatamente ed indipendentemente l'analisi relativa all'inclinazione (dip) ed all'immersione (dip direction) dei piani di discontinuità. Terminata l'analisi geostatistica i due valori sono stati ricombinati ottenendo una griglia di giaciture interpolate nell'area di cava. La procedura introduce un'assunzione di indipendenza fra i due parametri certamente opinabile ma, per quanto sopra discusso, sembra essere la soluzione migliore per il caso in esame.

L'analisi geostatistica applicata a dati circolari, ha richiesto una rotazione preliminare dei dati tale da portare i baricentri delle distribuzioni il più possibile lontani dai punti di non singolarità (0° e 360° , ad esempio, rappresentano orientazioni coincidenti). Osservando sul reticolo stereografico le distribuzioni delle giaciture suddivise in famiglie, infatti, si nota come la presenza di un set avente immersione prossima al Sud (*K1*) e di altre due con valori diametralmente opposti rispetto al centro del reticolo (*K2* e *K3*), causano problemi di stabilità numerica durante l'elaborazione. Per ovviare al problema si applica una rotazione dei dati attorno agli assi orizzontale e verticale in modo tale da ottenere valori continui all'interno dell'intervallo di dispersione della famiglia (Figura 3.46-3.49). È fondamentale annotare il modulo, il verso e l'ordine delle rotazioni, poiché al termine dell'interpolazione geostatistica si dovranno eseguire le medesime trasformazioni nell'ordine inverso, in modo tale da riportare i dati interpolati nella posizione reale.

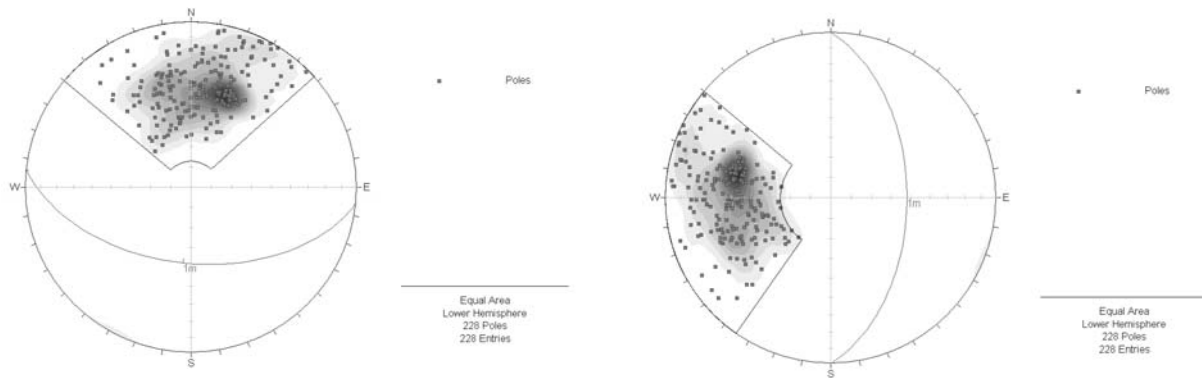


Figura 3.46: Famiglia K1: poli delle discontinuità originali (sinistra) e distribuzione degli stessi in seguito alle rotazioni (destra)

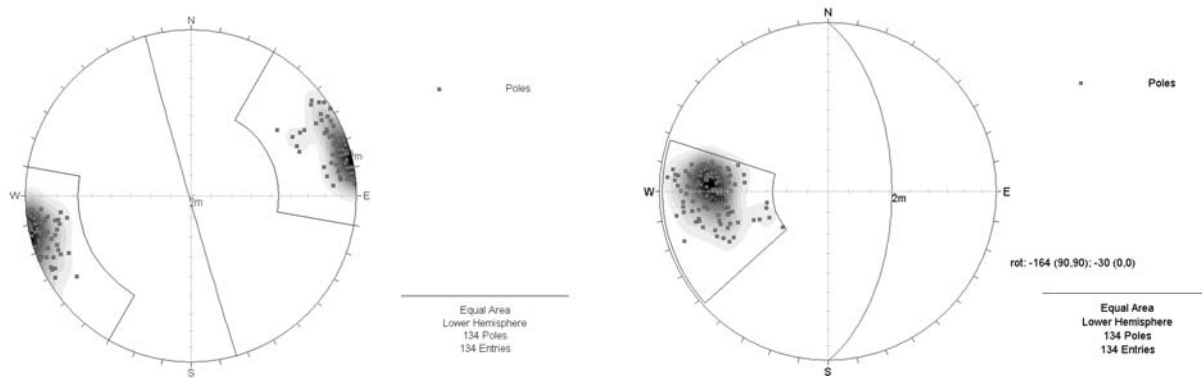


Figura 3.47: Famiglia K2: poli delle discontinuità originali (sinistra) e distribuzione degli stessi in seguito alle rotazioni (destra)

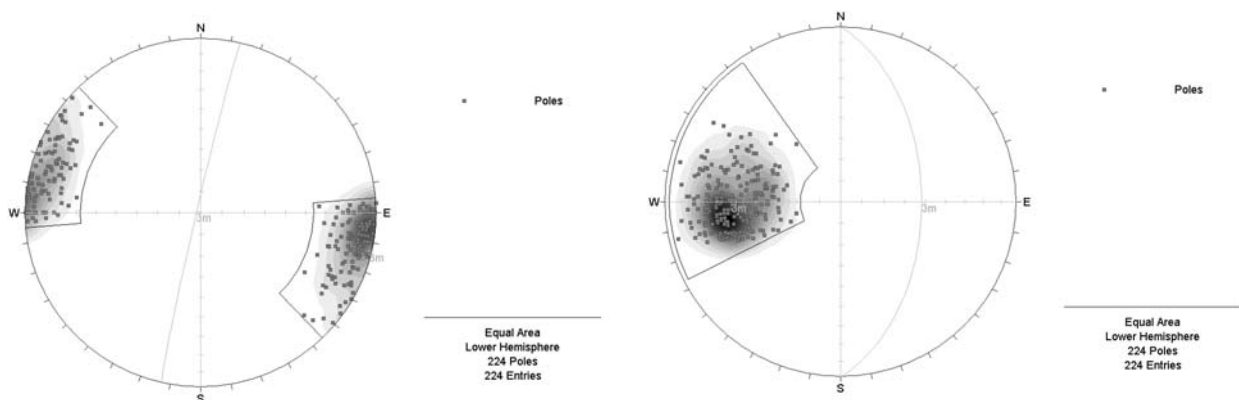


Figura 3.48: Famiglia K3: poli delle discontinuità originali (sinistra) e distribuzione degli stessi in seguito alle rotazioni (destra)

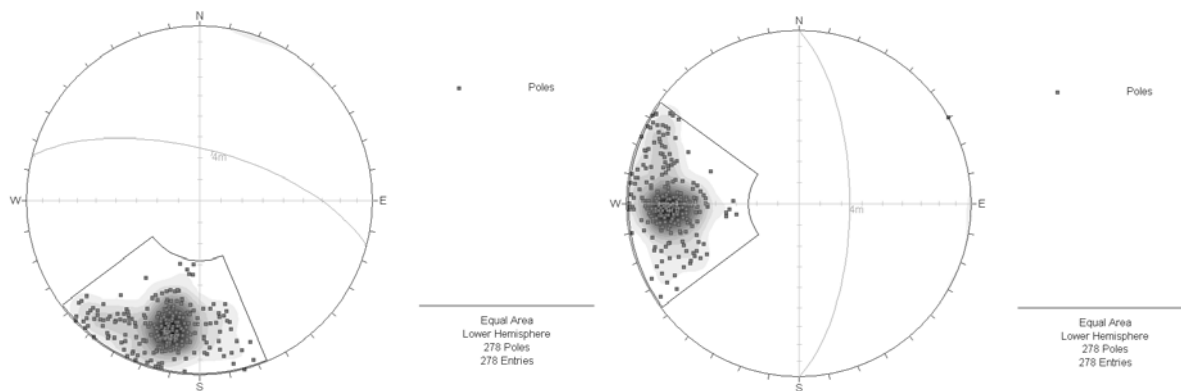


Figura 3.49: Famiglia K4: poli delle discontinuità originali (sinistra) e distribuzione degli stessi in seguito alle rotazioni (destra)

Terminata la fase di preparazione dei dati si procede all'analisi geostatistica delle variabili inclinazione ed immersione con la costruzione del variogramma sperimentale. Accanto ad ogni punto del variogramma è indicato il numero di misure utilizzato per il calcolo della varianza, in funzione della massima distanza di correlazione scelta e dell'orientazione preferenziale dell'ellisse di ricerca. Dopo aver costruito il variogramma sperimentale, si è individuato il modello di variogramma teorico che meglio lo approssima definendo così i valori ottimali di range, scale, sill e nugget effect. Per stimare la variabile in punti non campionati dell'area di cava si sono utilizzate metodologie di interpolazione basate sull'algoritmo del kriging. L'interpolazione è stata eseguita su una griglia rettangolare formata da 121 x 57 celle quadrate di lato 2.5 metri, tale da coprire interamente la superficie occupata dalla planimetria. Sulla base della funzione matematica caratterizzante il modello di variogramma, ad ogni cella è assegnato un valore stimato della variabile; la costruzione della "contour map" permette di visualizzare in maniera continua, e non per singoli punti, l'andamento delle variabili. Viene inoltre costruita la mappa della varianza (deviazione standard) indicante l'incertezza connessa con la stima. Nelle Figure 3.50-3.57 sono riassunti e presentati gli elementi salienti della procedura di interpolazione effettuata sull'immersione e sull'inclinazione di ogni famiglia. Nelle figure sono rappresentati il variogramma, la contour map interpolata e la mappa della varianza del kriging; per chiarezza è stata riportata anche la mappa classificata dei dati originari, sovrapposti alla planimetria delle gallerie. Si ricorda che la non perfetta coincidenza grafica fra punti di campionamento e traccia delle gallerie è da imputare alla proiezione dei dati rilevati sul piano di riferimento, scelto a quota 1512 m s.l.m., nel tentativo di ovviare alle incongruenze causate da un'analisi geostatistica bidimensionale applicata a dati tridimensionali.

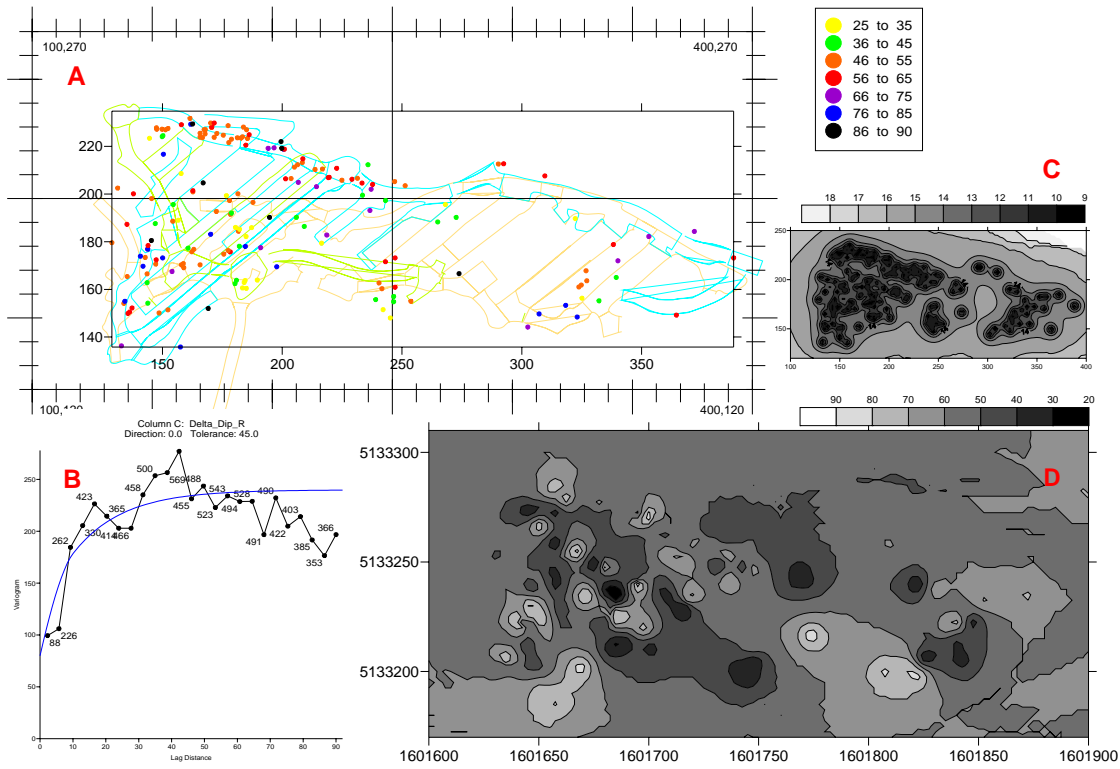


Figura 3.50: Elaborazioni geostatistiche dell'inclinazione (in gradi) della famiglia K1. A) Planimetria dell'area di cava e ubicazione delle misure B) Variogramma C) Mappa della varianza D) Contour map

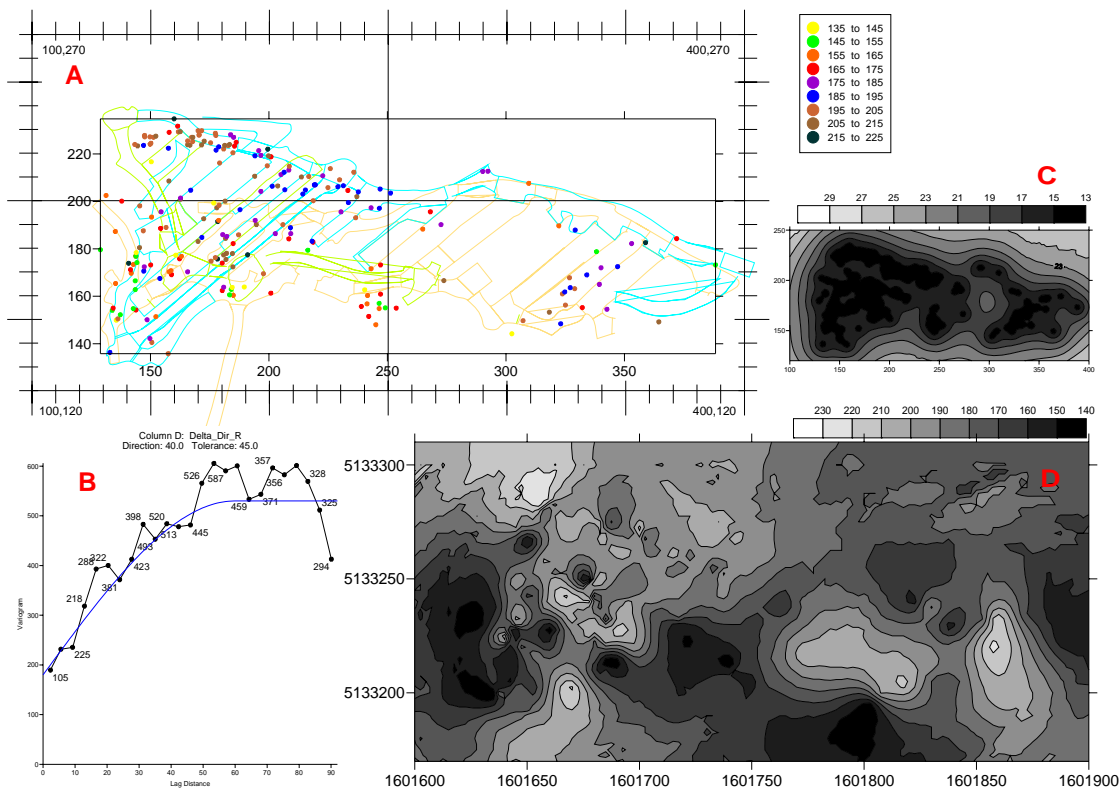


Figura 3.51: Elaborazioni geostatistiche dell'immersione (in gradi) della famiglia K1. A) Planimetria dell'area di cava e ubicazione delle misure B) Variogramma C) Mappa della varianza D) Contour map

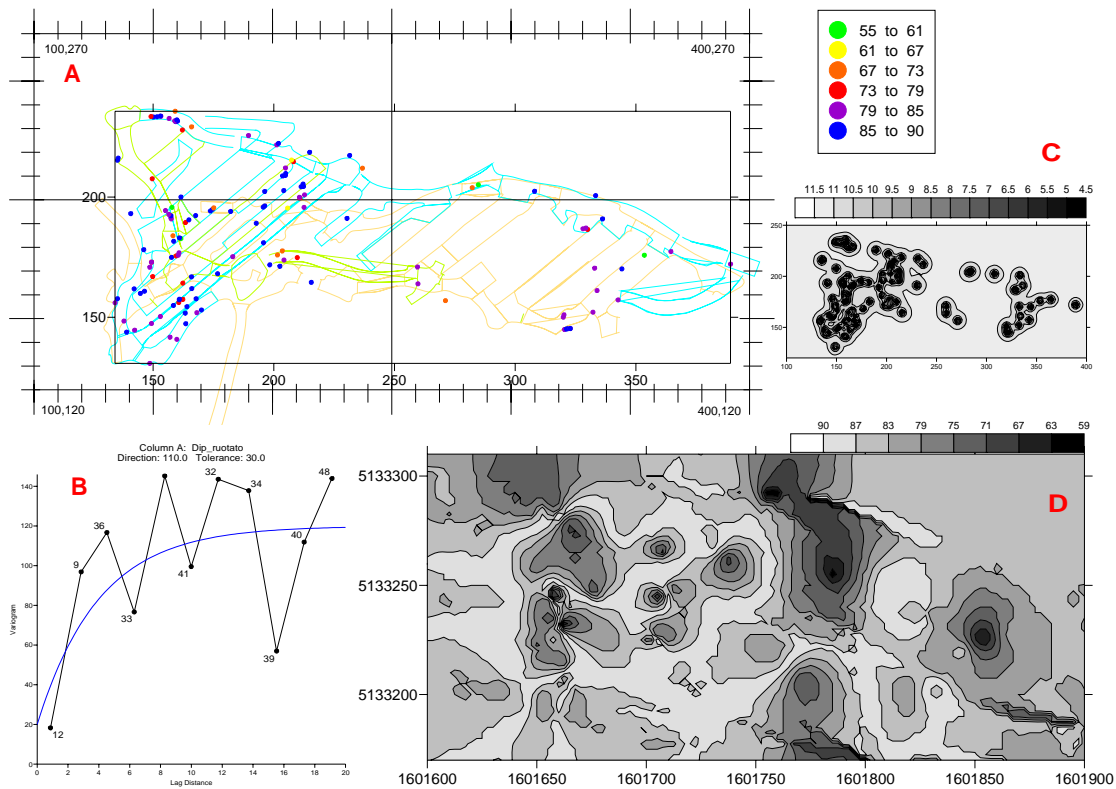


Figura 3.52: Elaborazioni geostatistiche dell'inclinazione (in gradi) della famiglia K2. A) Planimetria dell'area di cava e ubicazione delle misure B) Variogramma C) Mappa della varianza D) Contour map

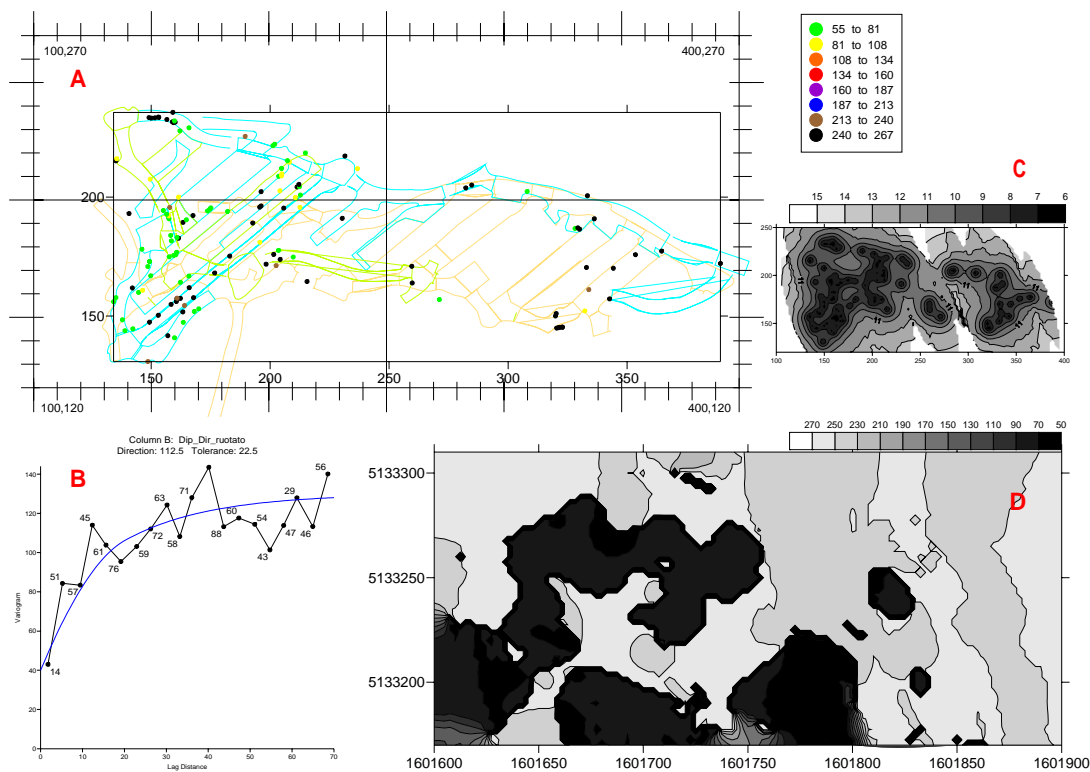


Figura 3.53: Elaborazioni geostatistiche dell'immersione (in gradi) della famiglia K2. A) Planimetria dell'area di cava e ubicazione delle misure B) Variogramma C) Mappa della varianza D) Contour map

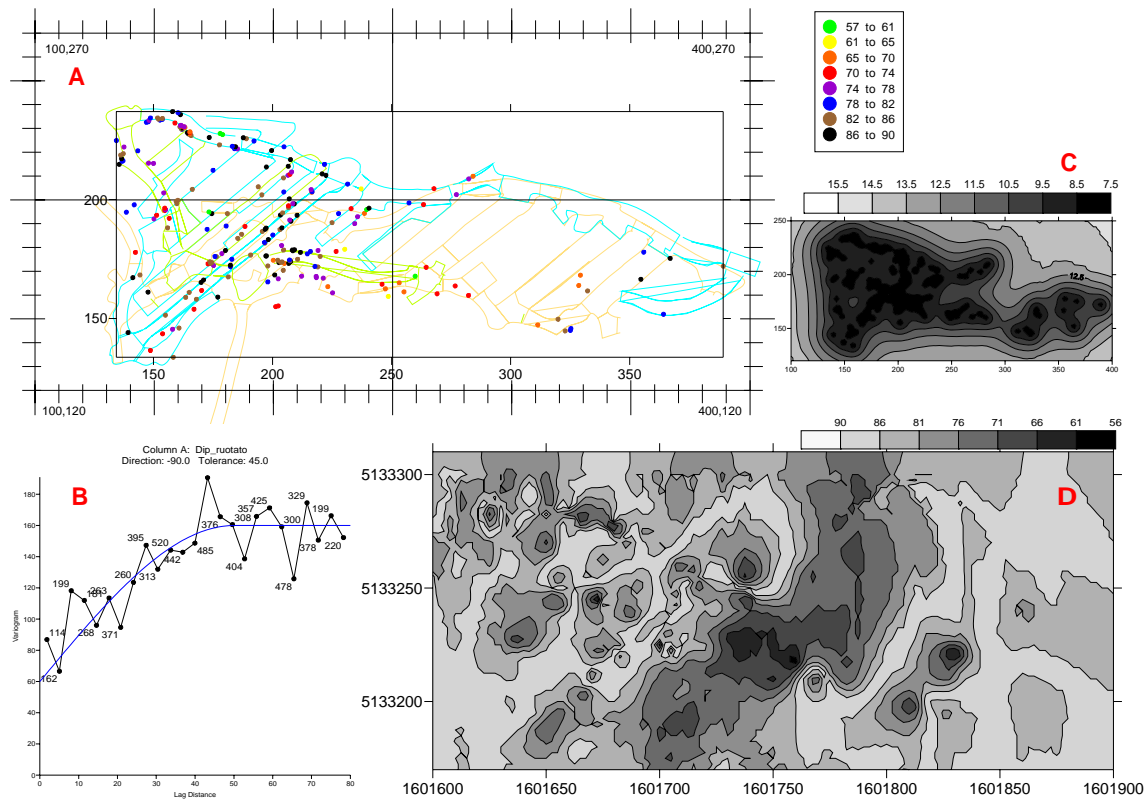


Figura 3.54: Elaborazioni geostatistiche dell'inclinazione (in gradi) della famiglia K3. A) Planimetria dell'area di cava e ubicazione delle misure B) Variogramma C) Mappa della varianza D) Contour map

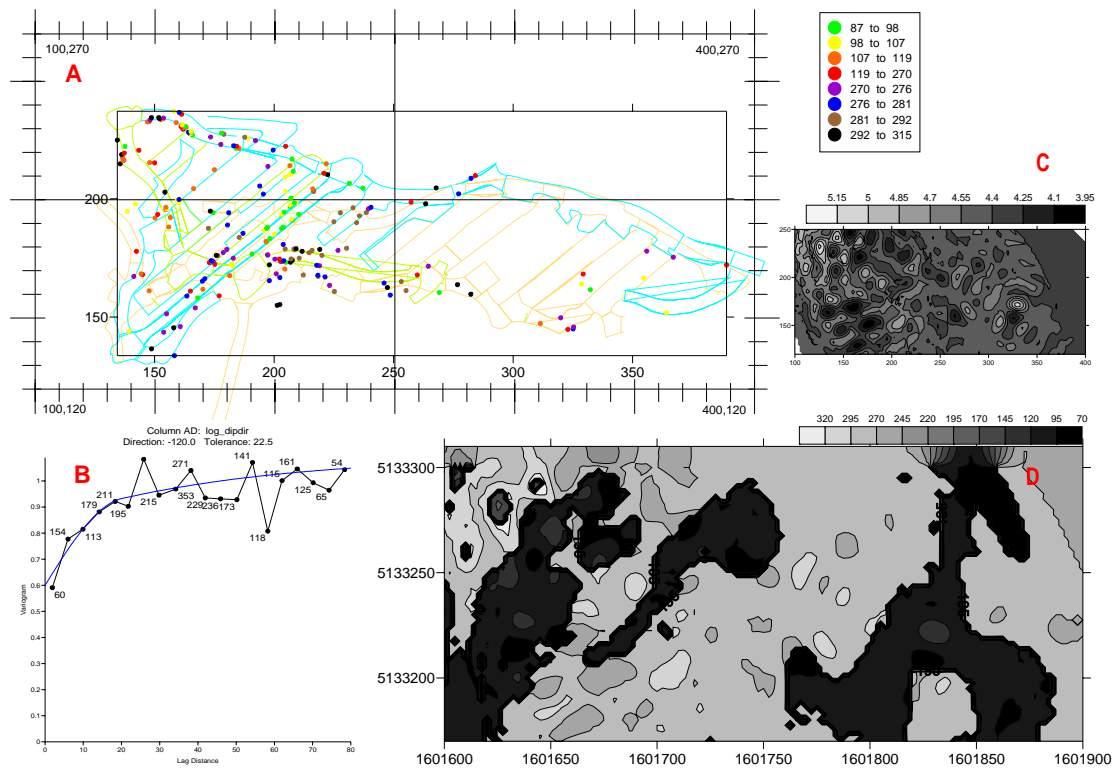


Figura 3.55: Elaborazioni geostatistiche dell'immersione (in gradi) della famiglia K3. A) Planimetria dell'area di cava e ubicazione delle misure B) Variogramma C) Mappa della varianza D) Contour map

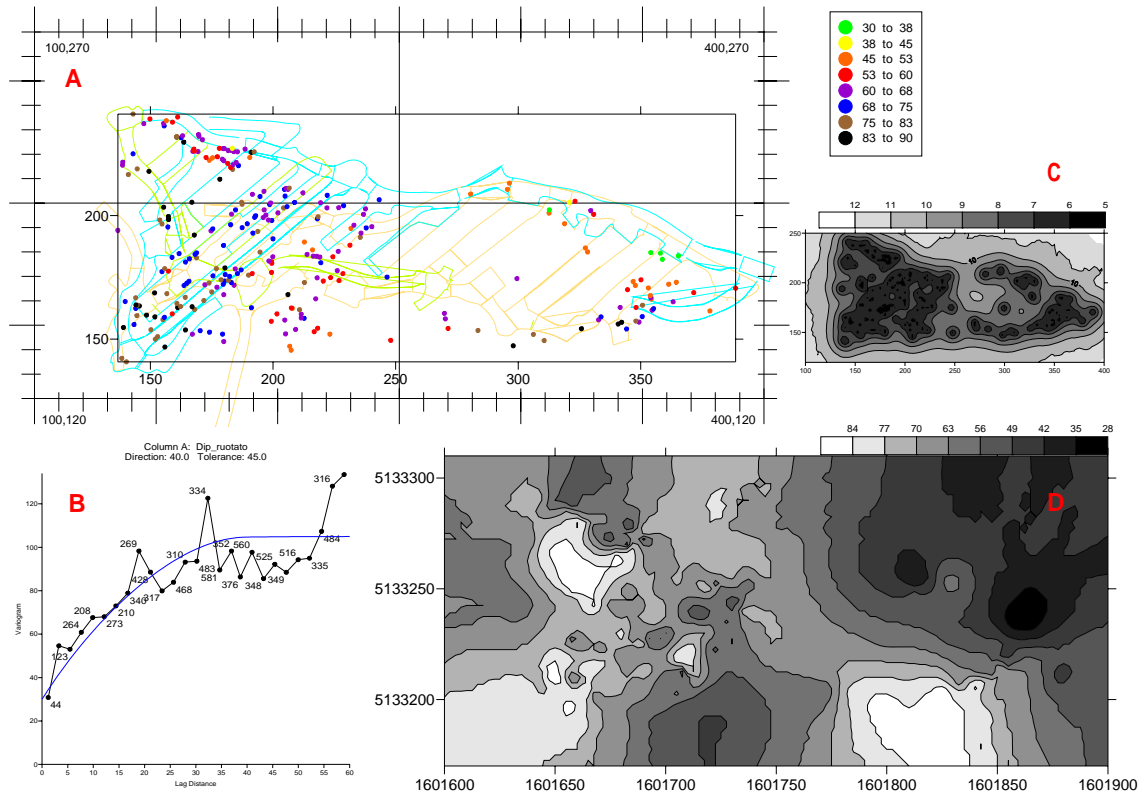


Figura 3.56: Elaborazioni geostatistiche dell'inclinazione (in gradi) della famiglia K4. A) Planimetria dell'area di cava e ubicazione delle misure B) Variogramma C) Mappa della varianza D) Contour map

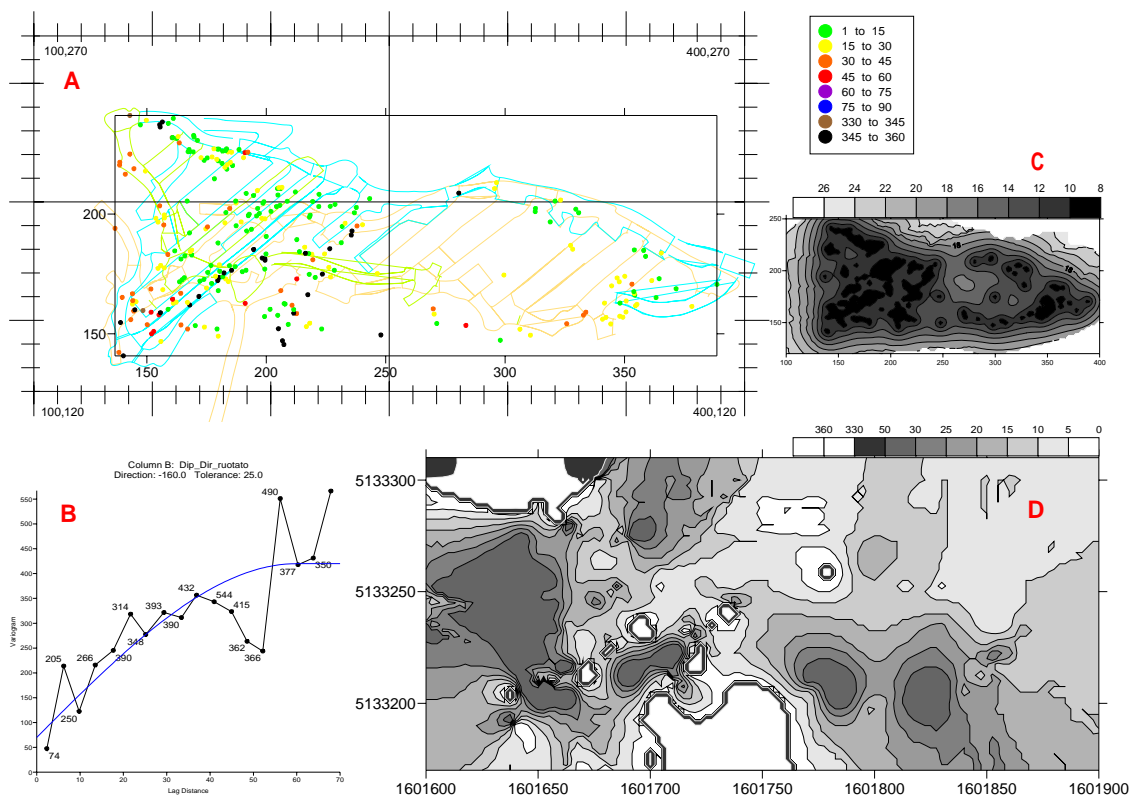


Figura 3.57: Elaborazioni geostatistiche dell'immersione (in gradi) della famiglia K4. A) Planimetria dell'area di cava e ubicazione delle misure B) Variogramma C) Mappa della varianza D) Contour map

La verifica della correttezza e dell'affidabilità delle stime effettuate è stata fatta confrontando i valori ottenuti dal kriging con quelli rilevati in sito in porzioni spaziali definite ma non georeferenziate singolarmente (vedi Capitolo 2.2). Questi dati, non avendo una posizione spaziale definita singolarmente, non sono stati utilizzati nell'analisi geostatistica ma, possedendo una precisa collocazione areale possono essere utilizzati nella fase di validazione dei risultati. La verifica è stata effettuata selezionando dalla griglia dei risultati del kriging i valori ricadenti nelle stesse aree ove erano stati misurati i dati utilizzabili per la validazione e confrontando i dati reali e quelli simulati proiettandoli su un su reticolo stereografico equiareale. La Figura 3.58 mostra l'ubicazione delle 12 aree di controllo con la relativa numerazione; le Figure 3.59-3.60 mostrano il confronto fra le proiezioni stereografiche delle misure effettivamente rilevate in sito e quelle dei valori stimati mediante l'analisi geostatistica, selezionati nella medesima porzione dell'ammasso.

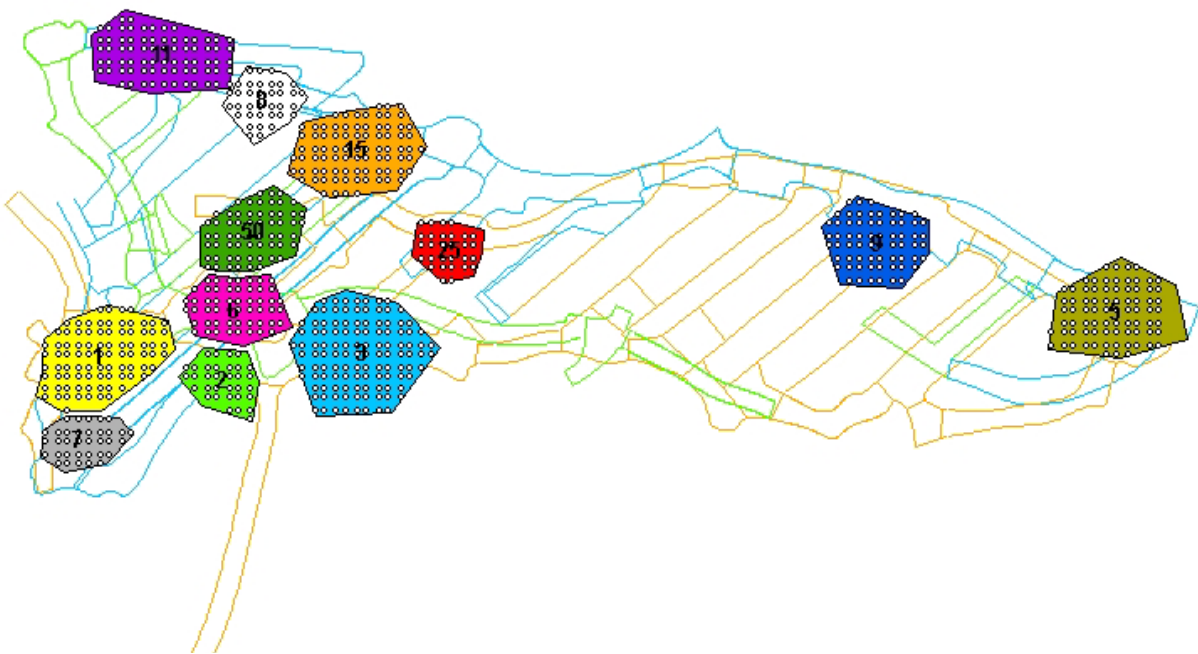


Figura 3.58: Ubicazione e numerazione delle aree di verifica fra dati rilevati e dati stimati. I puntini di colore bianco all'interno di ogni area rappresentano i valori stimati. Il modello è orientato a Nord

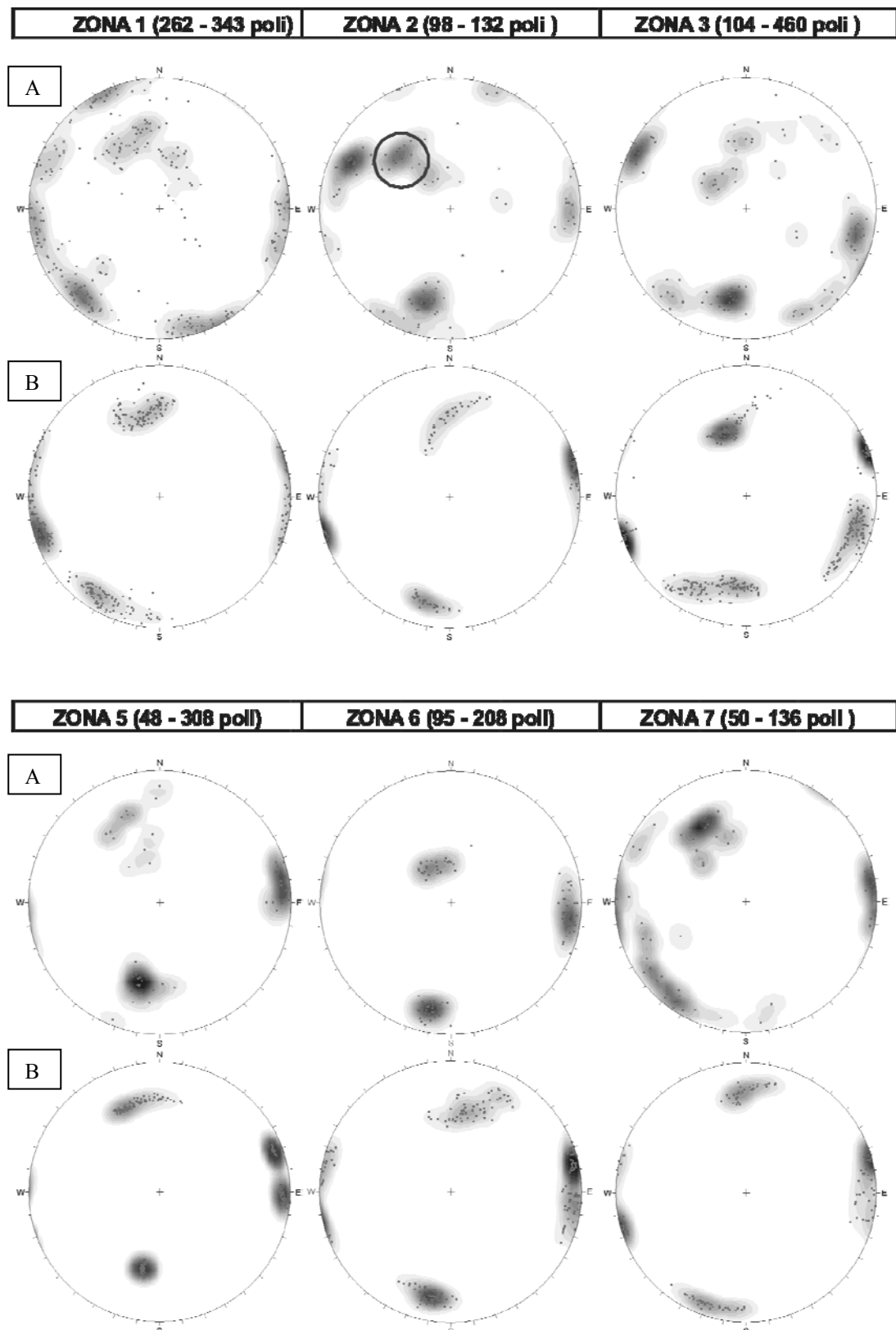


Figura 3.59: Reticoli stereografici delle orientazioni rilevate (A di ciascuna zona) e reticoli stereografici ottenuti in seguito alle analisi geostatistiche (B di ciascuna zona)

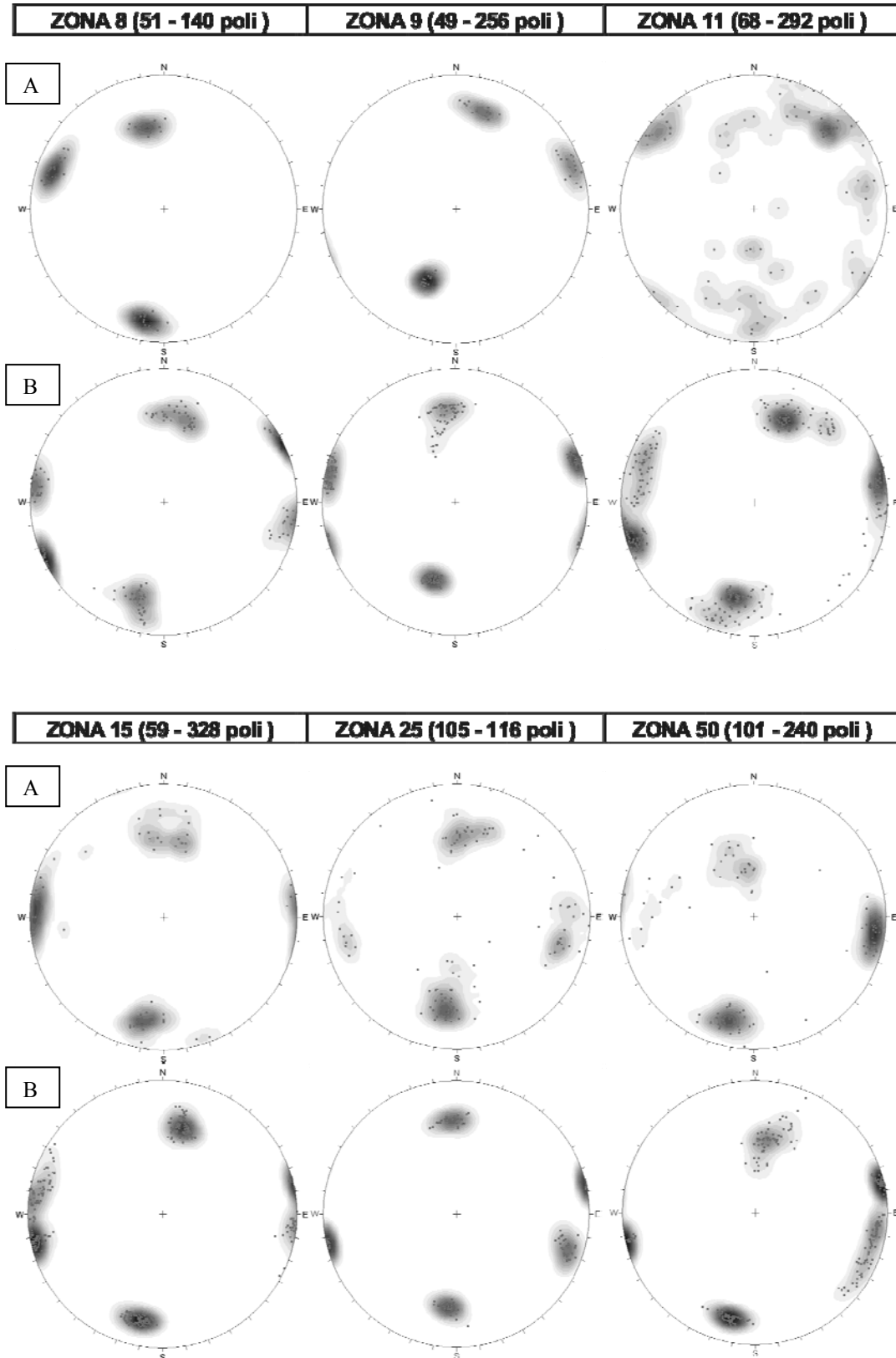


Figura 3.60: Reticoli stereografici delle orientazioni rilevate (A di ciascuna zona) e reticoli stereografici ottenuti in seguito alle analisi geostatistiche (B di ciascuna zona)

Accanto alla denominazione di ogni zona considerata è indicato il numero di poli delle discontinuità proiettato nel relativo reticolo; il primo valore si riferisce ai dati rilevati in situ, mentre il secondo a quelli stimati. Il numero di questi ultimi dipende dalla superficie occupata dal poligono che rappresenta l'area in cui sono stati presi i dati. Si nota nella maggior parte dei casi una buona somiglianza fra i dati reali e i dati simulati (zone 1, 3, 5, 6, 15, 25, 50) confermando la bontà dell'interpolazione effettuata, anche se i dati misurati mostrano in genere un grado di dispersione maggiore di quelli simulati, soprattutto nei casi in cui l'area di acquisizione era intersecata da faglie di notevole importanza che complicano il pattern di fratturazione dell'ammasso (area 1, 2 e 3). I casi dove la procedura di interpolazione ha dato i risultati peggiori (zone 2, 8, 9, 11) si giustificano a causa di problemi di carattere operativo e di natura geologica; le aree 8 e 9 infatti si riferiscono a due rilievi geomeccanici caratterizzati da una eccessiva concentrazione dei dati strutturali, probabilmente a causa del condizionamento operato dall'operatore nell'acquisizione dei dati che appaiono poco coerenti con la distribuzione media osservata dagli RGM. L'RGM 11 è caratterizzato da un'anomala dispersione dei valori di giacitura connessa con l'elevato grado di disturbo tettonico dell'ammasso ubicato in prossimità del contatto tra il quarzo e l'incassante. L'area 2 invece, situata all'imbocco della rampa che porta al livello intermedio, comprende dati rilevati su più livelli ed è attraversata da lineamenti tettonici persistenti che alterano il reticolo di fratturazione degli ammassi.

La vicinanza al contatto fra quarzo ed incassante contribuisce a complicare ulteriormente la distribuzione caratteristica delle zone più interne dell'ammasso. La dispersione dei poli delle discontinuità nelle porzioni marginali aumenta sensibilmente fino a raggiungere porzioni del reticolo stereografico che non ricadono all'interno degli intervalli adottati per la definizione delle famiglie di discontinuità, come evidenziato dal cerchio blu (Figura 3.59).

La zona 11, ad esempio, presenta una tale dispersione delle misure da risultare inadeguata al confronto con i dati simulati; le cause sono da ricercare nella vicinanza del contatto con l'incassante e nella misurazione di gran parte dei valori sulla formazione degli "Gneiss e micascisti del Tonale". La distribuzione della fratturazione su quest'ultima formazione appare molto più caotica rispetto al quarzo.

Spaziatura delle famiglie di discontinuità a grande scala

Dopo aver verificato l'ipotesi di normalità dei dati attraverso le analisi statistiche, è stato effettuato lo studio della variabilità spaziale del parametro spaziatura delle discontinuità attraverso tecniche geostatistiche. La procedura seguita rispecchia quella utilizzata nel caso

precedente inerente l'orientazione delle discontinuità ma è stata effettuata sui valori derivanti dalla trasformazione logaritmica della spaziatura a grande scala, normalmente distribuiti, e ha quindi richiesto, al termine dello studio, l'applicazione della funzione inversa per riportare i valori alla scala decimale. La procedura operativa prevede la ricerca del variogramma sperimentale anisotropo e del relativo modello che meglio approssima la linea spezzata; la funzione matematica individuata permette la rappresentazione, in ogni punto dello spazio, della variabilità del parametro. Come nel caso precedente la griglia utilizzata per il kriging è rettangolare a celle quadrate con lato di 2.5 metri, ed è formata da 121 celle nella direzione est-ovest e 57 in quella nord-sud. L'interpolazione geostatistica termina con la costruzione della contour map relativa al parametro regionalizzato e della mappa della varianza associata alla stima. Sono stati eseguiti numerosi tentativi per ricercare i modelli di variogramma più adatti, così come si sono considerate tanto le coordinate originali delle misure quanto quelle riportate sul piano di riferimento. Pur essendo sensibili le differenze fra le due diverse prove (come dimostrato nelle Figure 3.61 e 3.62 riguardanti l'analisi totale dei dati), si è deciso di usare per le analisi della variabile le coordinate di latitudine e longitudine trasformate, per mantenere la coerenza con le modalità impiegate per le giaciture. In Figura 3.61 sono riassunti i passaggi salienti e i risultati dell'analisi effettuata.

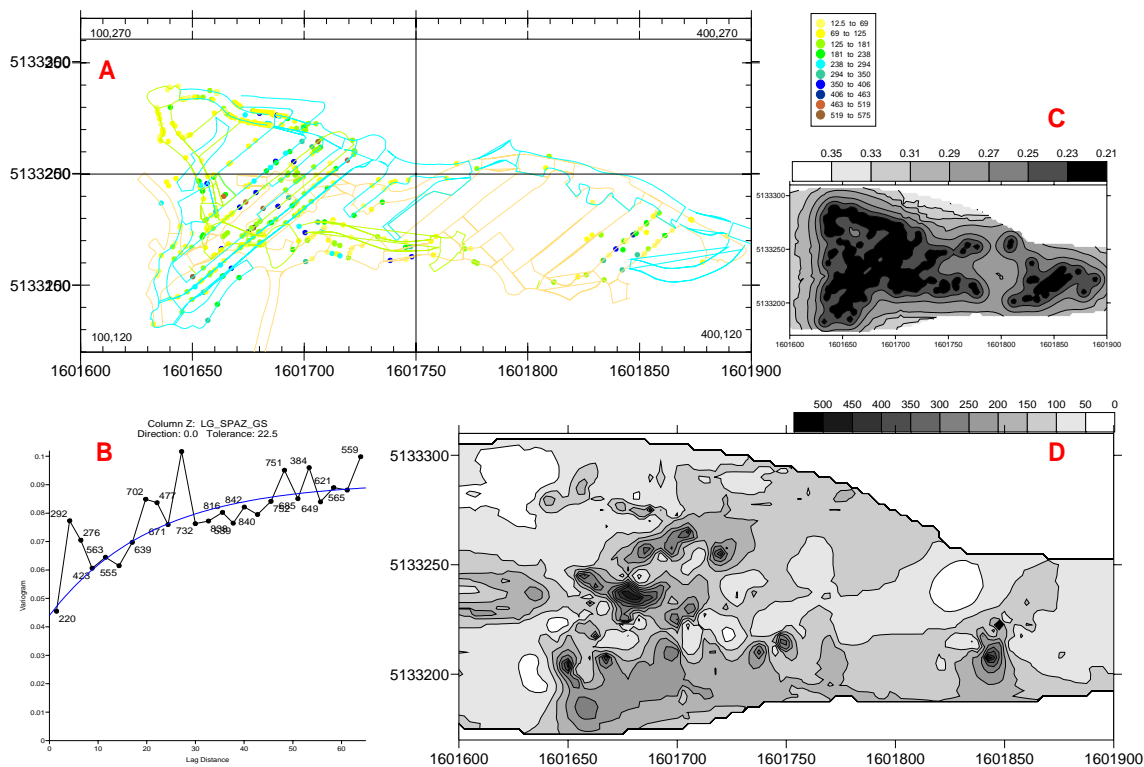


Figura 3.61: Elaborazioni geostatistiche complessive riguardanti la spaziatura a grande scala (cm) con coordinate originali. A) Planimetria dell'area di cava e ubicazione delle misure; B) Variogramma C) Mappa della varianza D) Contour map. I modelli sono orientati a Nord.

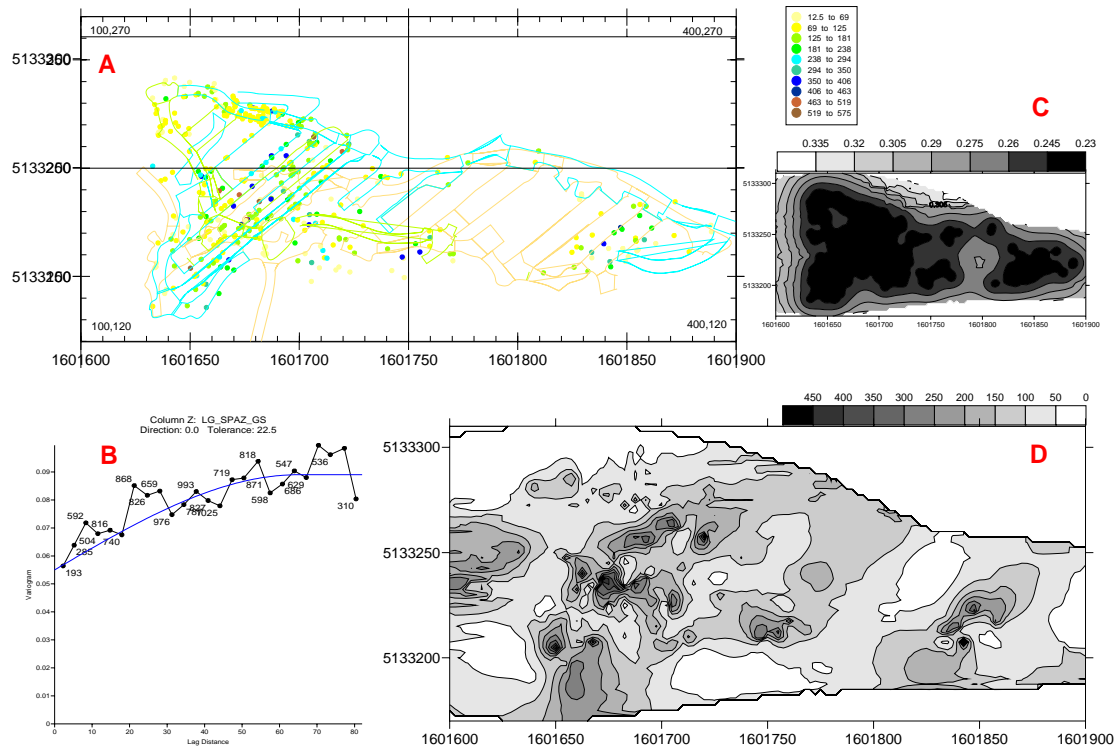


Figura 3.62: Elaborazioni geostatistiche complessive riguardanti la spaziatura a grande scala (cm) con coordinate proiettate sul piano di riferimento. A) Planimetria dell'area di cava e ubicazione delle misure; B) Variogramma C) Mappa della varianza D) Contour map

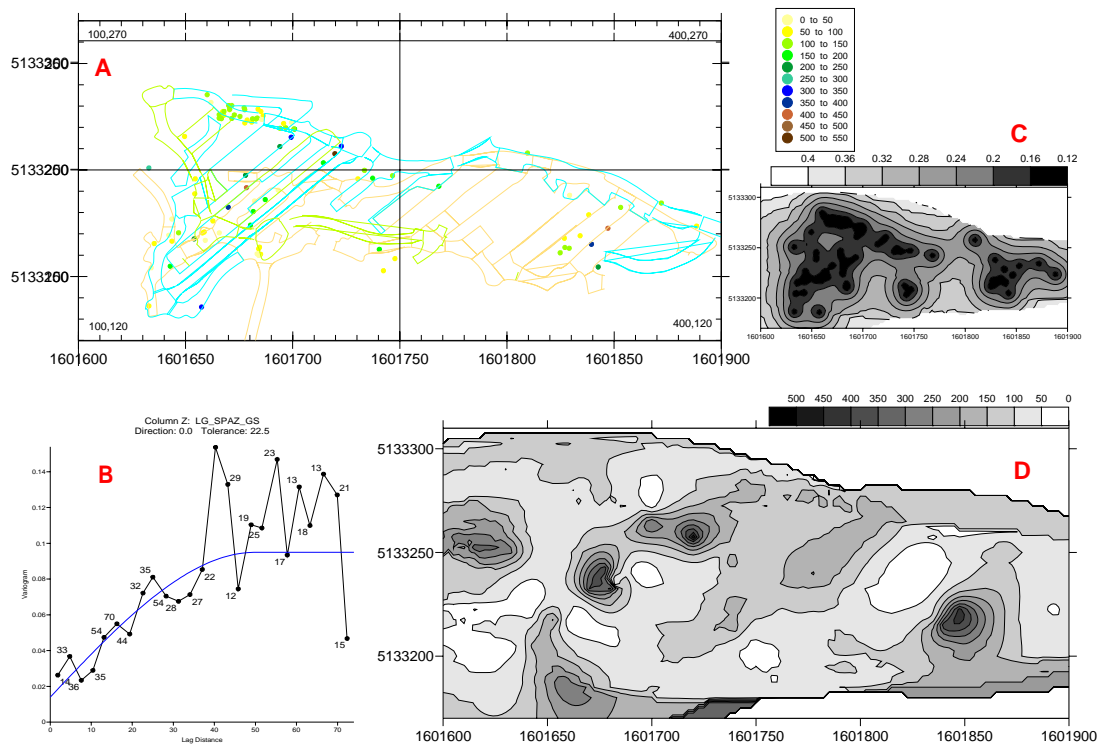


Figura 3.63: Elaborazioni geostatistiche riguardanti la spaziatura a grande scala (cm) con coordinate proiettate sul piano di riferimento (Famiglia KI). A) Planimetria dell'area di cava e ubicazione delle misure; B) Variogramma C) Mappa della varianza D) Contour map

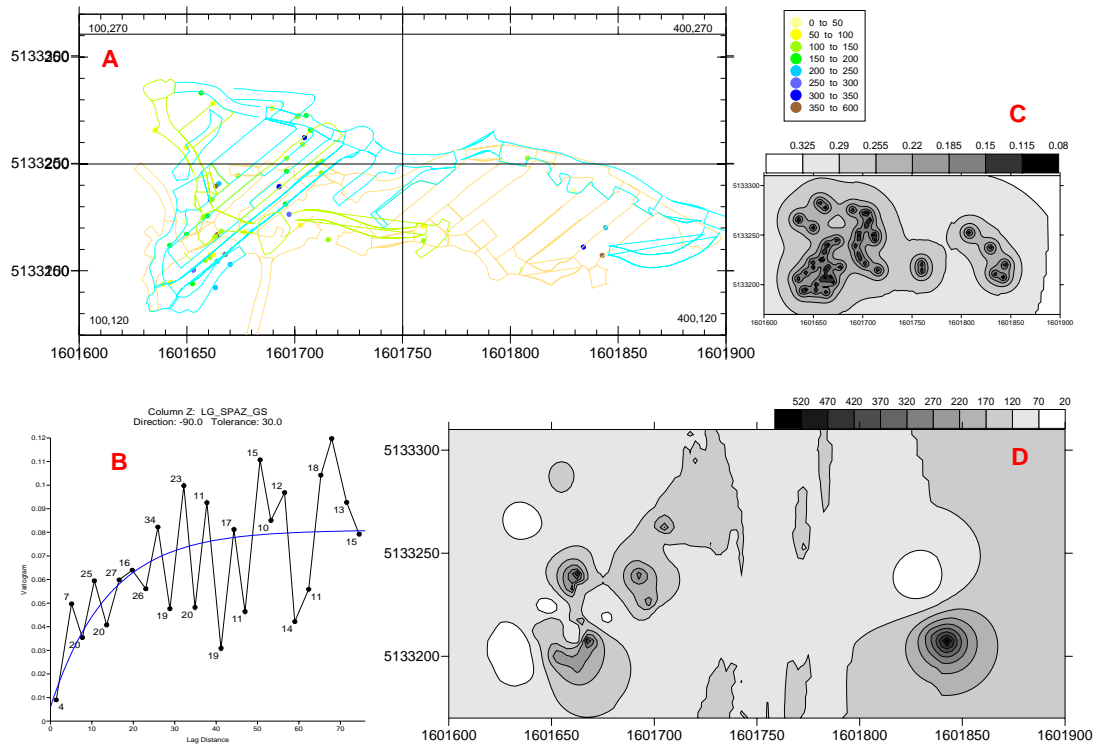


Figura 3.64: Elaborazioni geostatistiche riguardanti la spaziatura a grande scala (cm) con coordinate proiettate sul piano di riferimento (Famiglia K2). A) Planimetria dell'area di cava e ubicazione delle misure; B) Variogramma C) Mappa della varianza D) Contour map

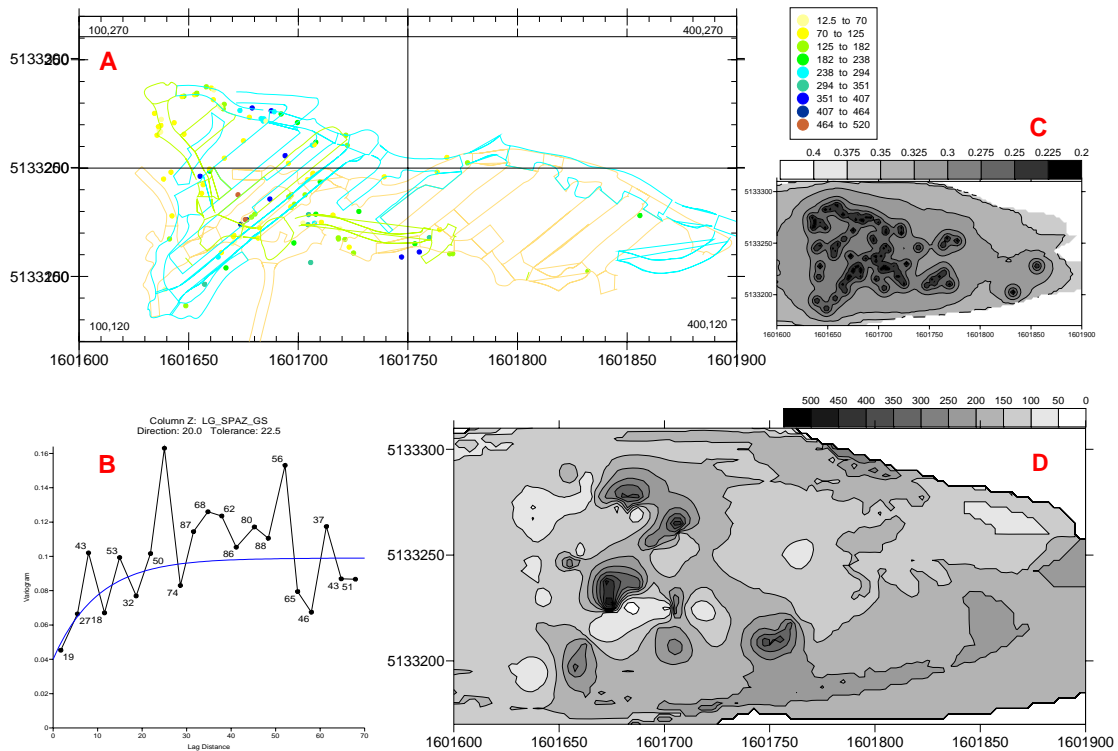


Figura 3.65: Elaborazioni geostatistiche riguardanti la spaziatura a grande scala (cm) con coordinate proiettate sul piano di riferimento (Famiglia K3). A) Planimetria dell'area di cava e ubicazione delle misure; B) Variogramma C) Mappa della varianza D) Contour map

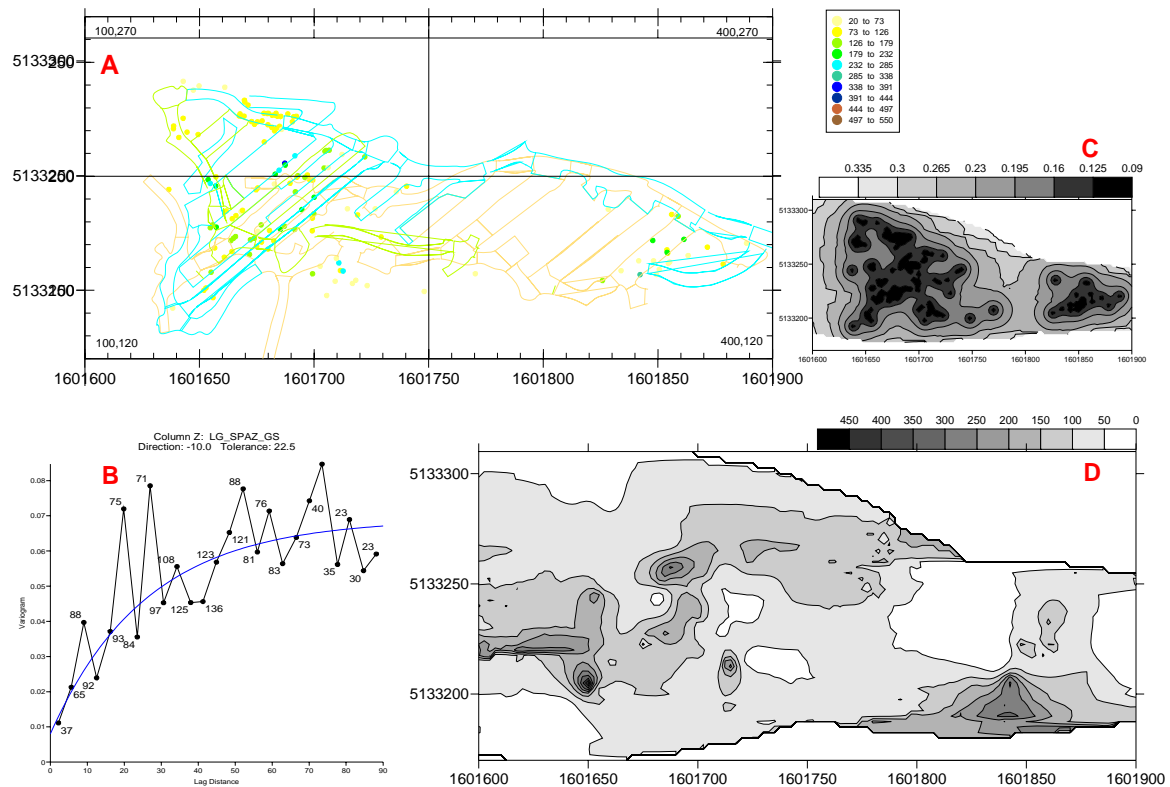


Figura 3.66: Elaborazioni geostatistiche riguardanti la spaziatura a grande scala (cm) con coordinate proiettate sul piano di riferimento (Famiglia K4). A) Planimetria dell'area di cava e ubicazione delle misure; B) Variogramma C) Mappa della varianza D) Contour map

Spaziatura e apertura delle famiglie di discontinuità a piccola scala

Le analisi geostatistiche e le procedure per l'elaborazione delle mappe riguardanti i parametri spaziatura delle famiglie di discontinuità a piccola scala (Figure 3.67-3.71) ed apertura dei sistemi di fratture (riportata nel paragrafo successivo alle Figure 3.72-3.76), rispecchiano fedelmente quanto già esposto per i parametri orientazione e spaziatura a grande scala dei giunti. L'unica differenza riguarda la presentazione dei risultati inerenti l'apertura delle discontinuità; alla luce delle prove effettuate, si preferisce considerare le coordinate originali delle misure, piuttosto che quelle riportate sul piano di riferimento, in quanto mostrano variazioni spaziali più omogenee e regolari.

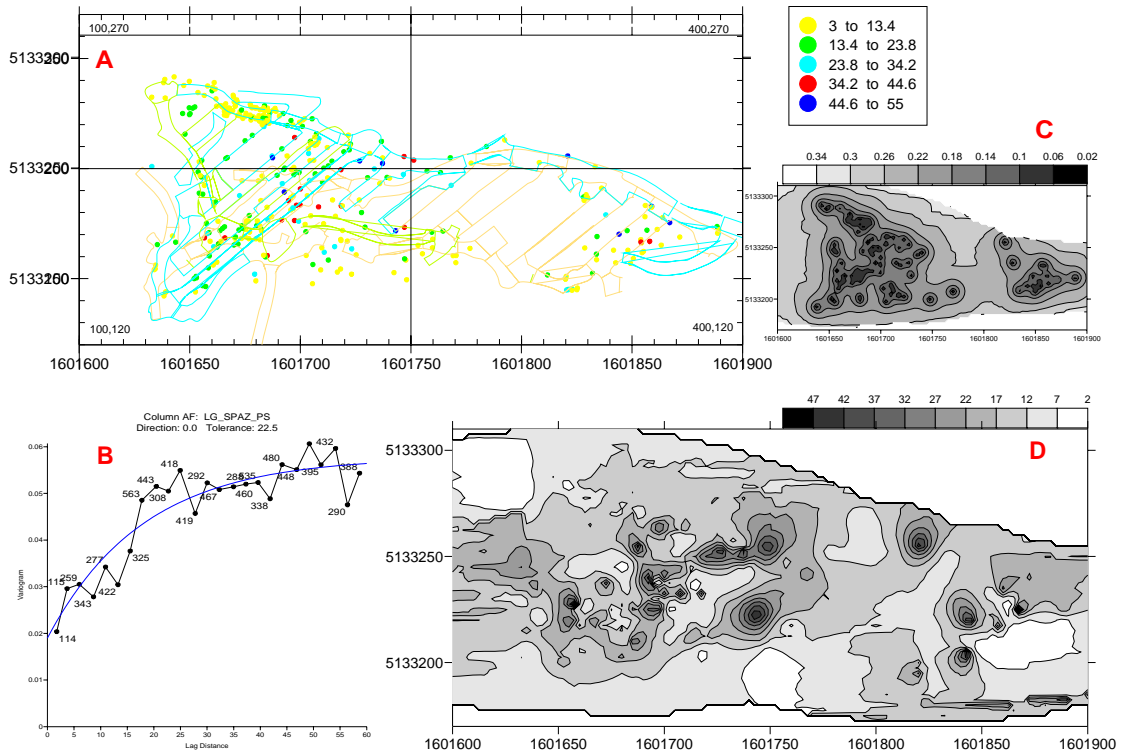


Figura 3.67: Elaborazioni geostatistiche complessive riguardanti la spaziatura a piccola scala (cm) con coordinate proiettate sul piano di riferimento. A) Planimetria dell'area di cava e ubicazione delle misure ; B) Variogramma C) Mappa della varianza D) Contour map

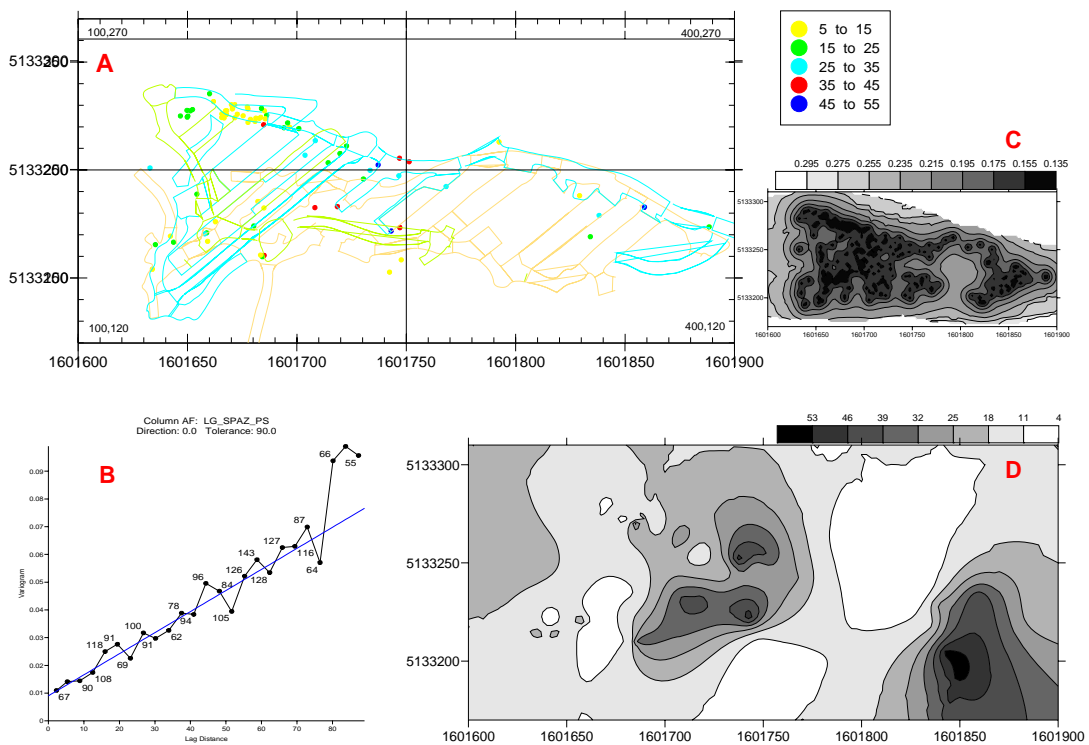


Figura 3.68: Elaborazioni geostatistiche riguardanti la spaziatura a piccola scala (cm) con coordinate proiettate sul piano di riferimento (Famiglia KI). A) Planimetria dell'area di cava e ubicazione delle misure; B) Variogramma C) Mappa della varianza D) Contour map

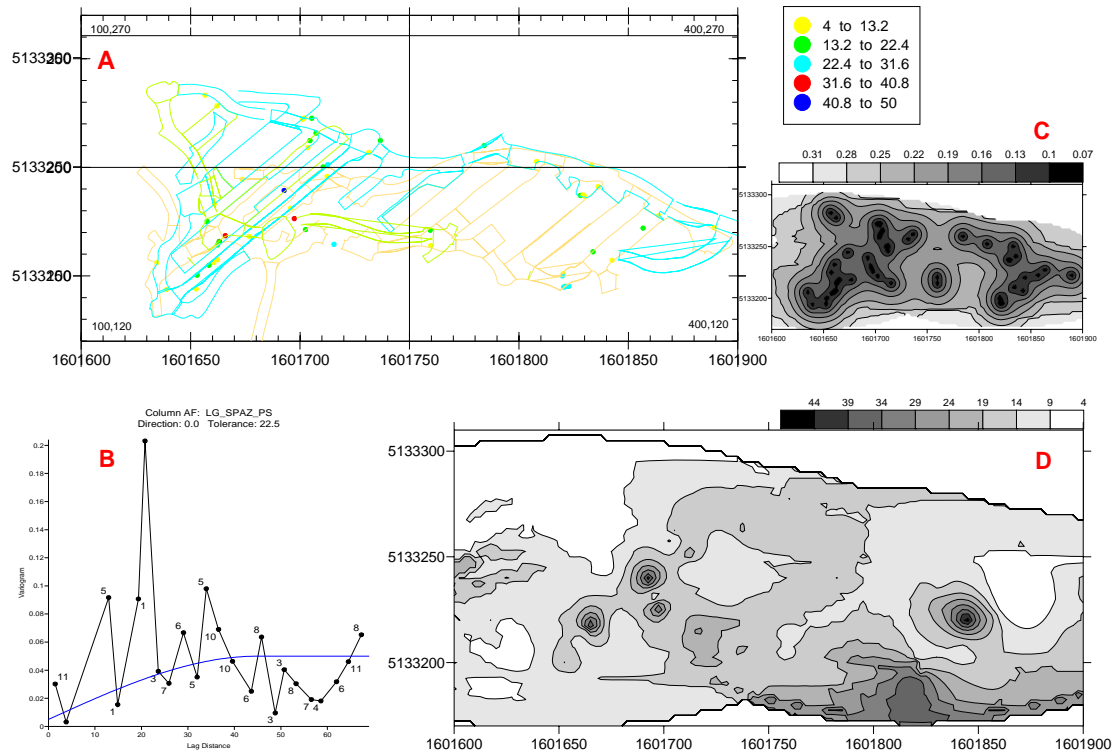


Figura 3.69: Elaborazioni geostatistiche riguardanti la spazatura a piccola scala (cm) con coordinate proiettate sul piano di riferimento (*Famiglia K2*). A) Planimetria dell'area di cava e ubicazione delle misure; B) Variogramma C) Mappa della varianza D) Contour map

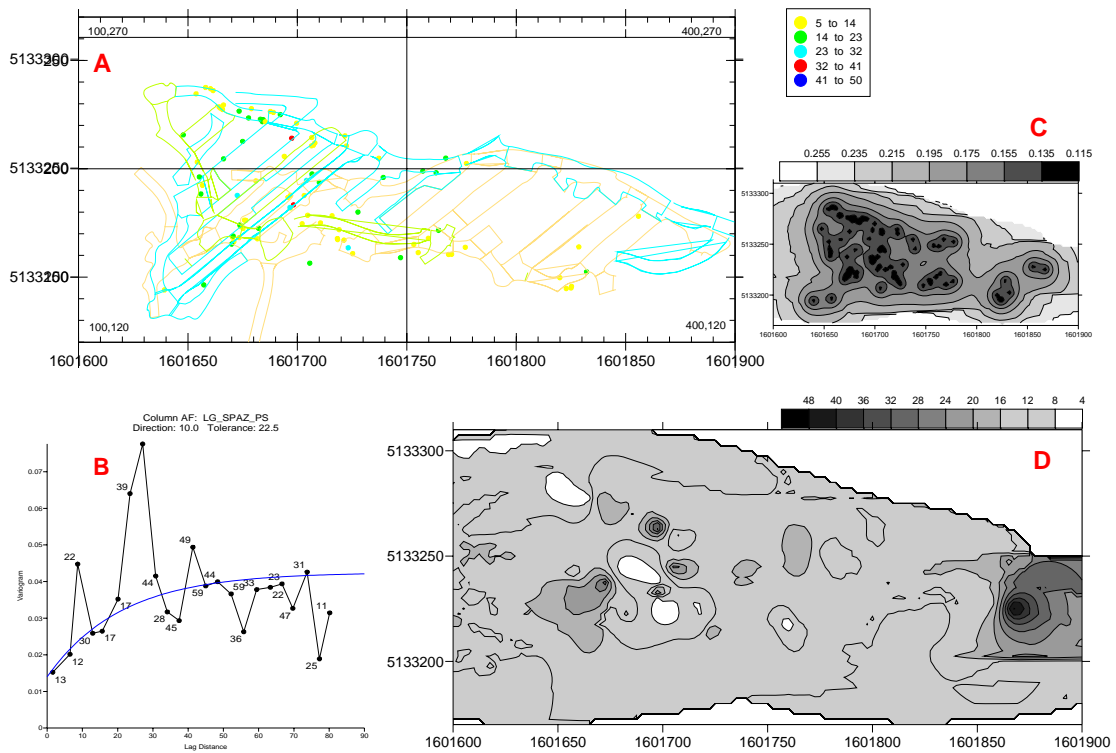


Figura 3.70: Elaborazioni geostatistiche riguardanti la spazatura a piccola scala (cm) con coordinate proiettate sul piano di riferimento (*Famiglia K3*). A) Planimetria dell'area di cava e ubicazione delle misure; B) Variogramma C) Mappa della varianza D) Contour map

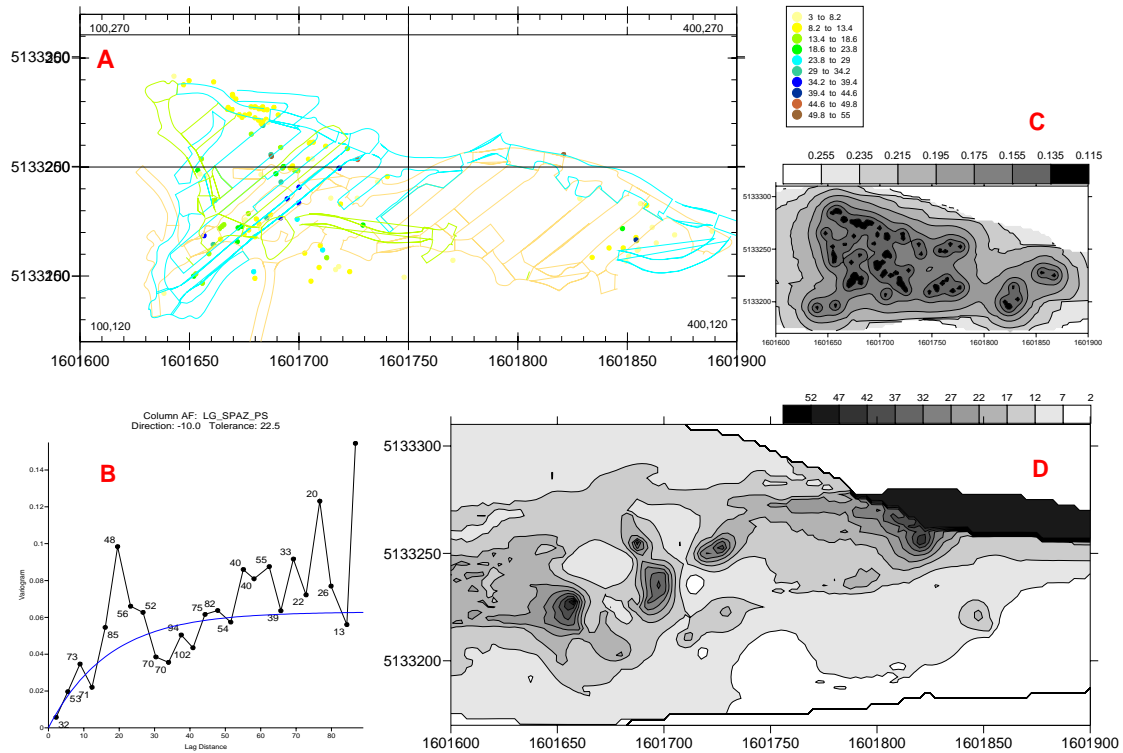


Figura 3.71: Elaborazioni geostatistiche riguardanti la spaziatura a piccola scala (cm) con coordinate proiettate sul piano di riferimento (Famiglia K4). A) Planimetria dell'area di cava e ubicazione delle misure; B) Variogramma C) Mappa della varianza D) Contour map

Apertura delle famiglie di discontinuità

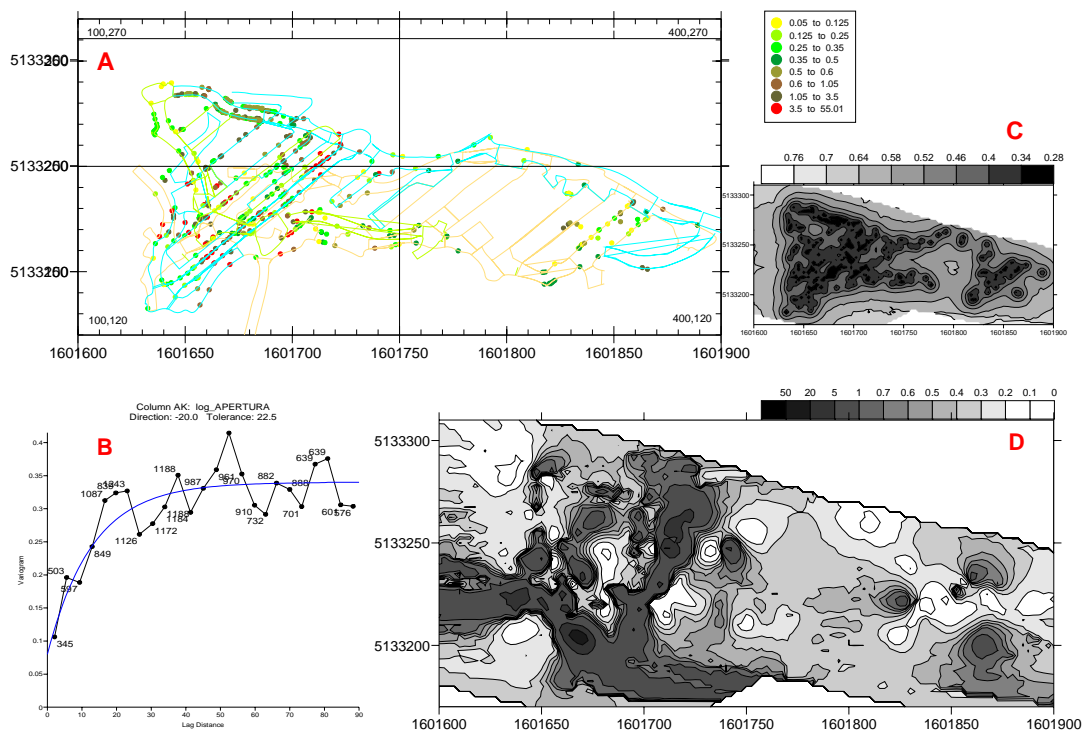


Figura 3.72: Elaborazioni geostatistiche complessive riguardanti l'apertura media (cm) con coordinate originali. A) Planimetria dell'area di cava e ubicazione delle misure B) Variogramma; C) Mappa della varianza D) Contour map

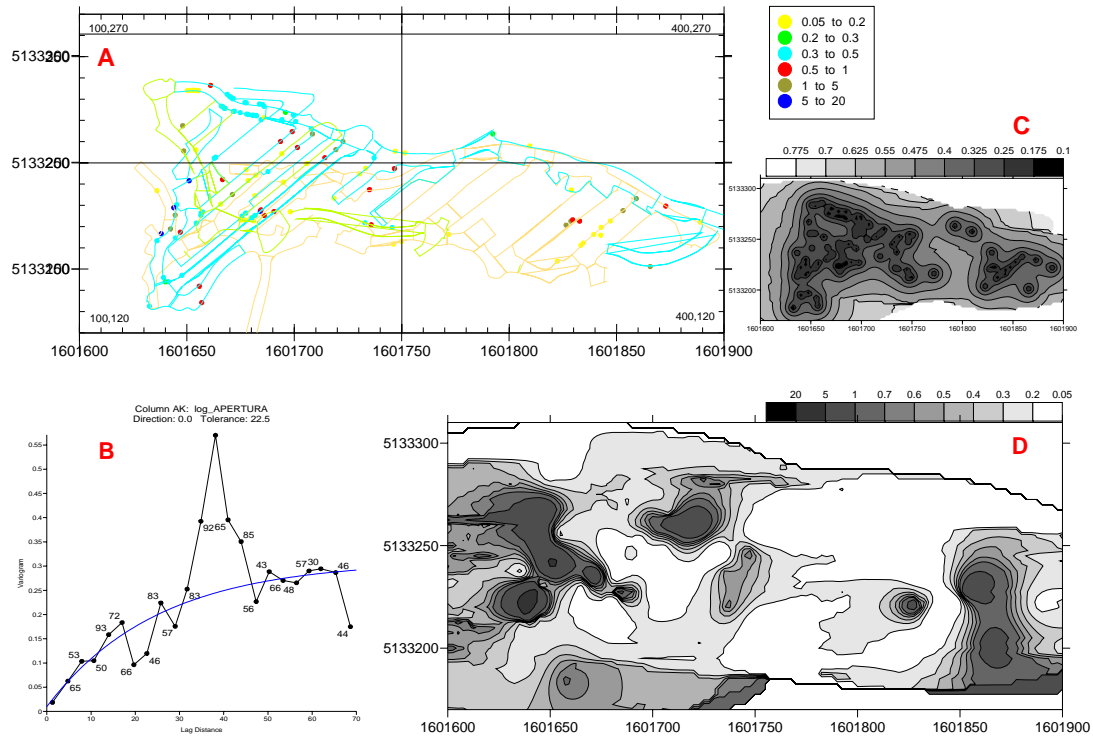


Figura 3.73: Elaborazioni geostatistiche riguardanti l'apertura media (cm) con coordinate originali (Famiglia K1). A) Planimetria dell'area di cava e ubicazione delle misure B) Variogramma; C) Mappa della varianza D) Contour map

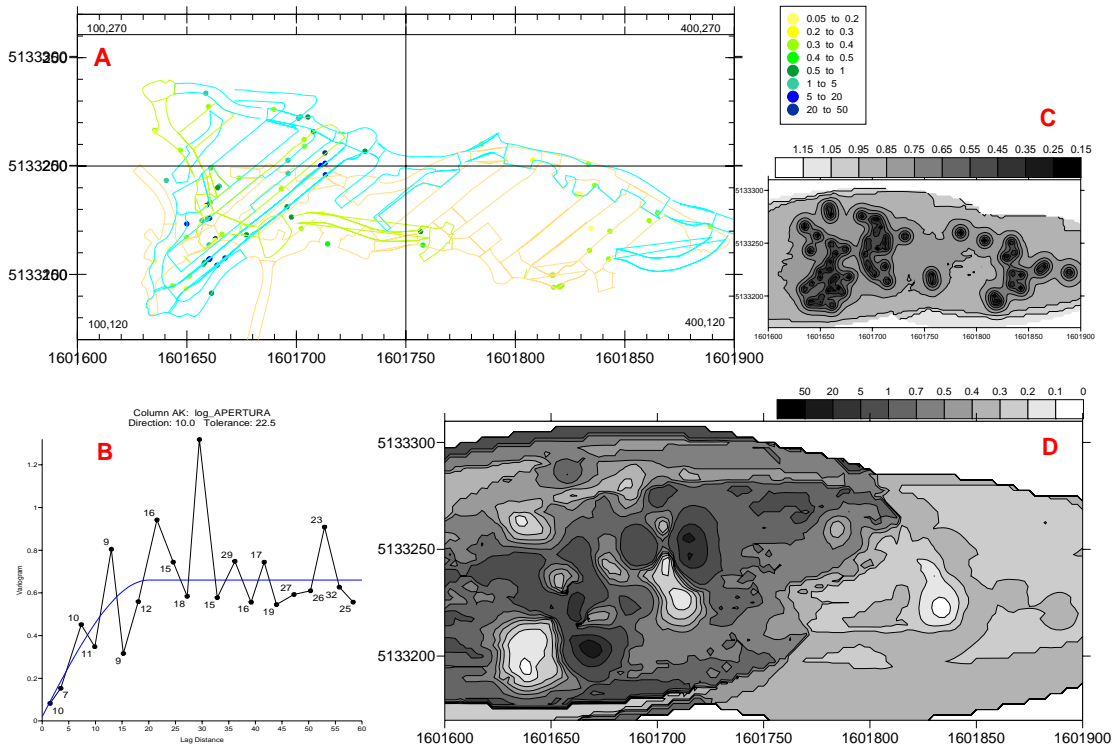


Figura 3.74: Elaborazioni geostatistiche riguardanti l'apertura media (cm) con coordinate originali (Famiglia K2). A) Planimetria dell'area di cava e ubicazione delle misure B) Variogramma; C) Mappa della varianza D) Contour map

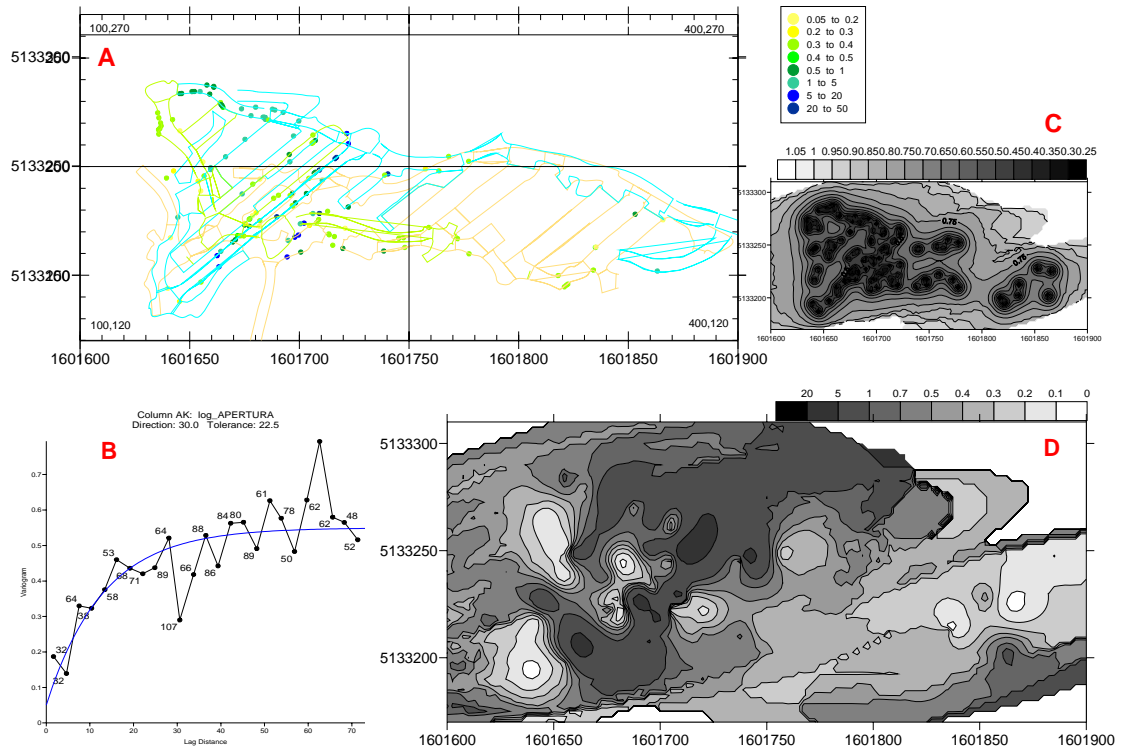


Figura 3.75: Elaborazioni geostatistiche riguardanti l'apertura media (cm) con coordinate originali (Famiglia K3). A) Planimetria dell'area di cava e ubicazione delle misure B) Variogramma; C) Mappa della varianza D) Contour map

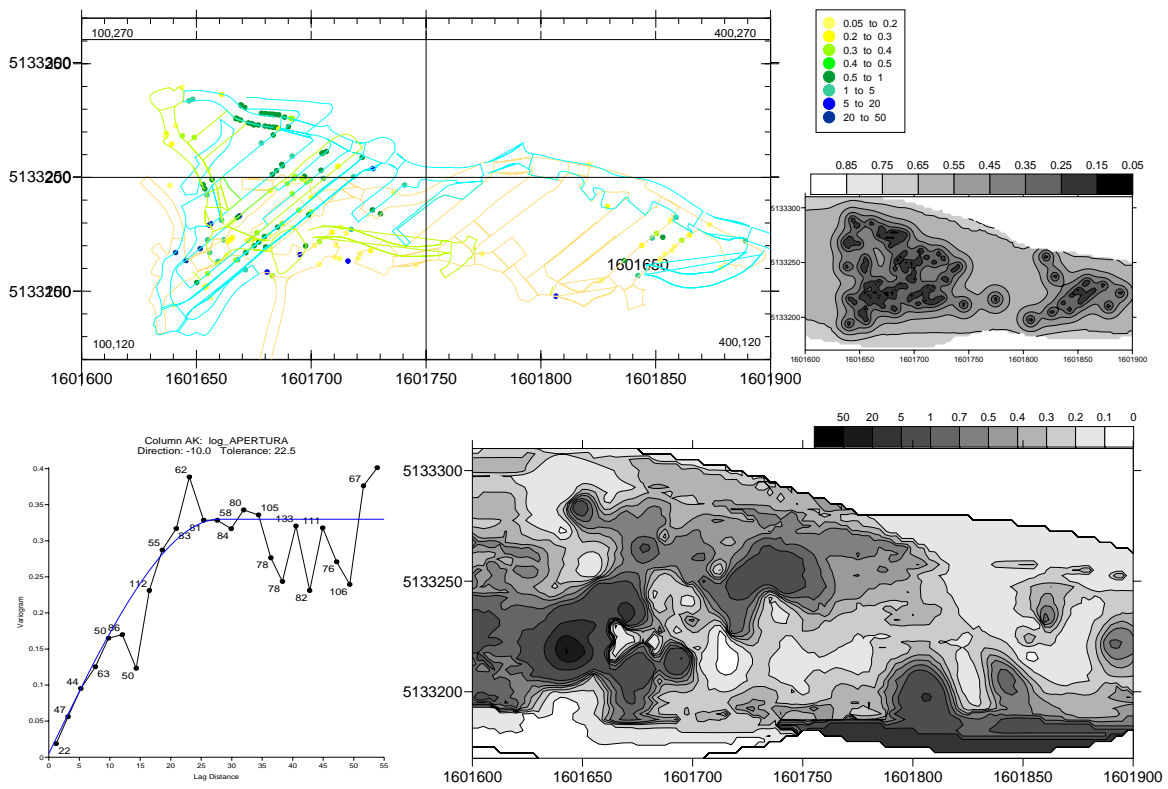


Figura 3.76: Elaborazioni geostatistiche riguardanti l'apertura media (cm) con coordinate originali (Famiglia K4). A) Planimetria dell'area di cava e ubicazione delle misure B) Variogramma; C) Mappa della varianza D) Contour map

Alterazione, riempimento e presenza d'acqua nelle famiglie di discontinuità

L'applicazione delle tecniche geostatistiche alle tre variabili alterazione, riempimento e presenza d'acqua risulta fortemente complicata dal fatto che queste siano costituite da variabili categoriali ordinali. Per queste variabili risulta inoltre determinate la vicinanza delle strutture con i lineamenti tettonici principali. Per confermare quest'ultima tesi si sono realizzate tre mappe, sovrapponendo alle misure di ciascuna variabile rilevata in sito, i lineamenti tettonici principali posizionati lungo i tre livelli in cui si articola la cava (Figura 3.77-3.79). Come è logico attendersi, il grado di alterazione delle discontinuità e la presenza di materiali di riempimento al loro interno hanno una disposizione spaziale correlabile con la vicinanza alle faglie e alle fratture principali ove risulta maggiore la circolazione di fluidi e la conseguente formazione di alterazione e riempimento. Le venute d'acqua mostrano un notevole incremento anche in corrispondenza dei contatti con l'incassante; proprio in corrispondenza del passaggio litologico quarzo/gabbro si notano le venute d'acqua più importanti, al contrario, le camere di coltivazione scavate interamente nel quarzo risultano sensibilmente più asciutte.

In quanto per le tre variabili discusse la geostatistica non è di grande aiuto nel descrivere il comportamento spaziale delle stesse, è preferibile usare gli indicatori statistici nel definire le condizioni delle discontinuità in termini di media e varianza; tali valori potranno essere utilizzati nella fase di simulazione del reticolo di fratturazione (vedi Capitolo 5).

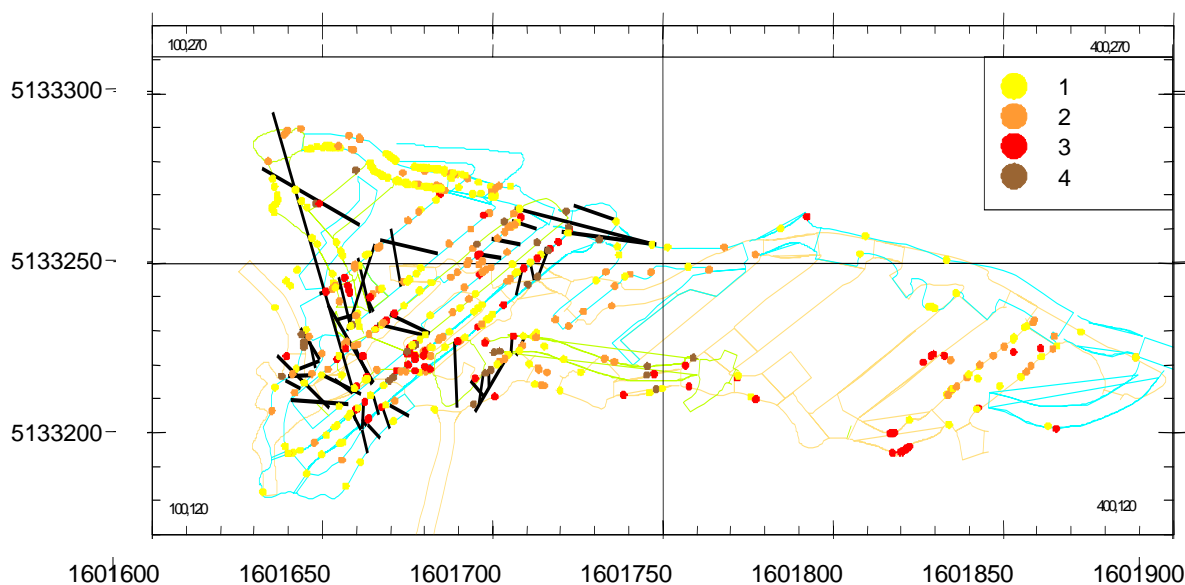


Figura 3.77: Planimetria dell'area di cava comprendente l'ubicazione del grado di alterazione delle discontinuità (coordinate originali) e posizione dei lineamenti tettonici principali (segmenti in nero)

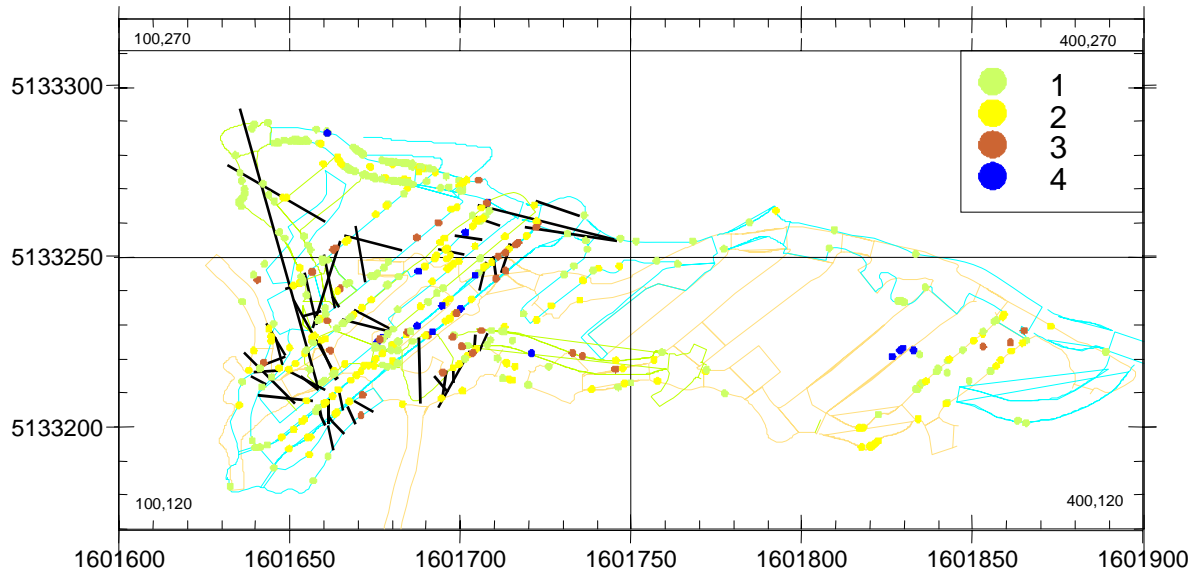


Figura 3.78: Planimetria dell'area di cava comprendente l'ubicazione della presenza e natura del materiale di riempimento delle discontinuità (coordinate originali) e posizione dei lineamenti tettonici principali (segmenti in nero)

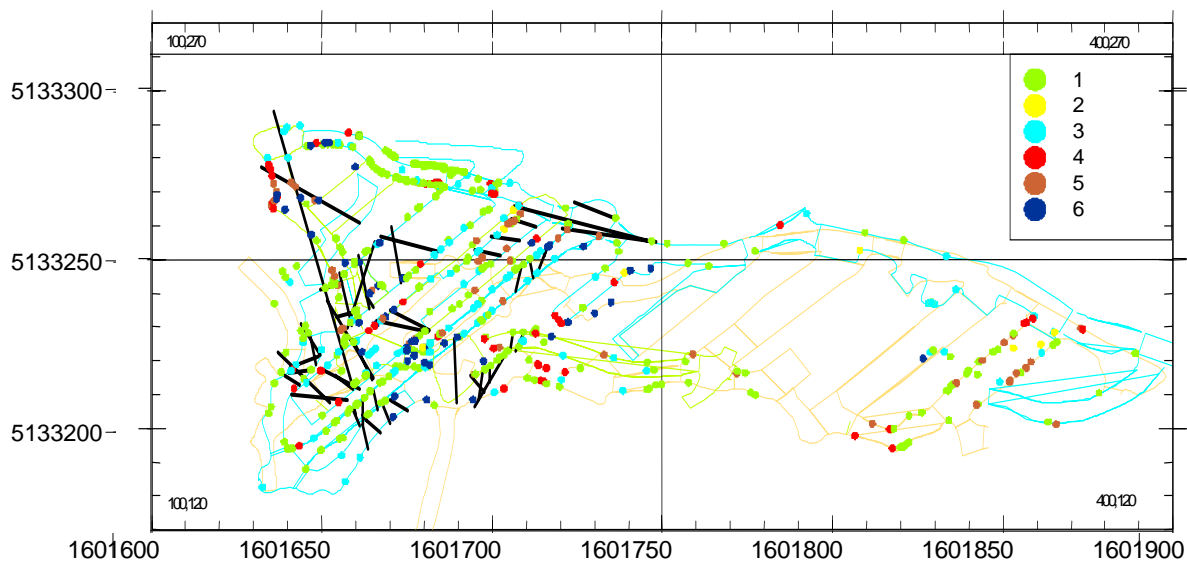


Figura 3.79: Planimetria dell'area di cava comprendente l'ubicazione della quantità d'acqua nelle discontinuità (coordinate originali) e posizione dei lineamenti tettonici principali (segmenti in nero)

Conclusioni dell'analisi geostatistica

I risultati relativi ai rilievi geomeccanici, unitamente alla descrizione di estese porzioni di camere di coltivazione e di collegamento fra le stesse, hanno permesso di individuare l'esistenza di quattro principali famiglie di discontinuità interessanti l'ammasso roccioso. Nel seguito sono descritti i caratteri medi ricavati dalle analisi degli istogrammi di frequenza (analisi statistiche), delle proiezioni stereografiche oltre a quelle geostatistiche. Le proprietà riportate si riferiscono

alle aree più interne ed omogenee della lente di quarzo; in prossimità dei lineamenti tettonici principali ed in vicinanza del contatto con l'incassante subentrano variazioni nelle caratteristiche peculiari.

Discontinuità K 1

Direzione di immersione: $180^\circ \pm 45^\circ$

Inclinazione: $57^\circ \pm 33^\circ$

Spaziatura: metrica fra le principali, decimetrica fra le secondarie (mai oltre i 20 cm)

Descrizione: discontinuità chiuse a persistenza media (3-10 m), superfici mediamente alterate con assenza di riempimento, ondulate a bassa rugosità, umide o con segni di filtrazione.

Discontinuità K2 - K3

Direzione di immersione: $111^\circ \pm 24^\circ$ e $249^\circ \pm 19^\circ$

Inclinazione: $72^\circ \pm 18^\circ$

Spaziatura: metrica fra le principali, centimetrica fra le secondarie (raramente oltre i 10 cm)

Descrizione: discontinuità parzialmente aperte a persistenza media (3-10 m), superfici alterate di color bruno-rossastro per ossidazione con assenza di riempimento, ondulate a bassa rugosità, mostrano evidenti segni di flusso idrico. Lungo le superfici di frattura più importanti ed evidenti (faglie) sono state rilevate strie di movimento.

Discontinuità K4

Direzione di immersione: $15^\circ \pm 35^\circ$

Inclinazione: $57^\circ \pm 33^\circ$

Spaziatura: metrica fra le principali, da centimetrica a decimetrica fra le secondarie

Descrizione: discontinuità chiuse a persistenza molto elevata (fratture con maggiore continuità all'interno del volume di cava), superfici debolmente alterate con evidenze di riempimento coesivo nelle aree più prossime al piano campagna, a gradini con media rugosità, mostrano evidenze di flusso idrico moderatamente diffuso.

La struttura generale dell'ammasso può essere fedelmente riassunta da un susseguirsi di fratture molto persistenti, aperte, alterate, sede di flusso idrico e con spaziatura variabile nell'ordine di qualche metro, appartenenti ad una medesima famiglia. Nelle porzioni comprese fra queste discontinuità principali è normalmente presente un reticolo di fratturazione secondario, parallelo

al precedente, ma caratterizzato da giunti sub persistenti, chiusi, non alterati e privi di evidenze di circolazione idrica.

Le gallerie create dall'attuale coltivazione in sotterraneo sono interessate da evidenze idriche di limitata entità ed importanza, oltre che da moti di filtrazione lungo i principali sistemi di fratturazione ed in particolar modo al contatto fra giacimento e roccia incassante, e nella zona di faglia che interessa la parte centrale del giacimento.

In accordo a quanto riportato nella "Variante al progetto attuativo di coltivazione della cava Bosco del Sasso (Relazione 7603/gennaio 2008) di E.Artigiani e F.Piovano" si afferma che, qualora il battente idrico in prossimità del contatto litologico fra quarzo ed incassante sia particolarmente elevato ed il flusso impedito in direzione verticale, si ha la venuta in galleria di un ingente flusso continuo d'acqua in pressione (contatto quarzo-gneiss sulla rampa di collegamento fra primo e secondo livello). Si ritiene assai probabile che in profondità, attraverso sistemi pervasivi di discontinuità aperte, sia presente una circolazione di acqua sotterranea che la futura coltivazione in progetto (rampa elicoidale scavata a partire da quota 1490 m s.l.m. profonda un centinaio di metri e corredata dai 5/6 livelli di camere di coltivazione) andrà ad intercettare e che dovrà quindi essere drenata all'esterno con conseguente abbassamento del livello idrico lungo il versante.

4 Capitolo 4

4.1 La circolazione idrica in ammassi rocciosi

Da un punto di vista idraulico, gli ammassi rocciosi sono mezzi eterogenei, anisotropi e discontinui. Poiché la circolazione idrica nelle rocce avviene prevalentemente lungo le discontinuità, la conoscenza della loro distribuzione e dei loro parametri caratteristici è di fondamentale importanza per individuare le grandezze che descrivono le modalità di scorrimento del fluido, in particolare per quanto riguarda la determinazione della permeabilità. Nel corso degli anni sono state messe punto diverse metodologie, alcune di tipo deterministico, altre di tipo probabilistico, capaci di correlare i dati strutturali con i parametri idrogeologici.

Approccio deterministico

Secondo l'approccio deterministico il mezzo roccioso viene considerato impermeabile, se non lungo le discontinuità. Ciò corrisponde, da un punto di vista idraulico, ad assimilare il flusso idrico entro un giunto a quello che avviene tra due piani paralleli o subparalleli. A partire dall'equazione di Navier-Stokes il valore della permeabilità, relativa ad un solo giunto liscio e in condizioni di moto laminare, si può esprimere come (Snow, 1967):

$$k = \frac{\gamma e^2}{12\eta} = \frac{g e^2}{12\nu}$$

dove e è l'apertura media del giunto (m), g è l'accelerazione di gravità (m/s^2), ν, γ, η sono, rispettivamente, la viscosità cinematica ($10^{-6} m^2/s$), la densità (kg/m^3) e la viscosità dinamica ($10^{-3} Pa/s$) del fluido e k è espresso in m/s .

Tale equazione si può generalizzare a una famiglia di discontinuità caratterizzata da una certa frequenza N_i ($1/m$) ottenendo (Snow, 1967):

$$k_i = \frac{N_i \cdot g \cdot e^3}{12\nu}$$

Considerando anche la rugosità delle fratture Louis (1969) ottiene:

$$k_i = \frac{N_i \cdot g \cdot e^3}{12\nu \cdot C}$$

nella quale:

$$C = 1 + 8,8\xi^{1,5}$$

descrive l'effetto della rugosità delle fratture sulla conducibilità. Il termine ξ è determinato sperimentalmente e vale $0,4 \div 0,5$. In presenza di giunti contenenti materiale di riempimento (sabbia, limo, argilla ecc.), la permeabilità delle fratture risulta condizionata da tale materiale, in modo tanto più marcato quanto maggiore è lo spessore del riempimento. Sarà quindi necessario eseguire analisi di laboratorio per identificare il materiale di riempimento e stabilirne la permeabilità.

Per valutare la permeabilità di un ammasso roccioso, ove siano presenti due o più sistemi di discontinuità, sarà necessario considerare la giacitura delle discontinuità stesse in rapporto alla direzione del gradiente piezometrico. La conducibilità idraulica deve quindi essere espressa sotto forma di tensore (Louis, 1974 e Kiraly et al., 1971)

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

ove f_i è la frequenza media (1/m) e $\bar{A} = (\bar{I} - \bar{n} \otimes \bar{n})$ è il tensore di orientamento, con \bar{I} = matrice identità ed \bar{n} = vettore normale al piano medio della famiglia di discontinuità.

Tale espressione permette di ottenere la proiezione del tensore di permeabilità nella direzione del flusso all'interno della frattura. Calcolando gli autovalori e gli autovettori della matrice così ottenuta si determinano le tre permeabilità principali k_1 , k_2 , k_3 e la loro orientazione nello spazio. Sulla base di tali risultati è possibile costruire l'elissoide di conducibilità idraulica avente per semiassi k_1 , k_2 , k_3 e quindi trattare l'ammasso roccioso come un mezzo continuo anisotropo. Applicando la relazione proposta da Louis (1974) è possibile trasformare le conducibilità idrauliche in permeabilità equivalente del mezzo:

$$k_e = \sqrt[3]{k_1 \cdot k_2 \cdot k_3}$$

Il valore così ottenuto può essere considerato come rappresentativo della permeabilità media dell'ammasso considerato isotropo.

Approccio probabilistico

L'approccio probabilistico alla valutazione della permeabilità negli ammassi rocciosi è stato proposto da numerosi autori (Shante e Kirkpatrick, 1971; Gueguen e Dienes, 1989) che hanno sviluppato una teoria, detta "della percolazione", per il calcolo della conducibilità idraulica a partire da dati di tipo strutturale. Secondo tale teoria le singole discontinuità presenti in un ammasso roccioso vengono assimilate a canali di lunghezza finita, la cui permeabilità è funzione dell'apertura, mentre le loro intersezioni costituiscono i "nodi di percolazione". In tal modo si può tener conto dell'effettiva estensione della discontinuità all'interno dell'ammasso roccioso (persistenza). Seguendo questo tipo di approccio diviene di fondamentale importanza comprendere la natura dell'eterogeneità delle caratteristiche delle fratture e analizzare le caratteristiche di interconnettività del reticolo che esse formano.

Il grado di interconnessione tra le fratture influenza sia l'entità che la natura della permeabilità dell'ammasso, ed è quindi il parametro che più di tutti deve essere accuratamente stimato. L'interconnettività di un sistema di fratture è un parametro che dipende dalla densità (areale, volumetrica) delle discontinuità e dalla loro dimensione, entrambi parametri non facilmente valutabili durante la fase di indagine.

Le discontinuità interconnesse formano quindi una rete di percolazione caratterizzata, nello spazio bidimensionale, da un numero di canali z che hanno origine dai singoli "nodi". Tali canali possono essere intercomunicanti o ciechi, e viene definita la probabilità $P(p)$, che il fluido si possa propagare attraverso un numero infinito di nodi a partire da un singolo nodo scelto a caso.

$$P_{(p)} = \lim_{n \rightarrow \infty} P_n(p)$$

Dove $P_n(p)$ è la probabilità che il flusso possa propagarsi ad n nodi a partire da un singolo nodo sorgente.

Si definisce inoltre la probabilità p , definita come la probabilità che un nodo qualsiasi venga occupato dall'acqua e la probabilità critica p_c esprimibile come:

$$P_c = \text{SUP} \left(p, \text{ tale che } P_{(p)} = 0 \right)$$

Sulla base delle definizioni precedenti risulta quindi che se la probabilità “ p ” è minore di p_c il flusso idrico è localizzato mentre se $p > p_c$ esisterà almeno una via di percolazione che attraversa l’intero mezzo.

Viene quindi definito il fattore di percolazione (ξ) che dipende dalle dimensioni delle fratture e dall’intensità di fratturazione (frequenza):

$$\xi = \pi^2 \cdot \left(\frac{r}{s}\right)^3$$

dove s è la spaziatura media delle discontinuità (m) e r il raggio medio (m).

La lunghezza media delle discontinuità può essere calcolata, a partire dai dati facilmente acquisibili mediante rilievo strutturale dell’ammasso roccioso, applicando la relazione proposta da Pahl (1981):

$$L = \frac{l \cdot (h - 2\eta) \cdot (1 + \theta_r - \theta_c)}{(l \cos \phi + h \sin \phi) \cdot (1 - \theta_r + \theta_c)}$$

Dove:

l = lunghezza affioramento

h = altezza affioramento

η = lunghezza minima considerata nel misurare le tracce delle discontinuità (cut-off)

$\theta_r = N_T/N$ e $\theta_c = N_C/N$

con:

N_T = numero delle discontinuità che attraversano l’affioramento

N_C = numero delle discontinuità contenute nell’affioramento

N = numero delle discontinuità che intersecano l’affioramento

Se si assume come modello rappresentativo della traccia delle fratture quello proposto da Baecher et al (1970) in cui le discontinuità vengono idealizzate a cerchi o ellissi i cui centri sono distribuiti casualmente nello spazio e i cui raggi sono distribuiti secondo una distribuzione log-normale, la lunghezza media delle discontinuità viene espressa dal raggio medio: $r = 2L/\pi$.

Il fattore di percolazione precedentemente definito indica il grado di connettività fra le fratture. La probabilità effettiva di percolazione v , viene quindi calcolata in funzione del fattore di percolazione e del volume rappresentativo unitario (VRU), che tiene conto dell'effetto scala e risulta variabile nel range tra 0 e 1. Per ammassi intensamente fratturati ($\xi \geq 10$) si pone $v=1$.

Per il calcolo della permeabilità intrinseca (m^2) gli Autori suggeriscono la seguente relazione:

$$K = \frac{4 \cdot \pi \cdot v \cdot a^3 \cdot r^2}{15s^3}$$

dove:

v = probabilità (frequenza) di percolazione determinata tramite la teoria della percolazione;

a = apertura efficace (m);

$r = 2L/\pi$ (con L = lunghezza media delle discontinuità) (m);

s = spaziatura media delle discontinuità (m);

4.1.1 Influenza delle caratteristiche dei giunti sulla permeabilità

La permeabilità degli ammassi rocciosi risulta fortemente influenzata dalle caratteristiche fisiche e geometriche delle discontinuità. In particolare, il moto dell'acqua all'interno di una singola discontinuità è governato, dal punto di vista idraulico, dall'apertura e dalla rugosità, mentre la permeabilità dell'ammasso roccioso dipende anche dalla frequenza e dalla persistenza dei giunti. Tali grandezze sono però estremamente variabili nello spazio a causa dell'eterogeneità del sistema "ammasso roccioso"; diventa quindi di fondamentale importanza definire delle relazioni in grado di descrivere, sia in modo deterministico sia attraverso un approccio statistico, la variabilità dei parametri in gioco e il loro peso sulla conducibilità.

Influenza della rugosità dei giunti

L'effetto più importante generato dalla rugosità dei giunti si evidenzia nella perdita di parallelismo dei filetti fluidi che determina un allungamento del percorso idraulico e l'istaurarsi di un moto di tipo turbolento; questo, sommato alla diminuzione dell'apertura idraulica delle discontinuità, determina in definitiva una riduzione della permeabilità del mezzo. Bandis (1985) propose una relazione empirica che consente di mettere in relazione il valore del coefficiente di rugosità di Barton (JRC) con l'apertura efficace dei giunti, ovvero l'apertura equivalente relativa alla discontinuità liscia:

$$e_e = (JRC)^{2.5} \left(\frac{e}{e_e}\right)^{-2}$$

dove: e_e = apertura efficace delle discontinuità (μm), e = apertura meccanica della discontinuità (μm), JRC = coefficiente di rugosità di Barton.

Ponendo:

$$e_e = e - \varepsilon$$

Dove ε è l'altezza delle asperità, si ottiene:

$$\varepsilon = e - e_e = e - \frac{e^2}{JRC^{2.5}} = e \left(1 - \frac{e}{JRC^{2.5}}\right)$$

dove ε è l'ampiezza delle asperità.

Sapendo che il diametro idraulico $D_h \approx 2e$ si ottiene:

$$\frac{\varepsilon}{D_h} = \frac{e \cdot \left(1 - \frac{e}{JRC^{2.5}}\right)}{2e} = 0.5 - \frac{e}{2 \cdot JRC^{2.5}}$$

E quindi, sostituendo ε/D_h nell'equazione definita da Louis (1967):

$$k = \frac{g \cdot e^2}{12\nu \cdot \left[1 + 8.8 \cdot \left(\frac{\varepsilon}{D_h}\right)^{1.5}\right]}$$

Si ottiene la permeabilità (m/s) di una frattura, valida per giunti scabri, calcolata in funzione del coefficiente di rugosità JRC (Scesi et al. 2007):

$$k = \frac{g \cdot e^2}{12\nu \cdot \left[1 + 8.8 \cdot \left(0.5 - \frac{e}{2JRC^{2.5}} \right)^{1.5} \right]}$$

La relazione è valida in regime di flusso laminare per $\varepsilon/Dh > 0.033$. Altre relazioni sono definite per casi diversi:

$$k = 4\sqrt{g \cdot e} \log \left(\frac{1.9}{\left(0.5 - \frac{e}{2JRC^{2.5}} \right)^{1.5}} \right)$$

valida in regime turbolento per $\varepsilon/Dh > 0.033$ e:

$$k = 4\sqrt{g \cdot e} \log \left(\frac{3.7}{\left(0.5 - \frac{e}{2JRC^{2.5}} \right)^{1.5}} \right)$$

valida in regime turbolento per $\varepsilon/Dh < 0.033$.

I campi di validità delle precedenti relazioni sono definiti in funzione del numero di Reynolds critico e dall'altezza relativa delle discontinuità. In Figura 4.1 sono evidenziati i campi di validità delle relazioni sopra definite.

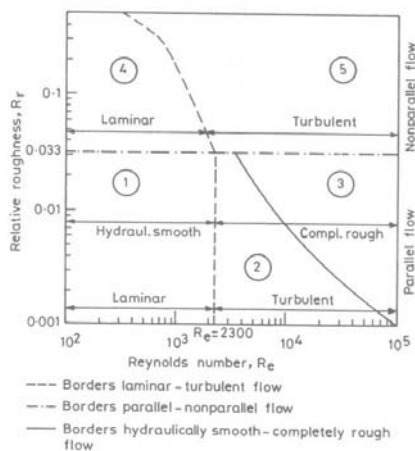


Figura 4.1: Definizione dei range di validità dei differenti regimi di flusso in una frattura (Singhal B. B. S., Gupta R. P.; 1999)

L'influenza della rugosità sulle modalità di circolazione idrica è tanto più marcata quanto più piccola è l'apertura della discontinuità. A livello teorico, l'effetto della rugosità si può ritenere trascurabile per $e \geq 0.934 \cdot 10^{-6} \cdot JRC^{2.5}$ il che significa che l'effetto della rugosità diviene trascurabile anche per giunti molto rugosi per valori di apertura superiori a circa 1mm.

L'effetto della rugosità riveste un ruolo assai importante anche in relazione ai problemi connessi con la propagazione dei contaminanti negli acquiferi fessurati. Infatti, l'introduzione del parametro "rugosità" determina un ulteriore aumento della complessità del sistema, con la formazione di locali anomalie piezometriche in grado di influire sull'estensione e sulla migrazione dei contaminanti, che si propagano prevalentemente per avvezione, con lo sviluppo di percorsi preferenziali, accumuli o dispersioni in funzione di come le varie discontinuità si intersecano tra loro.

Influenza della variabilità dell'apertura dei giunti sulla permeabilità di una frattura

L'apertura di una frattura non è in genere costante lungo tutta la discontinuità ma presenta variazioni anche importanti in funzione dei processi di alterazione fisico-chimica che ne hanno modificato la forma e degli spostamenti relativi delle pareti che determinano una sfasatura delle asperità. L'influenza della variabilità dell'apertura delle fratture sulla determinazione della sua permeabilità è stata recentemente studiata da numerosi autori. Bear (1993), in particolare, ha proposto una relazione per valutare l'apertura effettiva a_{eff} di una frattura composta da un numero m di segmenti discreti, ognuno caratterizzato da un'apertura a_i :

$$a_{eff}^3 = \frac{\sum_{i=1}^m l_i}{\sum_{i=1}^m l_i / a_i^3}$$

dove l_i indica la lunghezza del tratto di apertura a_i . Passando da segmenti discreti caratterizzati da diversi valori di apertura ad una situazione in cui l'apertura varia con continuità lungo la frattura si ottiene:

$$a_{eff}^3 = \int_0^L \left(\int_0^L \frac{ds}{[a(s)]^3} \right)^{-1} ds$$

dove L indica la lunghezza totale della frattura composta da segmenti infinitesimi di lunghezza ds .

Relazioni tra permeabilità e stato tensionale

Lo stato tensionale a cui è sottoposto un ammasso ha notevole influenza sulla determinazione delle caratteristiche idrauliche della compagine rocciosa: analisi effettuate su campioni in laboratorio hanno mostrato come la permeabilità tenda a diminuire con l'aumento dello sforzo normale, attestandosi asintoticamente ad un valore minimo, mostrando un campo di variabilità che può raggiungere i tre ordini di grandezza.

Per quanto riguarda le relazioni tra lo stato tensionale e la permeabilità, lo sforzo normale a cui è soggetta una discontinuità ha importanti effetti sull'apertura e sull'entità della superficie di contatto fra le asperità delle pareti. Di conseguenza, la conducibilità idraulica di una discontinuità viene fortemente influenzata dallo stato di sforzo a cui è soggetta. Gangi (1978) ha sviluppato una relazione che permette di legare la permeabilità di una discontinuità allo stato di sforzo, in funzione delle proprietà meccaniche delle asperità:

$$K(\sigma_0') = K_0 \left[1 - \left(\frac{\sigma_0'}{\sigma_M} \right)^m \right]^3$$

Dove σ_M è il modulo di compressibilità della discontinuità, approssimativamente pari a 1/10-1/100 del modulo di compressibilità del materiale che costituisce la discontinuità; m è una costante ($0 < m < 1$) che caratterizza la funzione di distribuzione delle altezze delle asperità, σ_0' è lo sforzo normale agente e K_0 è la permeabilità per $\sigma_0' = 0$

Altri autori (Bandis e al., 1985) hanno osservato come la riduzione della permeabilità sia maggiore per bassi valori del JRC della discontinuità. Ryan ha dimostrato come la chiusura delle discontinuità sia un processo anelastico e tempo dipendente. L'effetto "memoria" (isteresi) di cicli successivi di carico-scarico può quindi essere molto rilevante. L'entità dell'isteresi dipende comunque dalle proprietà meccaniche delle asperità.

Le caratteristiche dei giunti, soprattutto apertura, spaziatura, rugosità e riempimento sono fortemente condizionate dalla natura della roccia. Le loro relazioni con la variazione dello stato tensionale a cui è sottoposto l'ammasso roccioso sono però difficilmente generalizzabili, come evidente dalle numerose proposte, talora addirittura contraddittorie, reperibili in bibliografia.

Diversi autori hanno cercato di individuare delle relazioni atte a determinare il legame esistente tra la variazione dello stato tensionale (ad esempio con la profondità) e le variazioni di permeabilità (Carlsson e Olsson(1977), Snow, Burgess(1977), Gangi, 1978; Walsh e Brace, 1984; Bai *e al.*, 1994 e 1999; Liu *e al.*, 2000).

Snow (1968) ha osservato una relazione empirica tra la profondità e l'apertura/spaziatura delle discontinuità: l'apertura media osservata diminuisce di 2/4 volte passando dalle porzioni superficiali (10m) a quelle più profonde (30m), mentre la spaziatura aumenta di 1 ordine di grandezza nei primi 10m e raddoppia ulteriormente oltre i primi 50m. L'autore, sulla base di una serie di studi effettuati su rocce cristalline, ha proposto una legge di correlazione lineare tra la permeabilità del mezzo e il logaritmo della profondità. Snow (1968) ha inoltre osservato come la porosità efficace dipenda maggiormente dalla spaziatura della fratturazione più che dall'apertura e orientazione delle famiglie, senza considerevoli differenze tra tipologie di rocce diverse (igneo/metamorfiche/sedimentarie).

Lo stato di fratturazione di un ammasso roccioso risulta generalmente variabile nello spazio, in funzione del regime tettonico e delle sollecitazioni alle quali la roccia è, ed è stata sottoposta. In regimi non particolarmente attivi si può tuttavia riconoscere una tendenza generale e, per tenere conto della variabilità dello stato di fratturazione si possono utilizzare tecniche statistiche che prevedono l'esecuzione di test di adattamento su campioni di dati omogenei e la definizione della distribuzione di probabilità che meglio si adatta al caso in esame (Gattinoni et al., 2001). La permeabilità di un ammasso roccioso, che dipende tra l'altro anche dall'intensità di fratturazione, risulta quindi variabile per le diverse zone dello stesso, in dipendenza anche delle variazioni con la profondità, come sperimentalmente osservato da vari Autori (Snow, 1970; Louis, 1974; Gangi, 1978; Walsh, 1981).

Raven and Gale (1976), Kendorski and Mahtab (1976), Manev and Avramova-Tacheva (1970), ad esempio, hanno osservato che al di sotto di una zona superficiale in cui l'intensità di fratturazione risulta accentuata in conseguenza ai processi di alterazione meteorica e ad altri effetti legati al rilascio tensionale, l'intensità di fratturazione si mantiene approssimativamente costante con la profondità. La riduzione di permeabilità comunemente osservata con l'aumento della profondità sarebbe quindi secondo gli autori, da attribuire alla diminuzione dell'apertura delle fratture. Altri (ONWI, 1978) hanno invece osservato come le discontinuità con notevole apertura si mantengano anche in profondità, ma la loro spaziatura aumenti rispetto ai livelli superficiali. Sebbene la spaziatura tra le discontinuità appaia, come regola generale, aumentare con la profondità, non è possibile definire una legge di variazione sistematica globalmente

valida. Inoltre, sebbene l'apertura totale delle discontinuità sembri aumentare con la profondità, ciò non è altrettanto valido se si considerano solamente le fratture conduttive, che sembrano invece mantenersi approssimativamente costanti con la profondità.

Brace (1980), in una ricerca sperimentale effettuata su rocce cristalline per valutare la variazione della permeabilità con la profondità, ha osservato come la permeabilità mostri in realtà notevoli variazioni (fino a 3 ordini di grandezza) anche nello stesso intervallo stratigrafico. Ad ogni profondità (fino ad oltre 3000 metri) l'autore ha individuato intervalli ad elevata permeabilità (1-100 mD) che rappresentano zone preferenziali di flusso all'interno della formazione rocciosa. L'autore ha inoltre osservato una riduzione della permeabilità con la profondità solo per i primi 500 m; al di sotto non è stata osservata alcuna correlazione evidente tra la profondità e la permeabilità. Concludendo, sebbene vi sia una relazione permeabilità/profondità per le prime centinaia di metri, tale relazione è probabilmente sito specifica e difficilmente generalizzabile. A profondità maggiori non appare invece alcuna relazione evidente, e la permeabilità è sostanzialmente influenzata dalla presenza di orizzonti permeabili che si rinvencono anche a notevole profondità (2-3 Km).

Variazione della permeabilità indotta dallo scavo di gallerie

L'apertura di cavità sotterranee nelle rocce, quali gallerie o cavità di maggiori dimensioni, determina una perturbazione dello stato di sforzo agente sul mezzo, e una conseguente redistribuzione degli sforzi accompagnata da deformazioni fragili e/o duttili dell'ammasso roccioso nella porzione immediatamente adiacente allo scavo. Qualora la perturbazione del campo di sforzo superi la capacità portante della roccia si possono generare crolli sui piedritti e al tetto della galleria. Tale situazione si realizza di norma solamente in rocce deboli o per cavità di notevoli dimensioni. Normalmente si assiste invece al riassetto della compagine rocciosa tramite spostamenti di modesta entità lungo discontinuità preesistenti. La redistribuzione degli sforzi attorno a cavità scavate nella roccia dipende da numerosi fattori, tra i quali forma e dimensione del cavo sono i principali. Tipicamente, per una galleria a sezione rettangolare, si osserva una concentrazione degli sforzi di taglio agli spigoli ed elevati sforzi compressivi lungo i piedritti. Ciò determina la formazione di strutture di taglio ai vertici e fratture di trazione parallele ai piedritti e al tetto della galleria che inducono notevoli variazioni della permeabilità della roccia nell'immediato intorno dello scavo. Heckman e al. (1979) hanno riscontrato un aumento di permeabilità di circa 3 ordini di grandezza (da $1e-6$ a $1e-3$ m/s) intorno ad un tunnel scavato in argilliti a circa 500 m di profondità. La corrispondente porosità acquisita dalla roccia

in seguito al detensionamento indotto dallo scavo è stata valutata in circa il 20%. La massima variazione di permeabilità è stata osservata al tetto dello scavo, sui piedritti la riduzione è stata inferiore di circa 1 ordine di grandezza. Allontanandosi dallo scavo la permeabilità decresce secondo una legge esponenziale. Montazer e al. (1982) hanno studiato la variazione di permeabilità attorno ad un tunnel alto 3 m e largo 5 m, scavato a circa 100 m di profondità in rocce gneissiche e migmatitiche. Gli autori hanno riscontrato una zona ad elevata fatturazione, attribuibile al disturbo dovuto alle operazioni, pari a circa 0.5 m, ed una zona di incremento di permeabilità dovuta alla perturbazione del campo di sforzo pari a circa 3/5 m. L'aumento di permeabilità delle fratture è risultato più marcato per fratture parallele alla direzione di avanzamento del tunnel rispetto a quelle disposte in direzione perpendicolare.

La tecnica di scavo utilizzata determina inoltre un disturbo meccanico nella compagine rocciosa di norma molto più marcato rispetto all'effetto indotto dalla redistribuzione del campo tensionale. Il grado di disturbo è particolarmente marcato nello scavo con esplosivo. L'esplosione genera un'onda di pressione gassosa che si propaga nella roccia, frantumando e disgregando il materiale. Intorno al cavo si propagano fratture radiali con modalità dipendenti dall'orientazione delle discontinuità preesistenti, lo stato di sforzo locale e l'anisotropia dei parametri di resistenza a trazione della roccia.

Numerosi studi hanno cercato di quantificare l'estensione della zona danneggiata intorno a un tunnel utilizzando tecniche di rilevamento indiretto quali sismica a rifrazione e prospezione elettrica. Scott *e al.* (1968) per esempio, hanno riscontrato un deterioramento della roccia per un raggio di circa 5m, di cui il primo dovuto alla detonazione dell'esplosivo e i restanti 4 indotti dalla redistribuzione degli sforzi.

Dimensione dei blocchi di matrice rocciosa

L'intersezione delle fratture appartenenti alle diverse famiglie suddivide l'ammasso roccioso in blocchi la cui dimensione media è funzione della spaziatura e dell'orientazione delle singole famiglie. Forma e dimensione media rappresentativa dei blocchi costituiscono un parametro di fondamentale importanza nella valutazione delle caratteristiche meccaniche e idrauliche dell'ammasso.

L'indice di fatturazione volumetrica, J_v che definisce il numero di discontinuità presenti nell'unità di volume può essere calcolato dalla (Palmstrom, 1982):

$$J_v = \frac{1}{s_1} + \frac{1}{s_2} + \frac{1}{s_3} + \dots + \frac{1}{s_n}$$

Dove s_n è la spaziatura di una singola famiglia (m).

Palmstrom (Palmstrom, 1982) ha suggerito una semplice relazione per correlare J_v ed RQD :

$$RQD = 115 - 3.3J_v \quad \text{con} \quad RQD = 100 \text{ per } J_v < 4.5$$

Mentre Priest e Hudson (1976) hanno proposto:

$$RQD = 100 \cdot (0.1f + 1)e^{-0.1f}$$

Dove f è il numero medio di giunti per metro di lunghezza.

Un altro approccio utilizza gli invarianti di scala per definire la geometria del reticolo di discontinuità e la dimensione dei blocchi. Tale formulazione richiede che vi sia una relazione di potenza tra il numero e la dimensione degli elementi, ossia utilizza la teoria dei frattali per la definizione delle proprietà del reticolo di fratture. (Mojtabai e al. 1989, Poulton et al., 1990 e Ghosh, 1990). Questi ed altri autori hanno infatti mostrato l'esistenza di una relazione dimensione-frequenza applicabile tanto alla dimensione delle fratture quanto ai blocchi rocciosi, esprimibile nella forma:

$$N(r) \propto r^{-D}$$

Dove $N(r)$ è il numero di frammenti con dimensione maggiore di r e D è la dimensione frattale. Le dimensioni frattali normalmente osservate per i materiali geologici sono state riassunte da Turcotte (1986) e sono risultate variabili nel range 1.14-3.54

Se la frequenza delle discontinuità segue una distribuzione esponenziale negativa, anche la dimensione dei blocchi in cui la roccia risulta suddivisa avrà una distribuzione esponenziale negativa. Applicando la teoria dei frattali è possibile associare alla dimensione frattale osservata una determinata correlazione con le caratteristiche meccaniche dell'ammasso: un'elevata dimensione frattale è infatti associabile ad una bassa resistenza, elevata fatturazione e, di conseguenza, elevata conducibilità idraulica della roccia.

Valutazione dell'interconnessione dei giunti

Per ricostruire la direzione preferenziale di flusso è importante valutare il grado di interconnessione esistente tra le diverse discontinuità; infatti, se le fratture sono indipendenti le une dalle altre, si comportano come canali isolati, e non contribuiscono allo spostamento della massa fluida; al contrario, se le discontinuità sono interconnesse tra loro, la permeabilità è influenzata da tutte le famiglie di discontinuità presenti nell'ammasso roccioso e il flusso idrico segue una vera e propria rete di flusso, formata da una serie di canali collegati tra loro. Tener conto dell'interconnessione nello studio della filtrazione all'interno di un ammasso roccioso fratturato significa considerare con quale probabilità si intersecano due o più famiglie di discontinuità. Long e Witherspoon (1985) hanno messo in evidenza l'importanza dell'interconnessione delle discontinuità sulla permeabilità dell'ammasso roccioso sia in termini di direzione che di modulo. Rouleau e Gale (1985) hanno dimostrato che l'interconnessione tra due famiglie di discontinuità può essere espressa in funzione degli altri parametri caratteristici delle stesse famiglie di discontinuità, quali la giacitura, la spaziatura e la persistenza e hanno proposto un metodo empirico per la valutazione dell'interconnettività tra una famiglia di giunti (i) ed un'altra (j):

$$I_{ij} = \frac{l_i}{s_i} \text{sen} \gamma_{ij} \quad (i \neq j)$$

Dove l_i è la lunghezza media della tracce del set i , s_i è la spaziatura media del set, e γ_{ij} è l'angolo tra i poli delle due famiglie. L'interconnettività totale di un set con gli n altri set presenti risulterà quindi:

$$I_i = \sum_{j=1}^n I_{ij} \quad (i \neq j)$$

Gli autori hanno inoltre dimostrato come all'aumentare di I_i aumenti l'importanza idraulica del set i . Al di sotto di una soglia di I_i fissata dagli autori pari a 1, la famiglia di giunti risulta non interconnessa ed ha importanza trascurabile ai fini della circolazione.

Per verificare le leggi proposte sarà comunque necessario eseguire indagini in profondità o reperire dati di indagini già eseguite in zona.

4.2 Modellazione numerica della circolazione idrica in ammassi fratturati.

La modellazione numerica del flusso idrico sotterraneo ha subito un notevole sviluppo a partire dagli anni '80 grazie allo sviluppo di hardware sempre più potenti e all'implementazione di nuovi software di simulazione matematica.

4.2.1 Revisione bibliografica sullo studio della circolazione idrica negli acquiferi fratturati

La modellazione dei processi di flusso nei mezzi fratturati risale storicamente ai primi lavori di Barenblatt che agli inizi degli anni 60 introdusse il concetto di modello a doppia porosità considerando il mezzo poroso fratturato come la perfetta sovrapposizione di due mezzi continui interconnessi (Barenblatt 1960).

Questo tipo di approccio suscitò notevole interesse nella comunità scientifica dando inizio ad un notevole e rapido sviluppo teorico. Warren e Root (1963) svilupparono un modello idealizzato di mezzo fratturato, formato dall'accostamento di cubi porosi identici, separati da una rete ortogonale di discontinuità. In seguito, Havlena e Odeh (1963) generalizzarono il modello di Warren e Root applicandolo a casi più complessi, in cui la condizione di ortogonalità del reticolo di fratture non era soddisfatta. L'evoluzione dell'approccio modellistico andò di pari con gli sviluppi di nuove teorie che permisero di definire le leggi che regolano la permeabilità nelle fratture (Snow 1969). Un ulteriore sviluppo si deve a Conrad e Jacquin che nel 1975 applicarono strumenti di morfologia matematica all'analisi delle reti di fratture bidimensionali, e teorizzarono il concetto di rete gerarchica, in cui le fratture vengono raggruppate in due o più categorie di ordine gerarchico diverso, con le fratture di ordine superiore che troncano e interrompono quelle di ordine inferiore.

Negli anni ottanta, Kranz (1979) e Witherspoon (1980) pubblicarono i primi lavori sperimentali sulla misurazione della permeabilità nelle fratture. Brown e Scholz (1986) e Gentier (1986) studiarono le caratteristiche di forma e rugosità dei piani di frattura. Nel 1985 Barton pubblicò un lavoro fondamentale in cui riassunse i risultati della ricerca sulle proprietà idromeccaniche dei giunti e propose un modello accoppiato per lo studio della resistenza, deformabilità e proprietà idrauliche dei giunti.

La teoria sulle reti di flusso nel frattempo si era evoluta con i primi tentativi di modellizzazione del trasporto nelle reti confinate (Long, 1982).

Un grosso filone di ricerca, a partire dagli anni ottanta, venne dedicato allo studio della teoria della percolazione, rispetto alla quale Charlaix (1987) svolse un'imprescindibile funzione pionieristica, introducendo un nuovo modo di studiare gli acquiferi fratturati. Inoltre, le proprietà di autosimiglianza delle superfici delle discontinuità aprirono nuove interessanti prospettive di ricerca. In tal senso, Levy nel 1988 determinò teoricamente la permeabilità di un mezzo poroso fratturato adottando una tecnica multiscala.

Nel frattempo vennero fatti notevoli passi avanti nella definizione dei modelli geometrici in grado di simulare l'assetto geometrico dei reticoli di fratture. Dai primi modelli ortogonali (Imray, 1955) si passò al modello di Baecher (1977) ripreso e ampliato da numerosi autori (Long, 1983; Billaux, 1990; Villaescusa, 1993), fino al modello Veneziano (1978) e al modello di Dershowitz (1984) che introdussero il concetto di modello stocastico successivamente sviluppato e ampliato da numerosi studi che portarono all'implementazione di modelli statistici in grado di riprodurre attraverso un processo stocastico il reticolo fessurativo (Ivanova, 1998; Meyer e Einstein, 2002).

Uno dei problemi fondamentali della modellazione del flusso nei mezzi fratturati è rappresentato dalla definizione della scala a cui viene indagato il problema. A scale diverse infatti, il flusso risulta dominato da meccanismi diversi e richiede approcci metodologici di tipo diverso. Bear (1993) affrontò il problema della scala dei modelli di flusso definendo quattro tipi di situazioni caratterizzate da specifiche peculiarità:

- A scala molto ristretta la circolazione dipende dalle proprietà e dalle caratteristiche idrauliche delle singole fratture
- A scala locale i meccanismi di flusso e trasporto risultano dominati dalle caratteristiche delle fratture principali, caratterizzate da maggior apertura, persistenza e reciproca interconnettività. L'interazione tra matrice solida e il reticolo di fratture aumenta di importanza all'aumentare della scala del problema. A questa scala il problema può essere studiato con un approccio di tipo discreto incentrato sulla generazione stocastica del reticolo.
- A scala intermedia l'interazione tra il reticolo delle fratture principali, le fratture secondarie e la matrice diviene determinante. In questo caso si utilizza in genere un approccio a duplice porosità.

- A scala regionale la modellazione del reticolo discreto risulterebbe computazionalmente troppo gravosa ed è quindi necessario ricorrere ad un approccio di tipo continuo equivalente attraverso la definizione di un complesso di parametri che caratterizzano il comportamento idrogeologico del mezzo, impiegando poi un unico modello continuo per lo studio macroscopico del sistema idrogeologico.

4.2.2 Elementi fondamentali dell'approccio modellistico

L'utilizzo di un modello per lo studio idrogeologico di un'area può avere essenzialmente due finalità:

- Un fine predittivo, quando si cerca di prevedere la risposta di un sistema fisico alla variazione delle condizioni al contorno indotte, ad esempio, dalla realizzazione di un'opera ingegneristica.
- Un fine interpretativo, quando lo scopo è quello di studiare i parametri di controllo di un determinato fenomeno o le caratteristiche geologiche e idrogeologiche di un ammasso.

A livello generale, i modelli matematici simulano indirettamente il comportamento di un sistema fisico tramite un sistema di equazioni riassumibili in tre categorie fondamentali:

- L'equazione fondamentale del moto
- Le condizioni al contorno
- Le condizioni iniziali.

I modelli matematici sono strumenti molto utili e versatili ma presentano anche alcuni importanti limitazioni, la principale di queste è costituita dalla notevole mole di dati richiesti in ingresso, da cui dipende l'attendibilità dei risultati che decresce in maniera esponenziale al diminuire della quantità e dell'affidabilità dei dati in ingresso.

La procedura di implementazione di un modello deve necessariamente partire da un'accurata definizione dei risultati che si vogliono ottenere, e si compone in una serie di passaggi metodologici di seguito specificati:

1. Definizione dello scopo per cui viene realizzato il modello.
2. Definizione del modello concettuale che schematizza la realtà in maniera semplificata, individuando i limiti del modello e le unità idrostratigrafiche.
3. Scelta della tipologia di modello e del codice di calcolo: la scelta deve essere fatta in funzione del tipo di problema da analizzare e delle finalità del modello.
4. Implementazione del modello: richiede la definizione delle condizioni iniziali e di quelle al contorno, la discretizzazione del modello concettuale lungo una griglia di calcolo e l'assegnazione dei valori preliminari dei parametri meccanici e idrogeologici dei materiali coinvolti.
5. Calibrazione dei parametri: è una verifica preliminare della qualità del modello al fine di testarne la capacità di riprodurre i fenomeni reali.
6. Analisi di sensitività: finalizzata a valutare l'effetto dell'incertezza nella stima dei parametri sui risultati della simulazione.
7. Interpretazione e presentazione dei risultati.

La progettazione di un modello numerico di flusso richiede l'accurata definizione delle caratteristiche geometriche del dominio di studio e l'individuazione dei processi che governano il flusso alla scala di interesse. In funzione del contesto idrogeologico e della scala d'analisi deve innanzi tutto essere scelto il tipo di modello da realizzare definendo il tipo di approccio più adatto tra le opzioni disponibili:

- Modelli continuo equivalenti
- Modelli discreti
- Modelli a duplice porosità

Modelli di tipo continuo equivalente

L'utilizzo di modelli darciani per la simulazione del flusso nei sistemi fratturati è ampiamente diffuso nella pratica ingegneristica e fa riferimento ai concetti di permeabilità equivalente e volume rappresentativo elementare (VRE). In questo tipo di modelli l'eterogeneità dell'ammasso fratturato viene modellata utilizzando un numero limitato di regioni, ciascuna delle quali con proprietà uniformi al suo interno. La definizione delle proprietà delle regione può essere fatta sia in modo deterministico sia introducendo una componente di variabilità aleatoria per i parametri,

esprimendoli in forma di distribuzione probabilistica dei valori attesi; in tal caso il modello si definisce stocastico. L'approccio stocastico si basa sull'utilizzo di molteplici procedure tra le quali si ricordano le simulazioni Monte Carlo, basate su realizzazioni multiple del sistema di fratture, formulazioni "black box" che utilizzano campi casuali, e concettualizzazioni gerarchiche che includono la teoria della percolazione e la geometria frattale. Il livello di incertezza nei parametri di input dipende dalla naturale variabilità del mezzo, la cui completa conoscenza viene limitata dal numero e dalla tipologia delle misure disponibili. Uno dei problemi principali dell'approccio continuo risiede nella definizione del VRE, che deve essere sufficientemente ampio da includere un campione statisticamente rappresentativo di fratture conduttive in modo che le proprietà idrogeologiche dell'insieme non siano influenzate dalle caratteristiche specifiche delle singole discontinuità ma rappresentino un comportamento medio dell'ammasso. La possibilità di individuare un VRE per le strutture idrogeologiche fratturate, è un tema ancora dibattuto dalla comunità scientifica internazionale e non vi è alcuna garanzia di poterlo definire ad una data scala per un determinato sistema. La possibilità di individuare un VRE deve essere quindi valutata caso per caso in funzione della geometria del sistema, dalla scala del problema e delle proprietà delle fratture. Il grado di eterogeneità è stato definito (Maini et al. 1972) come il rapporto tra la spaziatura media delle discontinuità e il volume roccioso considerato. L'autore indica in 1/20 il rapporto minimo perché un ammasso roccioso discontinuo possa essere trattato con l'approccio continuo equivalente. Wilson, and Witherspoon, (1970) suggeriscono un rapporto non superiore a 1/50. L'approccio continuo equivalente è comunque evidentemente applicabile solamente nei casi in cui sia possibile definire un VRE.

La scelta del continuo viene fatta generalmente in base alle conoscenze sulla distribuzione delle fratture e della permeabilità. Se la circolazione idrica è dominata da un unico sistema di discontinuità, può essere stimata una conducibilità idraulica equivalente per l'ammasso roccioso utilizzando l'ipotesi del mezzo continuo oppure tramite un'approssimazione piano-parallela (Domenico e Schwartz, 1990; Hsieh, 2002). L'approccio continuo viene comunque impiegato con ottimi risultati in formazioni rocciose intensamente fratturate caratterizzate da una fratturazione fitta e ben interconnessa, con sistemi di fratture il più possibile uniformi per apertura e orientazione nello spazio. Qualora invece la rete di fratture sia debolmente interconnessa o risulti molto controversa la definizione del VRE i modelli di questo tipo non dovrebbero essere utilizzati.

L'approccio equivalente continuo poggia sull'assunto che il comportamento macroscopico dell'ammasso roccioso fratturato, possa essere definito e descritto mediante i principi della

meccanica del continuo in cui gli effetti della presenza delle fratture sono già implicitamente contenuti nei modelli costitutivi equivalenti, e nei parametri associati. Gli effetti locali indotti dalle discontinuità vengono trascurati, a vantaggio di netta semplificazione del modello che comunque mantiene la capacità di descrivere il comportamento globale del sistema.

Modelli di reti discrete di fratture

Il ricorso a questo tipo di modellazione è di fatto necessario per lo studio della circolazione alla scala di dettaglio, non accuratamente rappresentabile da un modello darciiano di tipo continuo equivalente. Ciò implica la necessità di generare un reticolo di fessurazione al quale applicare le appropriate condizioni al contorno. I modelli, sviluppati sia in due dimensioni (Long e Witherspoon, 1885) sia in campo tridimensionale (Hung e Evans, 1985; Rasmussen, 1988; Dverstorp e Andersson, 1989, Dershowitz, 1988) rappresentano quindi il naturale sviluppo dei modelli di simulazione stocastica del reticolo di fessurazione e sono in grado di incorporare proprietà di scala-dipendenza e di gerarchia naturale del reticolo. Il principale vantaggio dei modelli discreti risiede nella possibilità di poter ricostruire il reticolo di flusso all'interno dell'ammasso roccioso, determinando sia le portate defluenti sia le pressioni idrauliche nelle singole discontinuità. Tali modelli risultano quindi particolarmente utili nei problemi inerenti la stabilità di versante e la realizzazione di opere in sotterraneo ma trovano la loro principale limitazione nell'estensione del dominio d'analisi, che deve essere di piccole dimensioni data l'onerosità computazionale implicata dal metodo che lo rende di fatto inapplicabile a domini di estesi.

In via del tutto generale, i modelli appartenenti a questa categoria, valutano la circolazione idrica all'interno del sistema di fratture impiegando distribuzioni sintetiche di aperture, orientazioni, spaziatore, e tenendo al contempo conto delle varie scabrezze superficiali e della connettività del sistema. L'inconveniente principale di questo approccio modellistico risiede nella corposa massa di informazioni necessarie al loro funzionamento, talvolta difficili da ricavare, e dell'ingente carico computazionale richiesto.

I primi modelli discreti risalgono agli studi di Snow del 1969, in cui le fratture venivano rappresentate come tre famiglie ortogonali di piani infiniti, con spaziatore costante, o variabile. Nei modelli poissoniani, impiegati per la prima volta nel 1976 da Priest ed Hudson, la distanza delle fratture, rappresentate da piani di lunghezza infinita, da un'origine arbitraria è definita in maniera casuale mediante un processo di Poisson e la loro orientazione è altresì casuale, con una

distribuzione anisotropa. Il modello fu ripreso e affinato da Andersson nel 1984, che introdusse fratture di estensione infinita, rendendo la densità di rete dipendente dalle dimensioni.

I modelli Booleani, ipotizzano fratture di dimensioni finite, caratterizzate da un certo diametro e una certa orientazione. I centri delle fratture vengono posizionati casualmente nello spazio secondo un processo poissoniano. (Cacas, 1990).

Long e Billaux (1987) proposero un procedimento in grado di simulare variazioni nella densità di fratturazione in reti bidimensionali utilizzando un processo sequenziale detto padre-figlio. Secondo tale approccio viene generato un primo insieme di punti poissoniani, detti semi o padri, e un secondo insieme di fratture discoidali, dette figli, vengono generate in gruppi centrati sul punto “padre”.

Un altro gruppo di modelli che inglobano aspetti gerarchici è stato sviluppato a partire dal lavoro di Conrad e Jacquin (1973). Gli autori, partendo dalla generazione di linee casualmente distribuite su un piano, generano delle reti indipendenti di segmenti finiti posizionati all'interno dei poligoni formati dalle linee inizialmente create. Lo stesso procedimento viene successivamente ripreso e implementato introducendo un condizionamento delle reti simulate alle tracce reali (Lee 1990).

Modelli a doppia porosità

I modelli a doppia porosità cercano di coniugare la semplificazione dei modelli darciani con la capacità di simulare in maniera realistica il flusso nelle discontinuità, caratteristica di quelli discreti. In questo tipo di approccio la circolazione dei fluidi e il trasporto vengono modellizzati sia all'interno della rete di fratture interconnesse, che all'interno dei blocchi solidi della matrice, contemporaneamente ma separatamente l'uno dall'altro. Nei modelli a doppia porosità vengono infatti implementate le equazioni che governano entrambi i mezzi, tra i quali sono possibili scambi di portata all'interfaccia. Per un ammasso roccioso con una matrice costituita da blocchi altamente porosi, i modelli in questione sono in grado di simulare la cessione di risorsa fluida immagazzinata nella matrice verso la rete di fratture, la cui conformazione geometrica viene schematizzata in maniera piuttosto semplificata. L'approccio discreto nasce dall'osservazione che nelle rocce non fratturate si possono avere porosità anche elevate (immagazzinamento) con bassissime permeabilità (assenza di flusso); al contrario, all'interno delle fratture, pur non avendo grandi volumi di immagazzinamento, si possono avere permeabilità e quindi flussi anche elevati. I modelli a doppia porosità sono stati introdotti per la prima volta da Barenblatt et al (1960) e successivamente implementati da Warren e Root (1963) e da Kazemi (1969) Alcuni

esempi di modelli semi analitici e numerici sono stati proposti da Huyakorn et al. (1983), Rowe e Booker (1990), Sudicky (1990). I modelli a doppia porosità vengono efficacemente utilizzati anche per la simulazione del trasporto di contaminanti (Bay et al, 1997; Moutsopoulos et al., 2001; Alboin et al., 2002), che possono avere interazioni non trascurabili con la matrice solida della roccia, soprattutto in relazione ai processi di diffusione, dispersione e intrappolamento del contaminante.

Il comportamento idraulico del modello è governato dalle proprietà idrauliche delle fratture, quali la permeabilità, porosità e coefficiente di immagazzinamento e da quelle della matrice. Nel modello vengono inoltre introdotte le equazioni che esplicitano il flusso all'interno delle discontinuità tenendo contemporaneamente in considerazione il flusso che dalla matrice affluisce alle fratture, considerando contemporaneamente la circolazione dell'acqua nei blocchi di matrice. Il drenaggio dalla matrice verso le fratture dipende dalla geometria dell'interfaccia di contatto e dalla diffusività idraulica della matrice. I modelli a doppia porosità sono quindi in grado di simulare il processo, fisicamente basato, che spiega il ritardo nella risposta idraulica dell'ammasso roccioso dovuto al rilascio del volume di fluido immagazzinato nella matrice poco permeabile.

I modelli a doppia porosità vengono correntemente impiegati per l'analisi di flusso e trasporto in modelli di fratture discrete, selezionando un set di fratture più conduttive o critiche in relazione alla loro influenza con le situazioni studiate dal modello che vengono trattate e studiate come elementi discreti, mentre la restante parte delle fratture componenti il reticolo vengono utilizzate per il calcolo dei parametri equivalenti che descrivono in maniera globale il loro comportamento idraulico. Il calcolo dei parametri equivalenti delle fratture può poi inglobare anche le proprietà dalla matrice rocciosa permettendo di realizzare modelli costituiti da una sovrapposizione di più mezzi ognuno dei quali caratterizzato da comportamenti idraulici differenti che, pur essendo interconnessi, sono caratterizzati da proprietà molto diverse, tali da richiedere una trattazione separata. In tale circostanza si dovrà definire una legge di interazione che tenga conto dello scambio di massa tra i mezzi continui in questione.

A partire dalla loro introduzione, i modelli a doppia porosità hanno trovato largo impiego soprattutto nel campo delle simulazioni dei giacimenti petroliferi. Tra le principali limitazioni dei modelli a doppia porosità si citano l'eccessiva semplificazione con cui viene rappresentata la geometria dei blocchi, le limitazioni imposte al numero di fratture discrete che è possibile modellizzare e la difficoltà insita nella stima dei parametri idraulici e meccanici da attribuire alle fratture.

5 Capitolo 5

Modellazione del reticolo di fratturazione.

I dati rilevati secondo le modalità descritte in precedenza hanno fornito una notevole quantità di informazione relativa alle caratteristiche geometriche e meccaniche del reticolo di fratturazione.

La complessità dell'assetto strutturale e la variabilità insita nelle caratteristiche del sistema di fratture rendono comunque tecnicamente impossibile rilevare e quindi caratterizzare deterministicamente il reticolo nella sua globalità. Le fratture, a loro volta, non di rado presentano peculiarità geometriche ed idro-meccaniche che cambiano con la posizione spaziale, con la scala d'interesse, con i vincoli applicati. La difficile accessibilità delle rocce nel sottosuolo limita pesantemente lo studio diretto delle fratture e costringe ad estrapolare le proprietà globali del sistema a partire dai dati discontinui rilevati in situ.

L'eterogeneità del reticolo dipende inoltre dalla variabilità insita nei processi geologici di formazione delle fratture, in funzione della conformazione disomogenea del campo di sforzo e della disomogeneità delle proprietà meccaniche della roccia costituente l'ammasso, che comunque nel caso di studio è limitata a due unità litotecniche, di cui una di interesse limitato. Per ovviare all'incertezza geologica e strutturale connessa con la definizione delle caratteristiche delle fratture è quindi necessario ricorrere a metodologie stocastiche per la caratterizzazione del reticolo, simulandone l'assetto a partire dai dati rilevati in affioramento.

Nello studio qui presentato la generazione stocastica del reticolo di fratture è stata effettuata con l'ausilio del codice FracMan7, ©Golder Associated, sviluppato dal gruppo di ricerca guidato dal Dr. Dershowitz. FracMan permette di modellare la geometria di un reticolo di fratture definendone le caratteristiche geometriche, meccaniche e strutturali utilizzando una metodologia stocastica a partire dalle distribuzioni probabilistiche dei dati rilevati in affioramento. Il software include una serie di strumenti numerici per modellizzare il reticolo di discontinuità e fornisce all'operatore tutti gli strumenti necessari per implementare le diverse fasi del processo, a partire dall'organizzazione e dallo studio statistico dei dati rilevati in affioramento, la definizione, la generazione e la validazione dei modelli e lo studio del comportamento meccanico ed idrogeologico dell'ammasso roccioso.

Le fasi di costruzione del modello sono riassumibili nella serie di passaggi procedurali di seguito elencati e approfonditamente descritti nei paragrafi successivi.

1. Definizione del dominio di generazione.
2. Scelta del modello geometrico di creazione delle fratture.
3. Individuazione delle Famiglie di discontinuità: definizione della giacitura media della famiglia e della dispersione rispetto al centro della distribuzione.
4. Definizione dell'intensità di fratturazione per ogni famiglia.
5. Definizione della forma e stima della distribuzione delle dimensioni delle fratture.
6. Individuazione delle distribuzioni di probabilità dei parametri meccanici e idraulici delle fratture.
7. Generazione stocastica dei modelli.
8. Validazione dei modelli.

5.1 Modelli probabilistici per la generazione di un reticolo fessurativo

La geometria di un sistema di discontinuità può essere riprodotta attraverso un modello stocastico in quanto ciascun parametro (orientazione, spaziatura ecc..) può essere descritto attraverso una legge di distribuzione statistica applicabile a una porzione statisticamente omogenea dell'ammasso (Aler et al, 1996, Rabinovitch et al 1999). I modelli stocastici proposti in letteratura si basano tutti sulle seguenti assunzioni e ipotesi semplificative:

- Le fratture sono piane.
- L'ubicazione di ogni frattura all'interno del dominio di generazione è definita secondo un processo poissoniano: tutte le ubicazioni sono quindi equiprobabili.
- La giacitura di una frattura è indipendente dalla sua ubicazione.

Nei paragrafi a seguire viene riportata una breve descrizione dei modelli più utilizzati, ognuno dei quali si basa sulla definizione di specifiche relazioni tra le varie caratteristiche geometriche delle discontinuità.

5.1.1 Modello ortogonale

Il modello ortogonale (Imray, 1955) ha storicamente rappresentato il primo tentativo di simulazione geometrica di un sistema di fratture e ipotizza la presenza di due o più sistemi di discontinuità tra loro ortogonali, rappresentate da piani paralleli di dimensioni infinite. Nel modello deterministico originale la spaziatura fra i piani delle fratture è assunta costante per ciascun set e descrive interamente la densità del sistema di fratturazione dell'ammasso. Il modello diventa stocastico qualora la spaziatura per ciascuna famiglia sia trattata come una variabile casuale.

Comunemente si assume che i giunti si posizionino nello spazio seguendo un processo di Poisson, in modo tale che la spaziatura segua una distribuzione esponenziale. La versione originale del modello, puramente teorica, secondo cui le fratture sono considerate come non confinate, non è realisticamente applicabile ai più comuni sistemi di fratture naturali, che hanno dimensioni finite. Un'ulteriore sviluppo del modello ha quindi introdotto la possibilità di

considerare fratture di dimensione finita, richiedendo quindi la definizione della forma e dimensione delle fratture.

5.1.2 Modello discoidale di Baecher

Il modello discoidale, di natura aleatoria, idealizza le discontinuità come elementi planari i cui centri sono casualmente posizionati nello spazio; si assume che la lunghezza delle fratture, rilevata in corrispondenza degli affioramenti, abbia distribuzione lognormale e che la spaziatura si distribuisca esponenzialmente. Sulla base di tali ipotesi, le fratture hanno forma di dischi bidimensionali con orientazione casuale nello spazio, i raggi delle discontinuità hanno distribuzione lognormale e le orientazioni sono statisticamente indipendenti e dunque non correlate. In Figura 5.1 è visualizzata la simulazione di un sistema di fratture così definito:

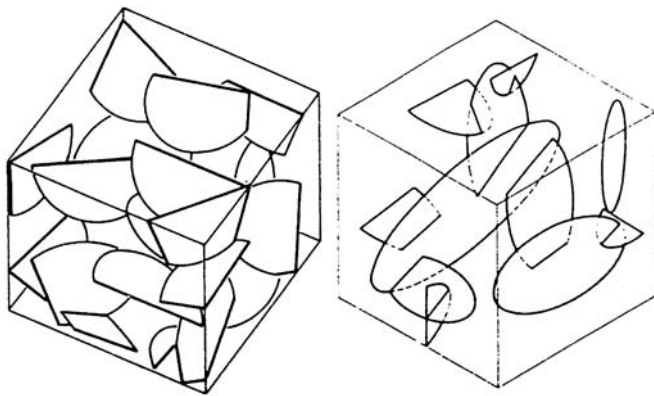


Figura 5.1: Modello discoidale di Baecher (Baecher G.B.; 1983)

La forma delle fratture può essere assunta anche ellittica o circolare. In questo caso la sua dimensione si definisce attraverso la lunghezza dei semiassi minore e maggiore passanti dal centro della frattura, rappresentato da una propria distribuzione probabilistica. Le forme circolari o ellittiche assunte nel modello hanno una giustificazione meccanica rigorosa. L'apparenza prismatica degli ammassi rocciosi suggerisce infatti che le fratture terminano quasi sempre intersecandosi con altre discontinuità, piuttosto che nella roccia intatta; tali terminazioni, specialmente quando la persistenza delle fratture è considerevole, producono blocchi di forma poligonale. Per tale motivo l'assunzione di fratture circolari può non essere supportata dall'evidenza.

Principale vantaggio del modello è l'estrema semplicità di applicazione e la facilità con cui si conducono le analisi numeriche; per questo motivo il modello è molto diffuso negli studi di meccanica delle rocce e di circolazione idrica negli ammassi fratturati.

5.1.3 Modello di Veneziano

In questo modello la rete di fratture, generata attraverso due processi stocastici distinti e consecutivi, risulta omogenea ma in generale non isotropa. Il modello, concettualmente semplice, è definito completamente attraverso pochi parametri di significato intuitivo: la densità e la distribuzione dell'orientazione dei piani di fratture, oltre alla frazione di ciascun piano assunta come discontinua e a due parametri addizionali che controllano la forma e la dimensione delle fratture (espressi in termini probabilistici). In virtù dell'indipendenza poissoniana del posizionamento delle fratture all'interno del dominio, l'analisi del modello risulta operativamente semplice e fornisce risultati di notevole interesse pratico. La geometria 3D del modello è considerata eccessivamente complessa, dal momento che la complicazione tridimensionale è sovrabbondante, per un modello che viene usato nella maggior parte dei casi in due sole dimensioni.

5.1.4 Modello di Dershowitz

Questo modello costituisce la prosecuzione ed il perfezionamento del modello Veneziano. La generazione delle fratture segue due processi stocastici: quello primario presuppone la definizione di piani di fratturazione mediante un processo poissoniano, con posizionamento dei centri delle fratture uniformemente distribuito nello spazio ed orientazioni caratterizzate da una specifica distribuzione probabilistica. Il processo secondario contrassegna le porzioni persistenti dei poligoni su ciascun piano come zone fratturate o ponti di roccia intatta. La probabilità di essere contrassegnato come frattura è identica per ciascun poligono. I piani provenienti dal processo primario definiscono figure poliedriche in tre dimensioni; le fratture risultano in effetti definite come facce di tali poliedri. Se ogni faccia del poliedro è contrassegnata come frattura, si può definire, conseguentemente, un blocco roccioso confinato da tali fratture. Con il modello di Veneziano, giacché le terminazioni delle fratture sono indipendenti dalle intersezioni dei piani delle discontinuità, la simulazione delle fratture che formano blocchi solidi rocciosi, ove possibile, risulta estremamente improbabile; con il modello di Dershowitz, invece la modellazione dei blocchi in roccia diventa più facile.

Nel caso in cui il sistema di fratture interconnesse sia formato da fratture che terminano in roccia piuttosto che all'intersezione con altre fratture sarà necessario utilizzare un artificio pratico che consiste nella generazione di un altro set virtuale di piani di fratture con l'unico scopo di costituire un limite per le discontinuità del set reale. I poligoni definiti sui piani del set virtuale hanno, chiaramente, probabilità nulla.

Il modello di Dershowitz possiede la medesima qualità del modello di Veneziano di riprodurre fratture complanari a meno che la loro probabilità sia eccessivamente bassa. La complanarità delle fratture così generate, ovviamente, rappresenta un vantaggio solo nella circostanza in cui la realtà geologica lo richieda. In figura 5.2 sono sintetizzate le fasi di generazione del modello.

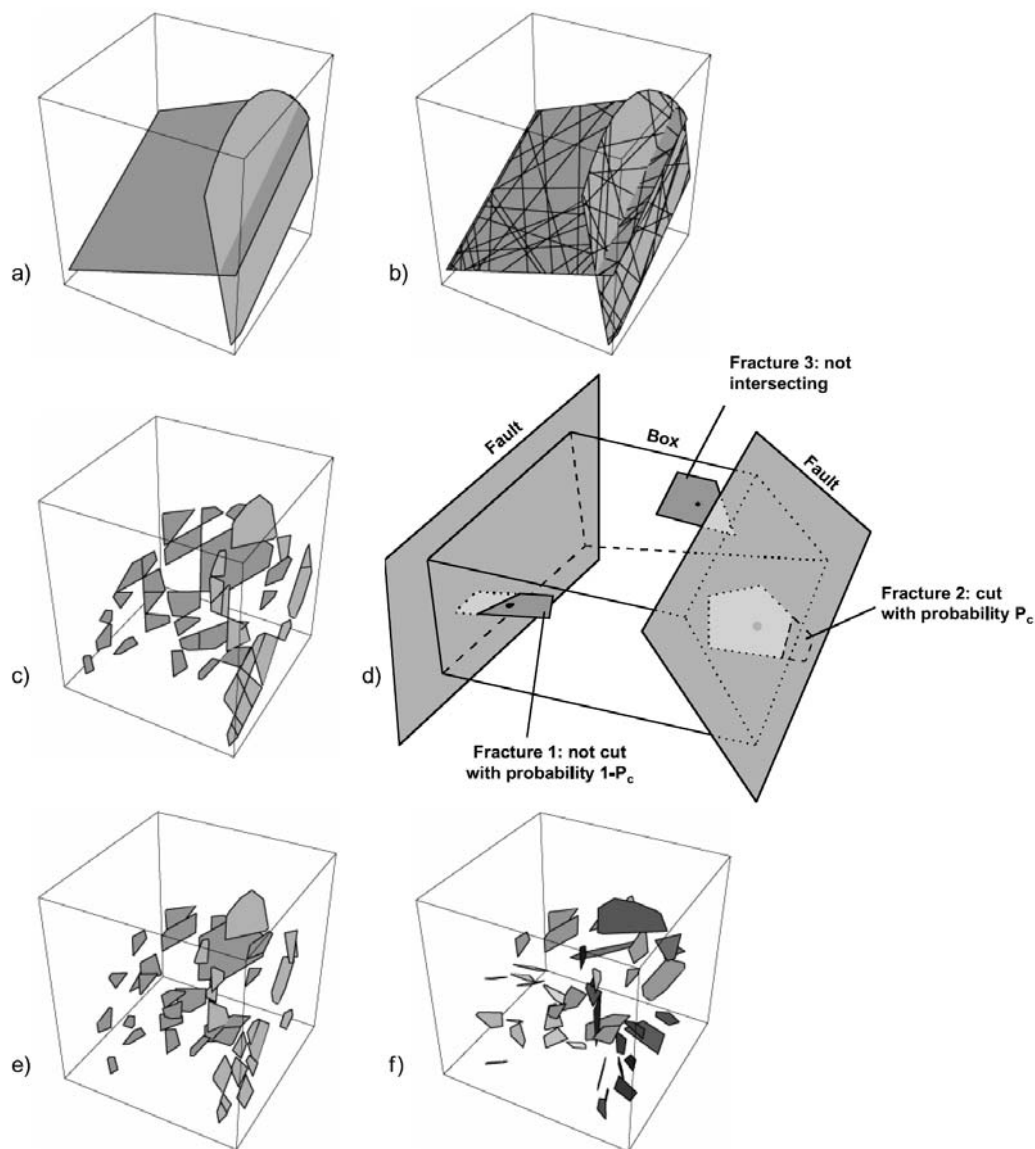


Figura 5.2: Fasi del processo stocastico per la generazione del modello geologico-stocastico (Mayer e Einstein, 2002). (a) Fase 1: l'orientazione delle potenziali superfici di fratturazione è definita attraverso un processo poissoniano. (b) e (c) Fase 2: sulle superfici di frattura vengono individuate le porzioni costituite da roccia

intatta e da discontinuità. (d) Fase 3: assegnazione delle diverse zone di fratturazione al modello. (e), (f) Fase 4: i poligono possono essere traslati e/o ruotati.

5.1.5 Il modello Enhanced Baecher

Come già accennato in precedenza, il modello di Baecher (Baecher, Lanney and Einstein, 1977) è stato uno dei primi modelli proposti in letteratura per la generazione dei reticoli di fratture. In questo modello i centri delle fratture vengono collocati uniformemente nello spazio di generazione secondo un modello casuale (processo Poissoniano), le fratture vengono poi generate come dischi sferici di data orientazione e diametro. Nel modello Enhanced Baecher (Dershowitz et al, 1989) le fratture vengono ancora generate a partire dai loro centri distribuiti uniformemente nello spazio e vengono successivamente individuate le intersezioni tra le fratture generate, dando all'operatore la possibilità di troncare le fratture in corrispondenza dei contatti. Nel modello Enhanced Baecher sono stati migliorati parametri di forma delle fratture che vengono generate come poligoni aventi tra 4 e 16 lati, regolari o allungati lungo una direzione definita dall'utente.

La probabilità di terminazione di una frattura è definita come la probabilità che una frattura termini al contatto con un'altra, qualora intersechi effettivamente un'altra frattura ($P[T/I]$). Le fratture vengono ancora generate a partire dal loro centro, posizionato uniformemente nello spazio, e vengono quindi calcolate le intersezioni con le fratture create precedentemente. La porzione della frattura al di là dell'intersezione viene quindi eliminata nel $P[T/I]$ dei casi, dove $P[T/I]$ è la probabilità di terminazione definita dall'utente.

5.1.6 Il modello Nearest Neighbor

Il modello Nearest Neighbor è un modello non stazionario in cui l'intensità P_{32} (area fratture/volume di roccia) di fratturazione decresce esponenzialmente con la distanza dalle fratture principali, definite dall'operatore. L'intensità di fratturazione P_{32} in un punto x è definita dalla legge esponenziale negativa:

$$P_{32}(x) = Ce^{-bd_{x,f}}$$

Dove C e b sono costanti e $d_{x,f}$ è la distanza tra il punto x e la frattura principale più vicina.

5.1.7 Il modello frattale di Levy-Lee

Numerosi studi hanno dimostrato come la distribuzione spaziale delle fratture costituenti il reticolo abbia in molti casi caratteristiche frattali (ad esempio: La Pointe et al, 1993; Piggott, 1997; Berkovitz et al, 1997 e 2001). La geometria frattale postula la definizione di una dimensione caratteristica, detta dimensione frattale, come base fondamentale per la realizzazione del modello stesso. Se, in un diagramma bi-logaritmico, esiste una relazione lineare tra la numerosità del campione e la dimensione del supporto di campionamento, la rete di fratture può definirsi un frattale autosomigliante, la cui dimensione frattale è esattamente il valore della pendenza della retta nel piano bi-logaritmico. Una struttura frattale può essere “auto simile” (topologicamente identica a scale diverse) o “auto affine” (topologicamente simile ma anisotropicamente distorta a scale differenti). Un reticolo frattale può essere generato in tre modalità differenti:

- Utilizzando un unico schema di generazione che produce un reticolo di fratturazione a una certa scala, e quindi sovrapponendo reticoli generati con lo stesso schema ma a scale differenti (introducendo una distorsione auto affine se necessario) generando un reticolo frattale.
- Generando le fratture secondo un modello matematico in grado di produrre un reticolo frattale.
- Generando stocasticamente il reticolo secondo un modello non frattale, e verificando se il modello generato mostra caratteristiche frattali.

Il modello frattale di Levy-Lee utilizza il secondo dei tre metodi e si basa sull’algoritmo matematico Levy-Flight (Mandelbrot 1985) che è essenzialmente un processo casuale in cui la lunghezza L di ogni passo di generazione è espressa dalla funzione di probabilità:

$$P_{L_s}[L > L_s] = L_s^{-D}$$

Dove D è la dimensione di massa frattale per il raggruppamento locale dei centri delle fratture generate e L_s è la distanza tra una frattura e la successiva nello step di generazione precedente. Per $D=0$, la distribuzione delle lunghezze dei passi è uniforme, ossia non si osserva alcun raggruppamento (eterogeneità) nel reticolo. Per valori di D elevati, la probabilità di avere passi

di elevata dimensione è molto bassa, e di conseguenza le fratture vengono create a poca distanza le une dalle altre e risultano raggruppate in cluster molto fitti al loro interno. L'algoritmo Levy-Flight era inizialmente stato sviluppato come un processo unidimensionale di generazione di punti lungo una linea. L'algoritmo è stato quindi esteso al caso bi e tri-dimensionale (generazione di tracce su un piano e di fratture in un volume) in FracMan.

Il modello di generazione richiede la derivazione della dimensione frattale D da introdurre nel processo di simulazione tridimensionale dei centri delle fratture. Il parametro può essere derivato a partire dalla distribuzione delle tracce delle fratture rilevate in affioramento (tracemap). Dershowitz et al. (1989) hanno proposto un metodo per il calcolo della dimensione frattale tridimensionale a partire dalla dimensione frattale bidimensionale calcolata per una distribuzione di punti su un piano (centri delle fratture su un piano d'affioramento). Il metodo suggerisce che il calcolo della dimensione frattale da introdurre in un algoritmo di generazione tridimensionale possa essere effettuato incrementando di un'unità la dimensione frattale definita per il caso bidimensionale.

Qual'ora il reticolo da simulare abbia caratteristiche auto simili, il calcolo della dimensione frattale può essere effettuato utilizzando il metodo semplificato del "box dimension" invece del più complesso "mass dimension". Tale metodo non può però essere utilizzato per reticoli auto affini, che presentano cioè un certo grado di distorsione al variare della scala d'analisi. In tal caso è più appropriato utilizzare un metodo d'analisi basato sul calcolo della "mass dimension". Tale metodo si basa sulla selezione di un punto in posizione centrale di un raggruppamento di fratture intorno al quale vengono costruiti una serie di cerchi concentrici con un determinato passo di crescita del raggio, definito dall'operatore. I raggi massimo e minimo definiscono l'estensione dell'area d'analisi e devono essere scelti in modo che la regione d'analisi non si estenda oltre la zona ove sono presenti le fratture. La dimensione frattale di massa viene quindi definita dalla pendenza della linea che interpola il numero di centri delle fratture contenute nell'area di un cerchio in funzione del raggio del cerchio, plottando entrambi i parametri su un grafico bi-logaritmico. I centri delle fratture vengono posizionati nel centro dei segmenti che rappresentano le tracce delle fratture sul piano di esposizione. La bontà dell'interpolazione viene quindi valutata sulla base del coefficiente di correlazione della regressione lineare in campo bi-logaritmico e testata con test di adattamento chi quadro.

5.2 Caratteristiche di una frattura singola

Una volta scelto il modello di generazione stocastica che meglio si presta alla generazione del reticolo oggetto di studio è necessario definire le caratteristiche geometriche e meccaniche delle fratture che formeranno il reticolo da generare. Nei modelli matematici utilizzati per la simulazione dei reticoli di fratturazione le fratture sono schematizzate come poligoni planari piani che interrompono la continuità della matrice rocciosa; una frattura considerata singolarmente è geometricamente descritta da tre parametri:

- Il raggio equivalente definito da:

$$R_e = \sqrt{\frac{A}{\pi}}$$

dove: R_e rappresenta il raggio di una frattura circolare avente la stessa area A della frattura poligonale. Una frattura, assunta di forma circolare o ellittica, viene infatti approssimata da un poligono regolare costituito da un numero di lati definito dall'operatore. Ad una frattura poligonale viene quindi associata una quantità, definita raggio equivalente, che ne caratterizza la dimensione rapportandola ad una frattura di forma circolare (Dershowitz, 1993).

- L'orientazione spaziale della frattura, definita dalla direzione e dall'inclinazione della linea a maggior pendenza giacente sul piano della frattura. La direzione rispetto al Nord della proiezione di tale linea sul piano orizzontale definisce la direzione di immersione ($\theta = \text{dip direction}$) della frattura, mentre l'inclinazione della linea rispetto al piano orizzontale ne definisce l'inclinazione ($\varphi = \text{dip}$). L'orientazione di una frattura può essere espressa anche in termini di trend e plunge del suo polo, definito come il vettore ortogonale al piano della frattura. Per convenzione la direzione del polo è sempre quella che punta verso il basso (componente Z negativa).
- La posizione del centro delle discontinuità, specificata in coordinate cartesiane.

5.2.1 Distribuzioni di probabilità per i poli delle fratture.

La dispersione dei poli delle fratture appartenenti ad una determinata famiglia può essere valutata ricorrendo a metodologie di analisi statistica sferica appositamente sviluppate per i dati direzionali. Il codice di calcolo "FracMan" permette di studiare le distribuzioni dei dati sferici

analizzandone la bontà dell'adattamento ai sei tipi di distribuzioni di probabilità di seguito descritte.

Distribuzione costante

Tutti i piani delle fratture hanno la medesima orientazione (ϕ, θ), non vi è quindi alcuna dispersione dei valori che risultano tutti coincidenti col valore di giacitura media della famiglia.

Distribuzione uniforme

Questo tipo di distribuzione implica che i poli non abbiano orientazione preferenziale; le coordinate polari variano quindi all'interno dell'intervallo $0 \leq \phi \leq \pi/2$ e $0 \leq \theta \leq 2\pi$. La distribuzione uniforme è descritta dalla funzione densità di probabilità:

$$f(\phi, \theta) = \frac{1}{2\pi} \sin \phi \cdot d\phi d\theta$$

dove: $1/2\pi$ è una costante di normalizzazione dell'area.

In Figura 5.3 (a) è riportata la densità di probabilità della distribuzione; in (b) un esempio di stereogramma di poli distribuiti in accordo con questa distribuzione.



Figura 5.3: Distribuzione uniforme: a) rappresentazione tridimensionale della densità di probabilità; b) poli delle fratture in proiezione stereografica (Dershowitz W.S., Lee G., Geier J., Foxford T., LaPointe P., Thomas A.; 1998)

Distribuzione monovariata di Fisher

Nella distribuzione di monovariata di Fisher i poli risultano simmetricamente dispersi intorno al valore medio. La funzione densità di probabilità per questo tipo di distribuzione è espressa dall'equazione (Mardia, 1972):

$$f(\phi, \theta) = \frac{k \cdot \text{sen } \phi \cdot e^{k \cdot \cos \theta}}{2\pi \cdot (e^k - 1)}; 0 \leq \theta \leq 2\pi$$

dove k è il parametro che definisce la dispersione della distribuzione intorno al valore medio ed è variabile tra 0 e $+\infty$, risultando in genere compreso tra 5 e 50 . All'aumentare di k la distribuzione risulta maggiormente concentrata attorno al valore medio, mentre per una distribuzione uniforme risulta $k=0$. Il parametro k può essere stimato dall'espressione:

$$k = \frac{N_F}{N_F - |R|}$$

Dove $|R|$ è il modulo del vettore somma dei versori che definiscono l'orientazione dei poli e N_F è il numero di fratture. Tale approssimazione risulta valida solamente per $K > 5$.

In Figura 5.4 è riportata la forma della distribuzione; è evidente dalle immagini come il grado di addensamento dei poli intorno alla direzione media rappresentativa dipenda dal valore del parametro k .

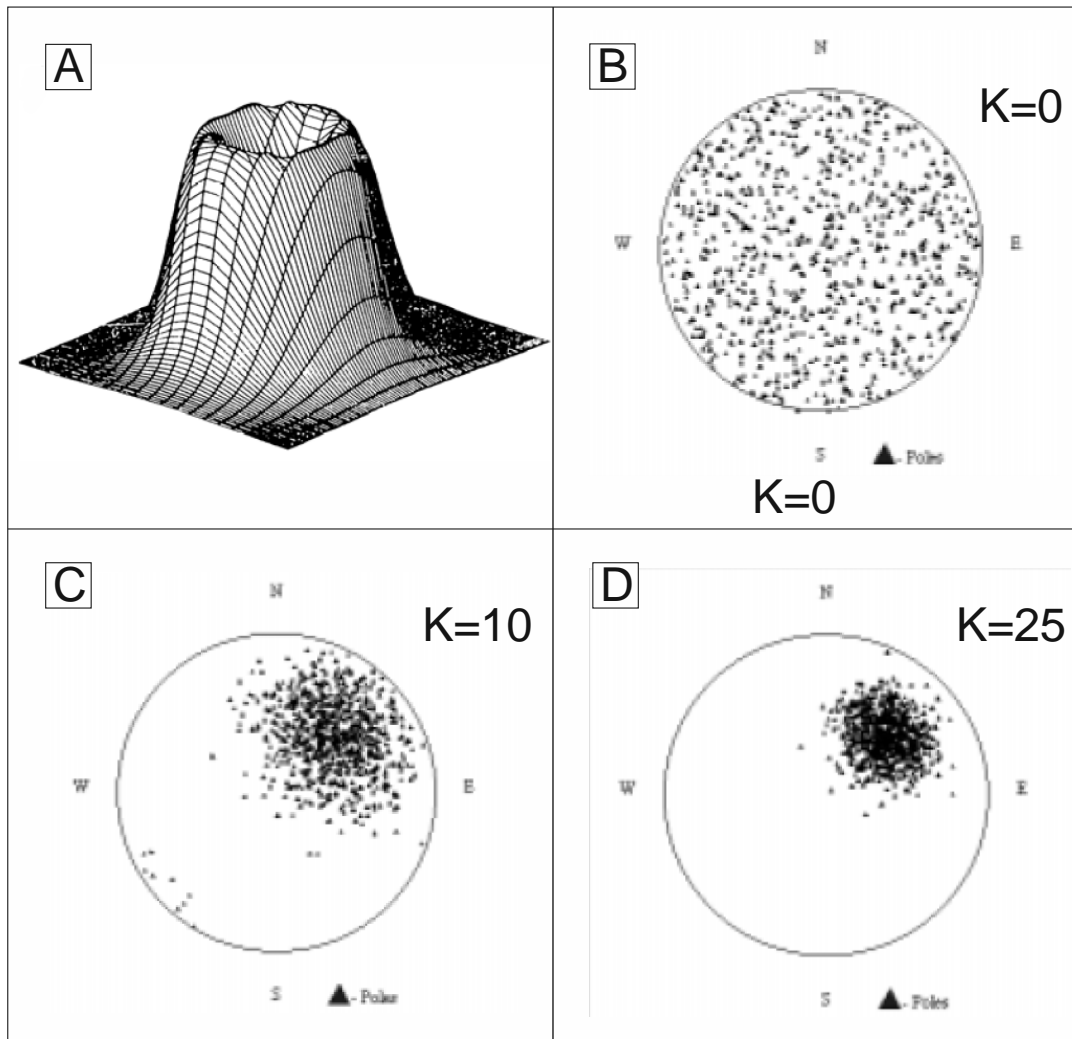


Figura 5.4: Distribuzione di Fisher monovariata: A) rappresentazione tridimensionale della densità di probabilità; B-C-D) poli delle fratture in proiezione stereografica per diversi valori del parametro k . (Dershowitz W.S., Lee G., Geier J., Foxford T., LaPointe P., Thomas A.; 1998)

FracMan permette di definire la dispersione dei dati rispetto alla media sia in modo globale, valido per tutto lo spazio di generazione, sia a livello locale, utilizzando la distribuzione denominata “Bootstrap”. In questo secondo caso è necessario inserire il coefficiente di dispersione della distribuzione (k) da applicare nell’intorno di ogni giacitura rilevata sul terreno e utilizzata per il condizionamento del modello di generazione. La generazione avviene quindi applicando una determinata dispersione intorno al valore della giacitura più vicina disponibile.

Distribuzione bivariata di Fisher

La distribuzione bivariata di Fisher è un’estensione a simmetria bi assialmente simmetrica della distribuzione monovariata e differisce da quest’ultima in quanto la dispersione varia con θ ; la funzione densità di probabilità si esprime attraverso la formula:

$$f(\phi, \theta) = C^{-1} \sin \phi \cdot e^{[(k_1 \sin^2 \theta + k_2 \cos^2 \theta) \cos \phi]}, \longrightarrow 0 \leq \phi \leq \frac{\pi}{2} \leq \theta \leq 2\pi$$

Con C costante di normalizzazione:
$$C = \int_0^{2\pi} \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin \theta \cdot e^{[(k_1 \sin^2 \theta + k_2 \cos^2 \theta) \cos \phi]} d\phi d\theta$$

dove k_1 e k_2 sono i coefficienti di dispersione lungo gli assi principali maggiore e minore.

Qualora i coefficienti k_1 e k_2 coincidano, la distribuzione si ridurrebbe ad una Fisher univariata unimodale; se $k_1 > k_2$ la distribuzione è maggiormente concentrata attorno alle direzioni $\theta = 0^\circ$ e $\theta = 180^\circ$, e più dispersa attorno alle direzioni $\theta = 90^\circ$ e $\theta = 270^\circ$ (Figura 5.5).

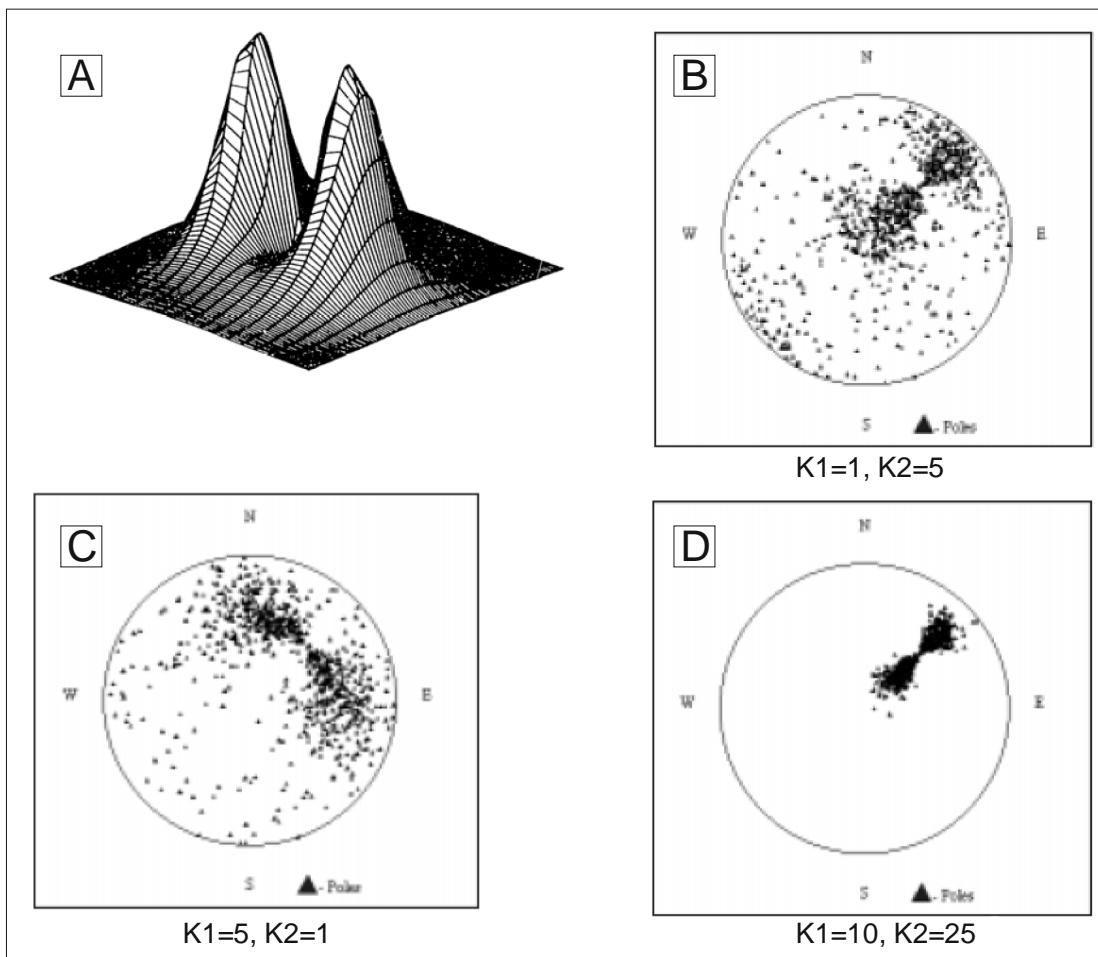


Figura 5.5: Distribuzione di Fisher bivariata: A) rappresentazione tridimensionale della densità di probabilità; B-C-D) poli delle fratture in proiezione stereografica per diversi valori dei parametri K1 e K2 (Dershowitz W.S., et al.; 1998)

Distribuzione bivariata normale

La distribuzione bivariata normale è definita dalla funzione di densità di probabilità riportata di seguito:

$$f(\phi, \theta) = \frac{1}{2\pi \cdot \phi_\sigma \cdot \theta_\sigma \cdot \sqrt{1 - \rho^2}} \cdot e^{\left\{ -\frac{1}{2(1-\rho^2)} \left[\left(\frac{\phi - \bar{\phi}}{\phi_\sigma} \right)^2 - 2\rho \cdot \frac{(\phi - \bar{\phi})(\theta - \bar{\theta})}{\theta_\sigma \cdot \phi_\sigma} + \left(\frac{\theta - \bar{\theta}}{\theta_\sigma} \right)^2 \right] \right\}}$$

dove: ϕ_σ e θ_σ sono le deviazioni standard della direzione di immersione ed inclinazione e ρ è il coefficiente di correlazione

Al diminuire di ϕ_σ e θ_σ si produce una distribuzione maggiormente concentrata attorno all'orientazione media. La definizione di una distribuzione bivariata normale richiede che siano specificati anche i valori della varianza per il trend ed il plunge, ed il loro coefficiente di correlazione, che può essere pari ad 1 per una perfetta correlazione, oppure 0 in assenza di correlazione. La Figura 5.6 mostrano visivamente le caratteristiche della distribuzione.

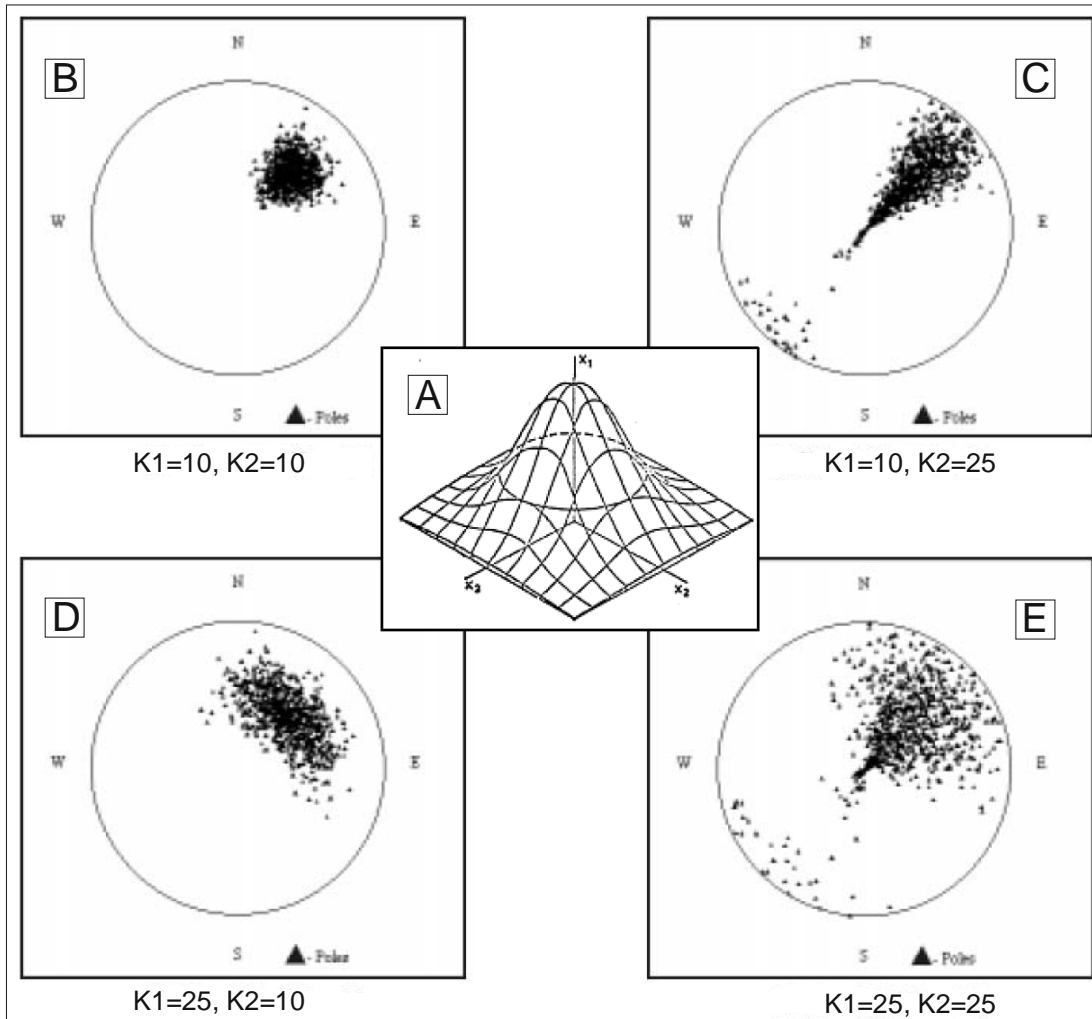


Figura 5.6: Distribuzione bivariata normale: A) rappresentazione tridimensionale della densità di probabilità; B-C-D-E) poli delle fratture in proiezione stereografica per diversi valori dei parametri K_1 e K_2 (Dershowitz W.S., et al.; 1998)

Distribuzione bivariata Bingham

La distribuzione bivariata Bingham è definita dalla funzione densità di probabilità seguente:

$$f(\phi, \theta) = C^{-1} \sin \phi \cdot e^{[(k_1 \cos^2 \theta + k_2 \sin^2 \theta) \sin^2 \phi]}, \longrightarrow 0 \leq \phi \leq \pi; \quad 0 \leq \theta \leq 2\pi$$

Dove C è la costante di normalizzazione:
$$C = \int_0^{2\pi} \int_0^\pi \sin \theta \cdot e^{[(k_1 \cos^2 \theta + k_2 \sin^2 \theta) \sin^2 \phi]} d\phi d\theta$$

e k_1 e k_2 sono i parametri di distribuzione. In Figura 5.7 vengono mostrate le caratteristiche della distribuzione.

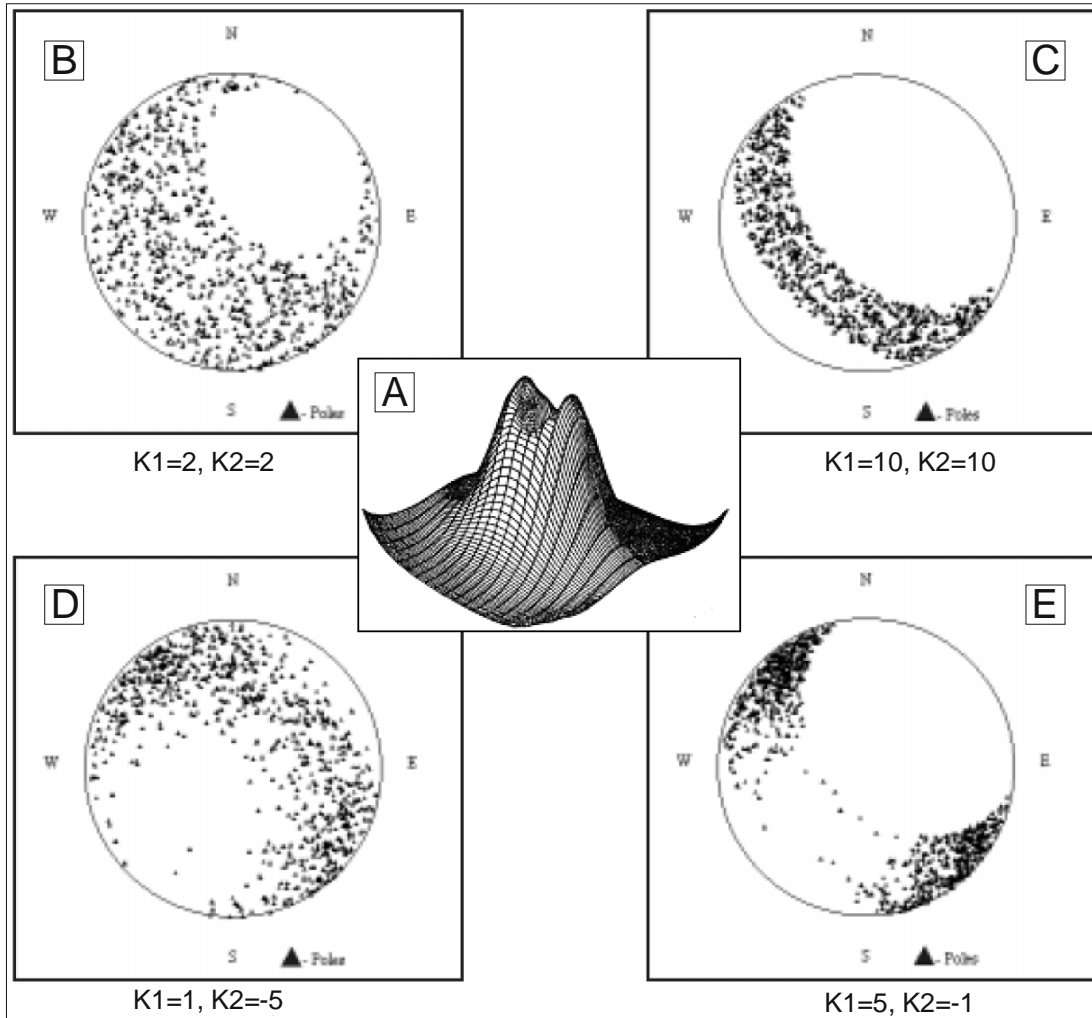


Figura 5.7: Distribuzione bivariata Bingham: rappresentazione tridimensionale della densità di probabilità e stereogrammi delle orientazioni al variare di K_1 e K_2

Qualora $k_1 = k_2$ i poli sono posizionati lungo un arco di circonferenza più o meno ampio all'aumentare del valore di k e con i settori presentanti le maggiori concentrazioni attorno al piano equatoriale $\varphi' = 90^\circ$; quando $k_1 > k_2$ si ha una distribuzione bimodale con le regioni a più alta concentrazione in prossimità dei vettori $\varphi' = 90^\circ, \theta' = 0^\circ$ e $\varphi' = 90^\circ, \theta' = 180^\circ$. Se $k_1 < k_2$ la distribuzione è bimodale con le aree a maggior concentrazione attorno a $\varphi = 90^\circ, \theta' = 90^\circ$ e $\varphi' = 90^\circ, \theta' = 270^\circ$; la distribuzione produce una popolazione con direzioni in maggioranza normali rispetto alla direzione principale specificata (ϕ, θ) .

5.3 Generazione del reticolo di fratturazione

Lo schema procedurale introdotto all'inizio del capitolo è stato applicato al caso studio costituito da un ammasso di quarzo praticamente puro interessato da un fitto reticolo di fratture. Nei capitoli seguenti vengono specificate le fasi operative che hanno condotto alla generazione del modello.

5.3.1 Definizione del dominio di generazione.

Il dominio di generazione è stato definito in funzione dell'estensione dell'ammasso di quarzo. I limiti del corpo sono noti con un buon livello di precisione e seguono in maniera approssimata il percorso delle gallerie di tracciamento realizzate per lo sfruttamento del minerale. Il dominio di generazione è stato quindi ipostato in corrispondenza di un parallelepipedo centrato nel punto di coordinate UTM 1601740, 5133250, 1530, con dimensioni pari a 270m, 110m e 150m nelle direzioni x, y e z rispettivamente (Figura 5.8)

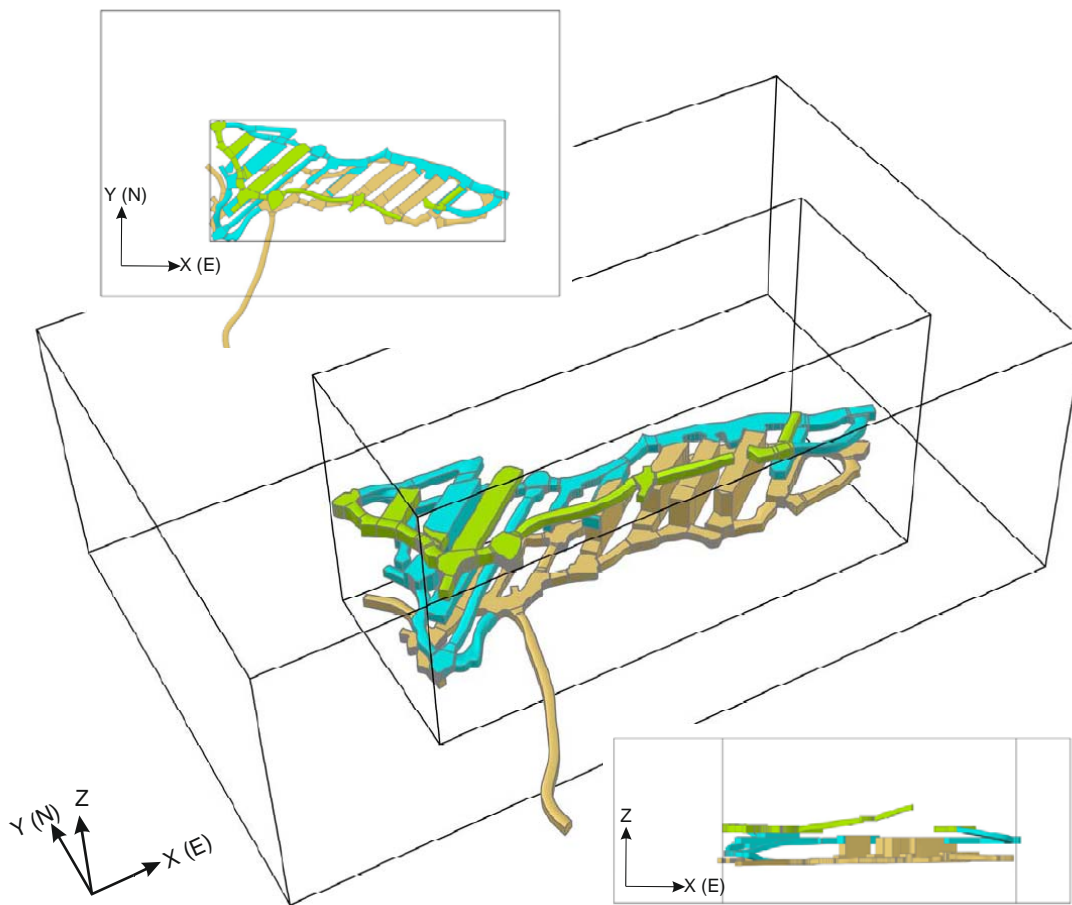


Figura 5.8: Modello 3D dell'area di cava. Nei riquadri in alto e in basso vista dall'alto e da Sud. Il parallelepipedo interno rappresenta l'estensione dell'ammasso di quarzo, quello esterno la zona di estensione del modello ampliata ai fine della modellazione idrogeologica.

Il dominio di generazione corrispondente all'estensione dell'ammasso di quarzo è costituito dal parallelepipedo interno visibile in Figura 5.8. In figura è mostrata anche la rete di tunnel scavati nell'ammasso per l'estrazione del minerale. Poiché uno degli scopi del presente lavoro riguarda la l'analisi del comportamento idrogeologico dell'ammasso, finalizzata alla simulazione delle venute d'acqua osservate in galleria, i limiti del dominio di generazione sono stati ampliati in modo da garantire un'adeguata distanza dei limiti del modello dalla zona di interesse ai fini della modellazione idrogeologica, costituita dalla porzione dell'ammasso intersecata dalle gallerie di coltivazione. I limiti del dominio di generazione del reticolo sono di conseguenza stati fissati in corrispondenza del parallelepipedo esterno visualizzato in Figura 5.8, avente lati rispettivamente pari a 420m, 260m e 150m nelle tre direzioni x , y e z . La porzione superiore del modello è stata successivamente eliminata troncando le fratture simulate in corrispondenza della superficie topografica.

5.3.2 Scelta del modello geometrico di creazione delle fratture.

Il software FracMan permette di utilizzare tre modelli geometrici per la generazione delle fratture: il modello Enhanced Baecher, il modello Levy-Lee e il modello Nearest Neighbor. La scelta del modello di generazione è stata fatta in funzione delle caratteristiche osservate in sito sul reticolo di fratture. I risultati dell'analisi statistica e geostatistica dei dati rilevati mostrano un pattarn di fratturazione nel complesso omogeneo, pur essendo stato osservato un importante incremento dello stato di fratturazione in vicinanza delle principali strutture fragili che intersecano l'ammasso. Si è quindi scelto di utilizzare il modello Enhanced Baecher per la generazione del reticolo di fratturazione principale, sovrapponendo successivamente a questo il set di faglie rilevate in cava e inserite nel modello come elementi deterministicamente definiti sulla base di estrapolazioni geometriche delle giaciture e delle proprietà medie rilevate in corrispondenza delle loro intersezioni con le gallerie di coltivazione del giacimento. Poiché il reticolo di fratture si compone nel caso specifico di quattro set indipendenti di fratture, ogni set è stato generato in maniera indipendente, sovrapponendo poi le fratture generate all'interno dello stesso volume per ottenere il reticolo di fratture che intersecano l'ammasso.

Nel modello Enhanced Baecher (Dershowitz et al, 1989) le fratture vengono generate a partire dai loro centri distribuiti uniformemente nello spazio, e vengono successivamente individuate le intersezioni tra le fratture generate, dando all'operatore la possibilità di troncane le fratture in

corrispondenza dei contatti. Le fratture vengono generate come poligoni aventi tra 4 e 16 lati, regolari o allungati lungo una direzione definita dall'utente.

Le fratture vengono quindi generate a partire dal loro centro, posizionato uniformemente nello spazio, e vengono successivamente calcolate le intersezioni con le fratture create precedentemente. La porzione della frattura al di là dell'intersezione viene quindi eliminata in una percentuale di casi corrispondente alla probabilità di terminazione ($P[T/I]$) definita dall'operatore.

Le zone ad elevata intensità di fratturazione, individuate in vicinanza delle strutture tettoniche maggiori possono essere introdotte nei modelli seguendo due tipi di approcci alternativi. Il primo prevede la generazione di un set di discontinuità secondarie da sommare al set generato in precedenza; in questo caso il set secondario deve essere simulato utilizzando un modello geometrico in grado di simulare un'intensità di fratturazione che decresca con la distanza dalle zone di faglia, condizione adeguatamente riprodotta dal modello Nearest Neighbor. Il secondo metodo, utilizzato in questo lavoro, può essere considerato un artificio che permette di tener conto del maggior stato di fratturazione osservato in una ristretta fascia adiacente alle zone di faglia incrementando i valori di apertura e conducibilità attribuiti alle zone di faglia.

5.3.3 Individuazione e caratterizzazione delle famiglie di discontinuità.

I risultati dell'analisi statistica dei dati d'orientazione collezionati durante la fase di indagine hanno portato all'individuazione di cinque set di discontinuità, di cui le due famiglie K2 e K3, molto vicine nell'orientazione media, presentano distribuzioni dei rispettivi poli in gran parte sovrapposti e sono state raggruppate nella fase di modellazione in un'unica famiglia denominata k2.

Per ogni famiglia sono quindi stati ricavati i parametri statistici delle distribuzioni dei poli identificativi dell'orientazione delle fratture utilizzando apposite metodologie di analisi statistica sferica. Poiché il modello realizzato è focalizzato sulla ricostruzione del pattern di fratturazione relativo alle fratture più persistenti, l'analisi statistica dell'orientazione dei poli delle famiglie è stata effettuata considerando i due set Fratture Continue (FC) e Parametri Discontinuità Principali (PDP). In figura 5.9 sono riportati gli stereogrammi dei due set.

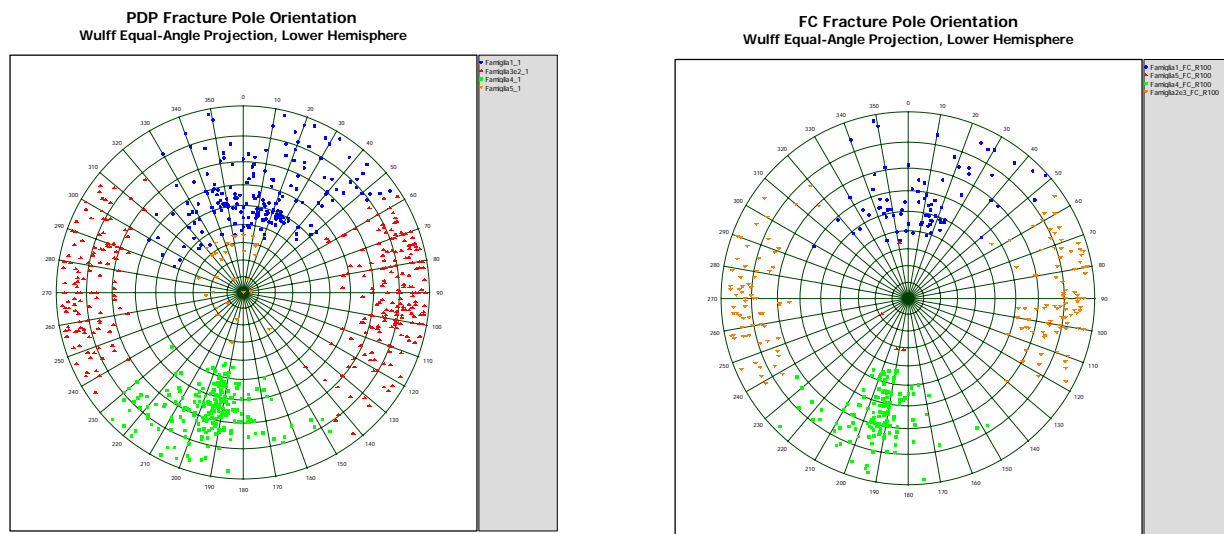


Figura 5.9: Proiezione stereografica dei poli delle fratture appartenenti ai due set denominati “Parametri discontinuità principali”, a sinistra e “fratture continue” a destra.

Il set “Parametri Discontinuità Principali, (PDP)” è stato costruito considerando tutte le fratture principali campionate e descritte durante la fase di acquisizione mentre il set “Fratture Continue (FC)” considera solamente le fratture a più elevata persistenza, individuate interpolando osservazioni effettuate in luoghi diversi ma riconosciute sulla base di considerazioni geometriche come appartenenti alla stessa frattura.

L’analisi statistica delle orientazioni, effettuata utilizzando metodologie di calcolo appositamente sviluppate per i dati sferici (vedi Paragrafo 5.2.1) ha dato i risultati sintetizzati in Tabella 5.1. Dalla tabella si nota come i dati si adattino di norma alla distribuzione di Fisher con K piuttosto bassi, ad indicare una dispersione piuttosto elevata dei dati intorno al polo medio.

Per il Set $K1$ la distribuzione Eliptical Fisher si accorda meglio ai dati ed è stata testata nei modelli di simulazione in alternativa alla Fisher. Un tale tipo di distribuzione indica la tendenza dei valori a distribuirsi simmetricamente intorno a due poli medi. La presenza di un’eventuale struttura plicativa sembra comunque da escludere non essendoci un trend spaziale nei dati. Ne consegue che la Famiglia 1 possa essere composta da due sottofamiglie leggermente divergenti nell’orientazione media, attribuibili a un campo di sforzi la cui orientazione può aver subito piccole variazioni nel tempo.

La Famiglia $K4$ appare particolarmente dispersa e non è ben rappresentata da nessuna delle leggi di distribuzione testate. Non essendoci nessuna distribuzione che si adatti in maniera convincente alla distribuzione dei dati sperimentali si è scelto, per ragioni di semplicità, di utilizzare la distribuzione di Fisher. I parametri descrittivi delle distribuzioni introdotte nei modelli sono riassunti in Tabella 5.1.

ISIS Statistics	Fisher d.	Bivariate Normal d.	Bivariate Bingham d.	Elliptical Fisher d.
Set #1				
Numero Fratture	81	81	81	81
Polo Medio (Dip dir/Dip)	007/32	006/29	007/33	007/32
Asse Maggiore	187/58	186/60	147/50	263/21
Asse Minore	277/00	276/00	263/21	147/50
K1	11.6	22.4	-12.6	12.8
K2		14.3898	-5.1	1.8
K12		-0.3099		
Kolmogorov-Smirnov	0.0925934	0.0858025	0.082716	0.0504014
K_S Probability	72.44%	80.54%	83.93%	99.89%
Set #2				
Numero Fratture	169	169	169	169
Polo Medio (Dip dir/Dip)	090/03	090/03	090/03	090/03
Asse Maggiore	270/87	270/ 87	338/83	180/ 06
Asse Minore	000/00	180/00	180/06	338/03
K1	15.7	17.3	-13.6	16.7
K2		11.5	-7	1.5
K12		0.07		
Kolmogorov-Smirnov	0.0545025	0.0382972	0.0500164	0.0624391
K_S Probability	95.80%	99.95%	98.13%	88.60%
Set #4				
Numero Fratture	148	148	148	148
Polo Medio (Dip dir/Dip)	194/24	194/24	194/25	194/25
Asse Maggiore	014/65	014/66	310/43	084/37
Asse Minore	284/ 00	104/00	084/37	310/43
K1	28.6	11.7	-18.4	29
K2		10.7	-13.6	1.2
K12		-0.16		
Kolmogorov-Smirnov	0.130084	0.126276	0.134159	0.120872
K_S Probability	12.80%	14.99%	10.75%	18.62%
Set #5				
Numero Fratture	4	4	4	4
Polo Medio (Dip dir/Dip)	220/ 76	242.250, 60.250	212.819, 73.043	212.819, 73.043
Asse Maggiore	040/13	062/30	089/10	357/14
Asse Minore	310/00	332/00	357/1	089/10
K1	9.1	66.2	-24	9.1
K2		5.8	-2.9	1
K12		-0.2		
Kolmogorov-Smirnov	0.290626	0.355556	0.319444	0.308061
K_S Probability	89.57%	70.57%	81.94%	85.16%

Tabella 5.1: Risultati della statistica sferica applicata alle distribuzioni dei poli delle famiglie di fratture. Le distribuzioni che meglio approssimano i dati rilevati sono evidenziate in grigio.

5.3.4 Definizione dell'intensità di fratturazione

La procedura di simulazione dei reticoli di discontinuità richiede la definizione della densità di fratturazione da attribuire ai modelli simulati. Il parametro è stato valutato a partire dai dati misurati in situ, importati in FracMan in forma di diversi dataset relativi a fratture caratterizzate da differenti gradi di persistenza. La procedura di importazione dei dati richiede l'attribuzione del raggio equivalente da assegnare alle fratture. Per le fratture caratterizzate da bassa persistenza il raggio è stato attribuito in funzione delle persistenze osservate durante il rilevamento di terreno. Il raggio equivalente delle fratture ad elevata persistenza non è invece stimabile dalla lunghezza delle tracce all'intersezione con le gallerie, poiché queste strutture di grandi dimensioni intersecano completamente i tunnel rendendo impossibile la valutazione della loro estensione. Il dataset "Fratture continue", costituito dagli elementi strutturali di dimensioni maggiori ricostruite sulla base dei dati raccolti durante il rilievo, è stato quindi importato in FracMan assumendo una forma esagonale equilatera con un raggio equivalente costante pari a 100 m. L'assunzione si giustifica con la notevole persistenza osservata sul terreno per queste strutture e sulla necessità di integrare i dati nei livelli non rilevati prolungando le fratture rilevate in posizioni vicine. L'assunzione sulla persistenza delle fratture continue è stata successivamente validata confrontando le spaziature misurate in situ per le famiglie con le spaziature calcolate intersecando le fratture continue importate con raggio 100m con i tracciati delle gallerie. Il risultato ha mostrato una buona coerenza dei valori medi della spaziatura e ha permesso di confermare la bontà delle assunzioni fatte.

Durante la fase di acquisizione dati, in corrispondenza di ogni struttura principale era stata misurata la spaziatura media tra le fratture adiacenti di caratteristiche simili. I dati raccolti sono stati analizzati statisticamente e in Figura 5.10 sono mostrati gli istogrammi delle spaziature principali per ogni famiglia.

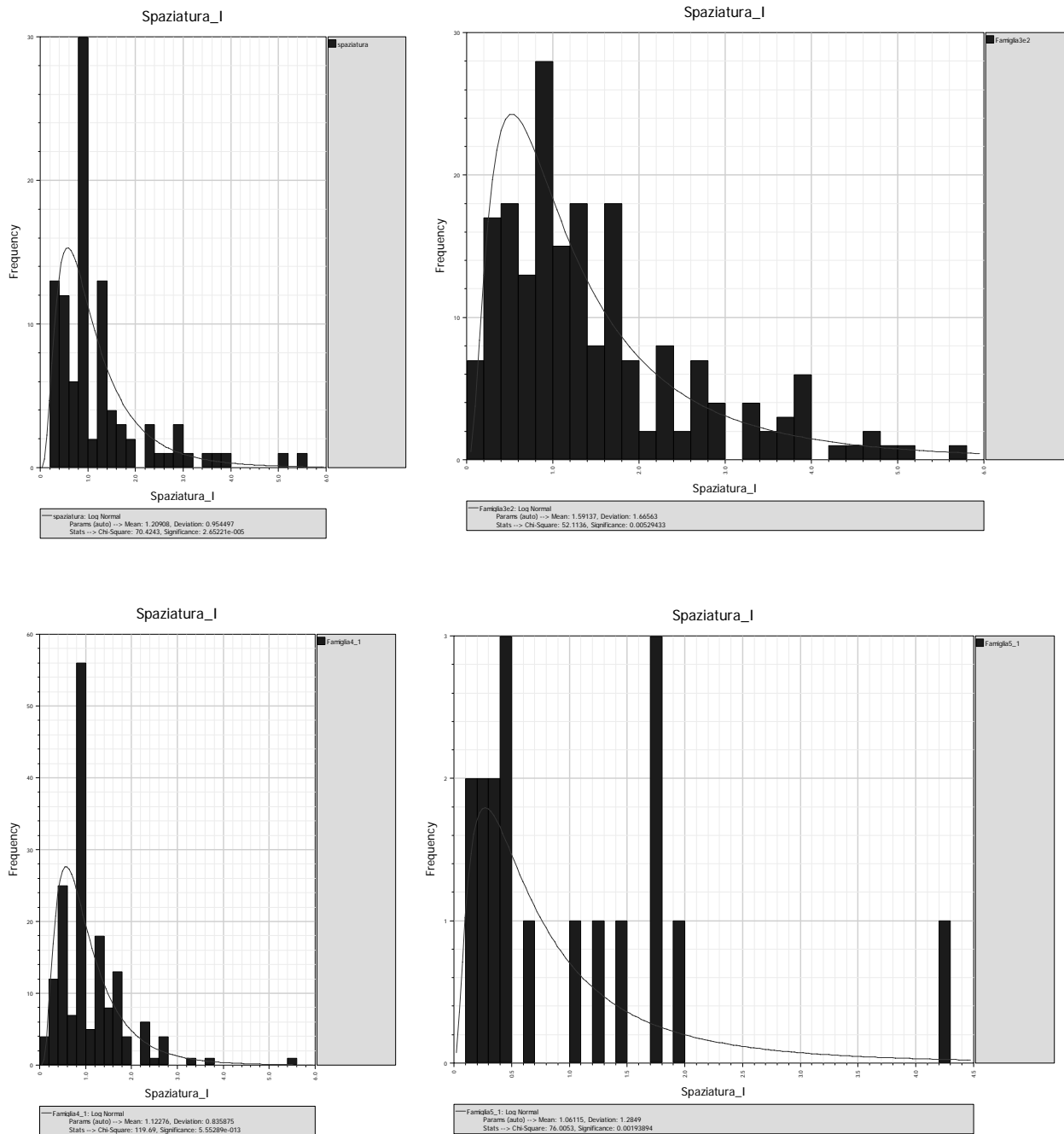


Figura 5.10: Istogrammi delle spazature misurate per le fratture principali, suddivise nelle quattro famiglie.

I valori di spazatura si distribuiscono in genere secondo una distribuzione Lognormale, caratterizzate da medie comprese tra 1 e 2 m.

Identificazione delle zone con intensità di fratturazione costante

L'intensità di fratturazione che controlla il numero di fratture generate può essere introdotta nei modelli sia in maniera omogenea sia definendo degli intervalli spaziali caratterizzati da una

specifica intensità di fratturazione. La procedura di generazione delle fratture considera in questo caso l'intensità di fratturazione definita per ogni intervallo e genera le fratture finché l'intensità di fratturazione simulata in ogni intervallo risulta pari o superiore al valore imposto. A scelta dell'utente la generazione delle fratture può essere interrotta al raggiungimento dell'intensità di fratturazione imposta per uno, tutti o in media per gli intervalli definiti. Quest'ultima opzione è stata utilizzata nella realizzazione dei modelli.

Gli intervalli di definizione dell'intensità di fratturazione sono stati identificati lungo le gallerie di coltivazione del giacimento, ove sono stati acquisiti i dati strutturali. Le gallerie sono state digitalizzate e inserite nel modello semplificandone la geometria. Sulla base della posizione delle gallerie sono quindi stati simulati dei sondaggi che ne seguono, in modo semplificato, l'andamento. Ai sondaggi è pertanto stato assegnato un raggio equivalente a quello medio dei tunnel (2.5m). L'introduzione di sondaggi fittizi è richiesta dal software per l'implementazione della analisi sull'intensità di fratturazione. Sono quindi stati inseriti 14 sondaggi simulati, corrispondenti ai tratti di gallerie distribuiti sui tre livelli di coltivazione 1490, 1505 e 1518. I sondaggi sono quindi stati intersecati con i dataset delle fratture rilevate alla diversa scala ed è stata analizzata la variazione dell'intensità di fratturazione lungo le gallerie.

L'intensità lineare di fratturazione (P_{10} = numero di fratture/lunghezza linea di misura) è stata valutata lungo le gallerie di coltivazione con l'ausilio grafici di intensità di fratturazione cumulativa (CFI Plot). Il CFI Plot permette di rappresentare il numero e la percentuale di fratture in funzione della profondità lungo il sondaggio. Porzioni a pendenza costante individuano zone a intensità di fratturazione costante. Per la definizione degli intervalli di fratturazione sono stati considerati tutti i set di fratture rilevati, cercando di interpolare i dati con una retta che rappresentasse al meglio le tendenze medie di tutti i set. In Figura 5.12 sono riportati alcuni esempi in cui si possono individuare gli intervalli a fratturazione omogenea individuati dai tratti della retta interpolante (in nero). Si noti come i diversi set disponibili seguano andamenti simili e siano quindi interpretabili con una retta interpolante unica. Eventuali forti deviazioni dall'andamento medio (ad esempio il set fratture continue in Figura 5.12.A), sono imputabili ad un campionamento eccessivamente distanziato dei dati durante la fase di acquisizione e sono stati esclusi dall'analisi. Da notare comunque che anche in questo caso la pendenza della curva in funzione della profondità è coerente con la media delle altre curve.

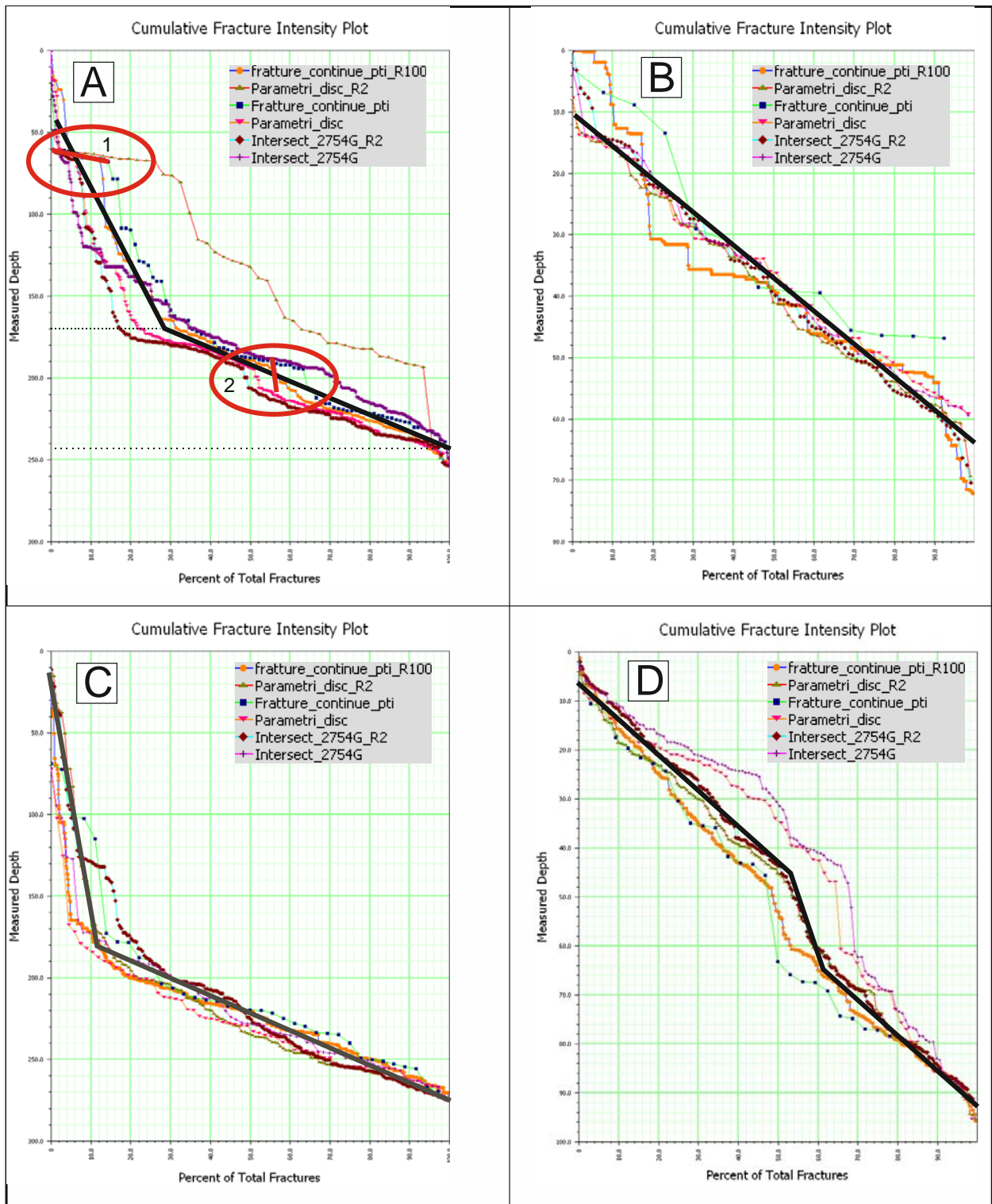


Figura 5.11: CFI plot, sondaggi S_1490_A1 (A); S_1490_A4 (B); S_1505_A1 (C); S_1505_A4 (B). Nei grafici è riportata in ascissa la percentuale delle fratture e in ordinata la profondità lungo il sondaggio. La densità di fratturazione è espressa dalla pendenza del grafico ed è maggiore per i tratti meno inclinati. Tratti a pendenza costante indicano una stessa densità di fratturazione, e sono stati interpolati dalla linea in nero. Gli estremi delle curve interpolanti definiscono i tratti a fratturazione omogenea: in A, ad esempio si riconoscono due intervalli principali, il primo tra 50 e 170 m, il secondo tra 170 e 250m. Si noti come all'interno di tratti definiti nell'insieme omogenei si individuano piccoli intervalli a diversa intensità di fratturazione: ad esempio in A sono evidenziati in rosso un tratto 1, a circa 70 metri dall'inizio del sondaggio che mostra un'intensità di

fratturazione molto maggiore della media e un tratto 2, tra 190 e 210 caratterizzato da bassa intensità di fratturazione, evidenziando una situazione specifica che, per esempio, in A è rappresentata da una fascia ad elevato disturbo tettonico adiacente ad una delle faglie principali. Le varie curve sono relative a diversi set di dati: si noti comunque la generale omogeneità nella pendenza delle curve, eventuale deviazioni eccessive dalla media sono attribuibili a set con un numero troppo limitato di dati che sono quindi stati esclusi dall'analisi.

Sulla base degli intervalli a pendenza omogenea individuati nei CFI Plot, i tratti di galleria rappresentati dai sondaggi simulati, sono quindi stati suddivisi in intervalli omogenei in cui è stata calcolata l'intensità di fratturazione. I risultati sono riportati in tabella 5.2

L'intensità di fratturazione nei diversi intervalli è stata successivamente utilizzata per il controllo del numero di fratture generate dal programma durante la fase di generazione stocastica dei set. Il numero di fratture generate è infatti determinato cercando il miglior accordo tra l'intensità di fratturazione dei set generati con l'intensità di fratturazione individuata negli intervalli omogenei in cui sono stati suddivisi i sondaggi.

ID Intervallo	Inizio m	Fine m	Lunghezza m	P10 K1	P10 K2	P10 K4	P10 K5	P10_TOT
S_1490_A1_Intervals_1	0	60	60	0.05	0.12	0.10	0.00	0.27
S_1490_A1_Intervals_2	60	67	7	0.14	1.29	0.00	0.00	1.43
S_1490_A1_Intervals_3	67	174	107	0.28	0.33	0.37	0.01	0.99
S_1490_A1_Intervals_4	174	194	20	0.40	2.15	0.20	0.00	2.75
S_1490_A1_Intervals_5	194	208	14	0.21	0.71	0.07	0.00	1.00
S_1490_A1_Intervals_6	208	242	34	0.21	1.53	0.26	0.00	2.00
S_1490_A2_Intervals_1	0	100	100	0.04	0.19	0.26	0.00	0.49
S_1490_A2_Intervals_2	100	130	30	0.00	0.17	0.17	0.00	0.33
S_1490_A2_Intervals_3	130	187	57	0.18	0.47	0.47	0.02	1.14
S_1490_A2_Intervals_4	187	207	20	0.45	1.90	0.45	0.00	2.80
S_1490_A2_Intervals_5	207	246	39	0.46	1.13	0.31	0.00	1.90
S_1490_A2_Intervals_6	146	257	111	0.32	1.11	0.41	0.01	1.84
S_1490_A2_Intervals_7	257	279	22	0.05	0.82	0.36	0.00	1.23
S_1490_A3_Intervals_1	0	6.2	6.2	1.30	1.30	0.65	0.00	3.25
S_1490_A3_Intervals_2	6.2	59.2	53	0.08	0.11	0.62	0.00	0.81
S_1490_A4_Intervals_1	10	62.9	52.9	0.23	0.28	0.66	0.00	1.17
S_1490_A5_Intervals_1	0	28.9	28.9	0.83	0.17	1.28	0.00	2.29
S_1490_A5_Intervals_2	28.9	46.7	17.8	0.45	0.11	1.74	0.06	2.35
S_1490_A5_Intervals_3	46.7	62.2	15.5	0.13	0.26	1.03	0.00	1.42
S_1490_A6_Intervals_1	0	15	15	0.33	1.00	0.67	0.00	2.00
S_1490_A6_Intervals_2	15	37	22	0.68	1.55	0.95	0.00	3.18
S_1490_A6_Intervals_3	37	55	18	0.56	1.00	1.28	0.00	2.83
S_1490_A6_Intervals_4	55	62.5	7.5	1.07	0.13	2.13	0.00	3.33
S_1505_A1_Intervals_1	0	173	173	0.04	0.21	0.08	0.01	0.35
S_1505_A1_Intervals_2	173	272.4	99.4	0.20	1.08	0.10	0.01	1.39
S_1505_A2_Intervals_1	1.8	11.4	9.6	0.21	0.00	1.35	0.00	1.56
S_1505_A2_Intervals_2	11.4	43.8	32.4	0.06	0.09	0.71	0.06	0.93
S_1505_A3_Intervals_1	4.4	35.7	31.3	0.19	0.67	0.10	0.00	0.96
S_1505_A3_Intervals_2	35.7	48	12.3	0.08	1.95	0.81	0.00	2.85
S_1505_A3_Intervals_3	48	112.8	64.8	0.54	1.02	1.19	0.03	2.78
S_1505_A3_Intervals_4	112.8	126.2	13.4	1.04	0.52	1.26	0.00	2.82
S_1505_A4_Intervals_1	6.3	45	38.7	0.39	1.37	1.14	0.03	2.92
S_1505_A4_Intervals_2	45	61	16	0.38	0.44	0.94	0.00	1.75
S_1505_A4_Intervals_3	61	92.3	31.3	0.99	1.21	1.12	0.03	3.35
S_1505_A5_Intervals_1	0	25	25	0.24	0.56	0.96	0.00	1.76
S_1505_A5_Intervals_2	25	36.5	11.5	0.61	1.74	1.30	0.00	3.65
S_1505_A5_Intervals_3	36.5	50.7	14.2	0.35	0.85	0.92	0.00	2.12
S_1505_A5_Intervals_4	50.7	52.9	2.2	0.44	1.78	1.33	0.00	3.56
S_1505_A5_Intervals_5	52.9	84.3	31.4	0.83	0.79	0.92	0.03	2.58
S_1518_A1_Intervals_1	84.3	201.9	117.6	0.37	0.92	0.57	0.02	1.87
S_1518_A2_Intervals_1	4.4	15.7	11.3	0.35	0.09	1.95	0.00	2.39
S_1518_A2_Intervals_2	15.7	30.8	15.1	0.07	0.13	0.07	0.13	0.40
S_1518_A3_Intervals_1	10.8	38.7	27.9	0.14	0.47	0.32	0.00	0.93
S_1518_A3_Intervals_2	38.7	60	21.3	0.28	1.55	1.03	0.00	2.86
S_1518_A3_Intervals_3	60	123	63	0.59	0.95	1.03	0.03	2.60

Tabella 5.2: In tabella sono riportate le intensità di fratturazione (P10) nei vari intervalli in cui sono stati suddivisi i sondaggi. Per ogni intervallo è riportato il P10 calcolato per ogni famiglia, relativo al set di dati “Fratture continue”.

5.3.5 Definizione della forma e stima della distribuzione delle dimensioni delle fratture.

La generazione di un reticolo di fratture richiede la conoscenza delle caratteristiche spaziali del reticolo, quali: la funzione di distribuzione della lunghezza delle tracce, l'indice di terminazione delle fratture e la distribuzione spaziale delle fratture. Tali informazioni sono state desunte dall'analisi delle tracce delle fratture in affioramento effettuata su un fronte di cava abbandonato, caratterizzato da notevole estensione e omogeneità d'esposizione.

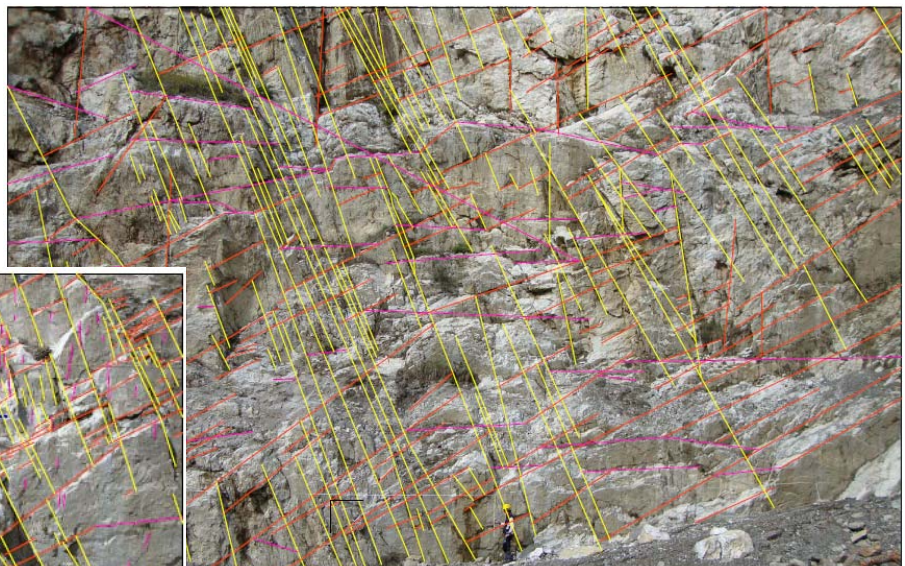
Sul fronte di cava è stato effettuato un RGM di dettaglio che ha permesso di caratterizzare i sistemi di discontinuità presenti. Sono state quindi scattate una serie di fotografie, con diverso livello di ingrandimento. Le immagini sono state rettificate e importate in AutoCAD, dove sono successivamente state digitalizzate le singole discontinuità individuabili alla scala della fotografia. Le tracemap digitalizzate dalle fotografie hanno permesso di analizzare le caratteristiche geometriche del pattern di fratturazione a diverse scale di osservazione, da quella macroscopica, sulla fotografia globale, che rappresenta un'area di circa 900 m², a quella di dettaglio, su una fotografia relativa ad una porzione dell'affioramento di circa 10 m².

In Figura 5.12 sono mostrate tre diverse fotografie dell'affioramento su cui sono state marcate le tracce delle fratture visibili alla scala d'osservazione. Le tracce delle discontinuità rilevate alle diverse scale sono state analizzate ricavandone la distribuzione delle lunghezze e la tipologia di raggruppamento, seguendo la metodologia descritta nel capitolo successivo.



A)

B)



C)

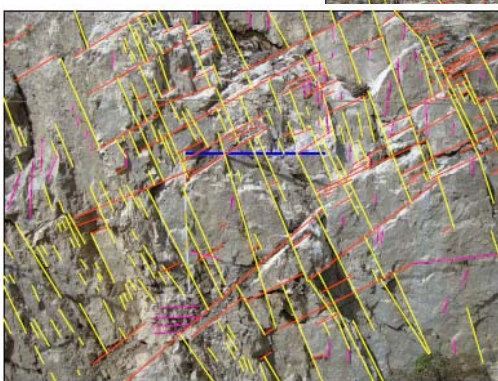


Figura 5.12: Fronte di cava su cui sono state digitalizzate le tracce delle fratture. Le tre immagini mostrano porzioni della stessa area a scala diversa. In A l'area rappresentata è circa 900 m^2 , circa 400 m^2 in B e 8 m^2 in C.

Determinazione della legge di distribuzione delle dimensioni delle fratture

Fracman permette di generare le fratture di un reticolo di discontinuità come poligoni planari creati secondo un processo casuale nello spazio.

Il raggio equivalente di una frattura poligonale è definito come:

$$R_e = \sqrt{\frac{A_f}{\pi}}$$

Dove A_f è l'area della frattura poligonale, posto uguale a quella della frattura circolare. Il rapporto di allungamento della frattura è definito come il rapporto fra l'asse maggiore e l'asse minore della frattura, idealizzata mediante un'ellissi.

La definizione della lunghezza delle tracce, necessaria per la definizione dei modelli discreti di fratturazione, può essere fatta utilizzando diverse metodologie:

- Correlando la numerosità delle fratture di una certa dimensione con la loro dimensione (Size/Number Scaling Plots).
- Analizzando la coerenza delle tracce simulate lungo un affioramento con quelle effettivamente misurate.
- Attraverso analisi di tipo idraulico effettuate in foro lungo sondaggi esplorativi: (valutazione della distribuzione del gradiente di pressione indotto durante l'esecuzione di prove in foro; "Pressure Transient Analysis Simulation, PTA").

Tra queste il metodo PTA e il Size/Number Scaling Plots sono i più efficaci, essendo in genere più robusti rispetto agli errori di estrapolazione.

I reticoli di fratturazione mostrano spesso un modello frattale (indipendente dalla scala). Se la dimensione delle fratture segue una legge frattale, la legge di distribuzione delle lunghezze delle tracce è coerente con una distribuzione di potenza. La funzione di densità di probabilità della lunghezza delle fratture può in questo caso essere espressa da:

$$f(x) = \frac{(b-1) \cdot x_{\min}^{(b-1)}}{x^b}, \quad x \geq x_{\min} > 0, \quad b > 1$$

Dove x_{min} identifica il valore di persistenza minimo considerato nell'analisi (fratture con persistenza minore non vengono considerate). La funzione di densità di probabilità cumulativa complementare alla precedente (ccdf) è esprimibile da:

$$F_c(x) = 1 - \int_{x_{min}}^{\infty} f(x)dx = \frac{x_{min}^{(b-1)}}{x^{(b-1)}}$$

E da la probabilità che la persistenza di una frattura sia maggiore o uguale ad un certo valore x . Per $x = x_{min}$ la funzione vale 1, ossia tutte le fratture che definiscono la popolazione sono maggiori o uguali a x_{min} . Passando al logaritmo della funzione si ottiene:

$$\log F_c(x) = (b-1)\log x_{min} - (b-1)\log x$$

Da ciò deriva che se la funzione di densità di probabilità cumulativa complementare è plottata su un diagramma bi-logaritmico, x_{min} e l'esponente b possono essere stimati approssimando la funzione con una retta:

$$b = 1 - \text{pendenza}(\text{retta})$$

$$x_{min} = x \quad \text{Per} \quad F_c(x) = 1$$

Una volta stimati i valori di x_{min} e b dall'analisi delle tracce delle fratture in affioramento è possibile ricavare i valori dei parametri da introdurre nei modelli di generazione del reticolo di fratture. La Pointe (1998 e 2002) ha infatti osservato che x_{min} e b rilevati dalla lunghezza delle tracce in affioramento sono correlabili a x_{r_min} e b_r della distribuzione di potenza dei raggi delle fratture simulate mediante un modello di fratture discrete, tramite le relazioni:

$$x_{r_min} = x_{min} \cdot \frac{2}{\pi}$$

$$b_r = b + 1$$

I diagrammi bi-logaritmici numerosità/lunghezza delle fratture mostrano in pratica importanti deviazioni della linearità agli estremi. Ciò è imputabile a effetti di censoring e cut off dei dati che portano all'esclusione di tracce o porzioni di tracce non visibili a causa della limitata visibilità reale dell'affioramento. Se la distribuzione di frequenza della persistenza delle tracce è esprimibile mediante una legge di potenza, il grafico mostra comunque una porzione lineare, almeno nella parte centrale. Di norma, la legge di distribuzione della lunghezza delle tracce delle fratture è di tipo lognormale o di Pareto (power Law). Se la distribuzione che meglio approssima la persistenza fosse di tipo lognormale i dati non risulterebbero allineati nemmeno nella parte centrale, e la simulazione PTA dovrebbe essere utilizzata per determinare i parametri da introdurre nei modelli di simulazione del reticolo.

Analisi delle Tracemap rilevate in affioramento.

Le tracce delle fratture rilevate in affioramento sono state digitalizzate dalle immagini fotografiche e georeferenziate per essere inserite nel modello. Su di esse è stata quindi effettuata, utilizzando le apposite funzionalità rese disponibili dal software FracMan, l'analisi delle tracce (tracemap) che ha permesso di stimare:

- La distribuzione delle lunghezze delle tracce.
- Il pattern spaziale del reticolo di fratturazione (regolare, casuale o raggruppato in cluster secondo un modello frattale).
- La percentuale di terminazioni contro altre fratture.

Le tracemap rilevate sono state importate in FracMan e analizzate per la stima della distribuzione delle dimensioni delle fratture. L'immagine in Figura 5.13 mostra i grafici CCDF (curva di distribuzione cumulativa complementare) delle lunghezze delle tracce. Si nota come tutte le curve, ricavate da immagini scattate sull'affioramento a scale differenti, siano approssimabili da una retta nella loro porzione centrale. Le deviazioni agli estremi sono imputabili al censoring dei dati. In particolare nei tratti alti delle curve la deviazione è imputabile alla mancanza delle fratture di piccole dimensione le cui tracciabilità nelle immagini diminuisce al diminuire della scala dell'immagine. Si noti come all'aumentare della scala dell'immagine il tratto approssimabile da una linea retta si sposti verso l'alto, ad indicare che il limite di rilevabilità della frattura dall'immagine diviene via via più piccolo mentre le fratture di più grandi dimensioni vengono tagliate causando le deviazioni sub verticali dell'ultima parte delle curve.

Plottando su uno stesso grafico bi-logaritmico le CCDF delle lunghezze delle tracce rilevate sull'affioramento alle diverse scale e normalizzando i grafici in funzione dell'area della porzione di affioramento di volta in volta indagata, si ottiene il grafico in mostrato in Figura 5.13. Al diminuire delle dimensioni dell'immagine le curve mantengono lo stesso allineamento e appartengono quindi ad'unica distribuzione di tipo Power Low. I parametri b e x_{min} si possono ricavare dalla retta di interpolazione del grafico. Sulla base di questi vengono calcolati l'esponente b_r e $x_{r_{min}}$ della funzione di distribuzione dei raggi delle fratture che sarà successivamente introdotta nella funzione di generazione del reticolo. Nel caso in esame, relativo all'analisi delle tracemap, b e x_{min} risultano rispettivamente uguali a 2.99 e 0.376, mentre b_r e $x_{r_{min}}$ da introdurre nella simulazione si ottengono dalle equazioni precedentemente e risultano pari a 3.99 e 0.24. I test preliminari di simulazione del reticolo hanno però mostrato che le fratture simulate con questi parametri avevano dimensioni medie troppo ridotte e rendevano il reticolo troppo complesso per essere gestibile con gli strumenti informatici a disposizione. Si è quindi deciso di focalizzare la simulazione sulle fratture a più elevata persistenza, aumentando il valore di x_{min} a 1.38, ed escludendo così dalla simulazione le fratture di più piccole.

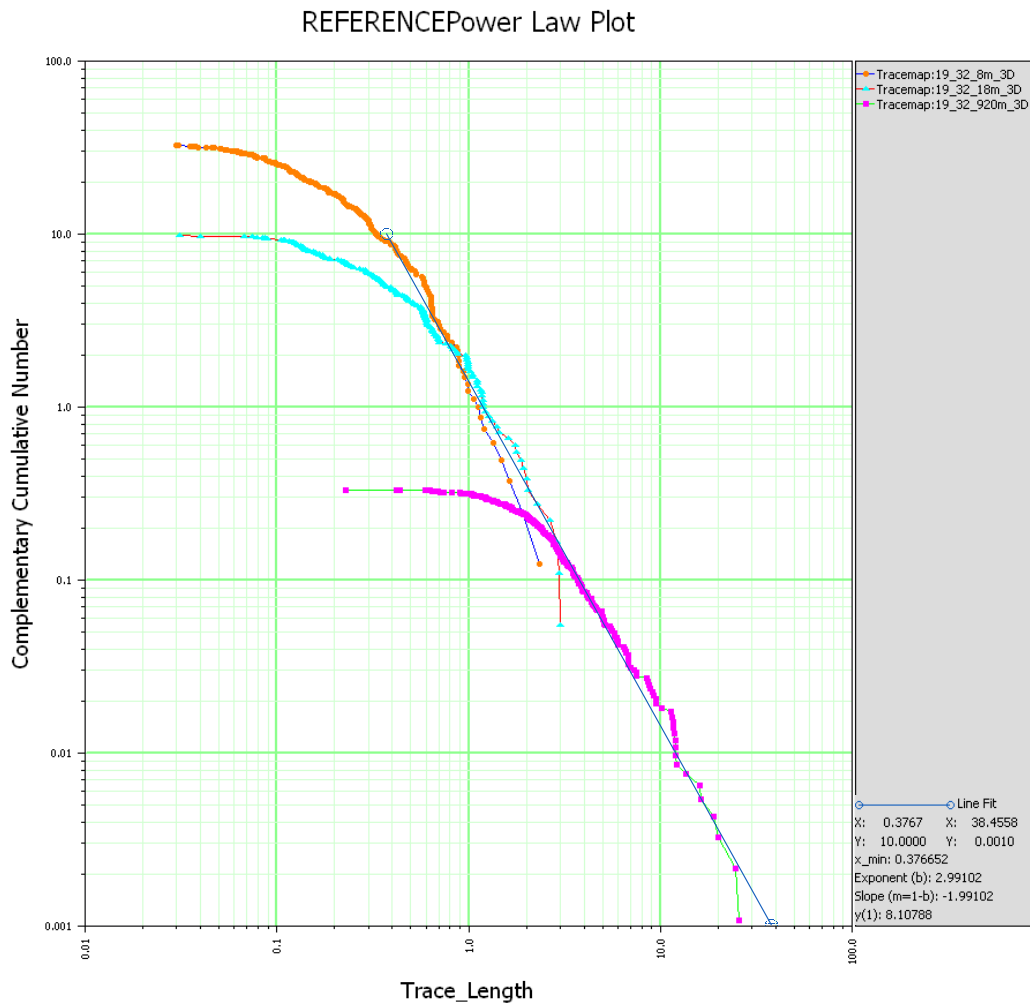


Figura 5.13: Curve di distribuzione cumulativa complementare delle lunghezze delle tracce rilevate in affioramento. Le curve sono state costruite sulla base delle tracce digitalizzate su immagini alle diverse scale dello stesso affioramento (fronte di cava RGM 19, vedi Figura 5.12). La curva in arancione è relativa ad una porzione dell'affioramento di circa 8 m², la curva in azzurro è stata costruita per le tracce rilevate su una porzione di affioramento di circa 20 m², e la curva in viola è relativa ad un'area di circa 900 m².

Il grafico mostrato in figura è relativo all'analisi effettuata su tutte le tracce senza distinzione tra le diverse famiglie di appartenenza. In realtà nelle simulazioni ogni famiglia è generata in maniera indipendente. L'analisi è quindi stata ripetuta in maniera indipendente per le tracce di ogni singola famiglia, ottenendo i parametri di ingresso inseriti nei modelli sintetizzati in Tabella 5.3

Famiglia	X minimo	esponente b
k1	1.38	3.71
k2	1.3	3.77
k4	1.38	3.71
k5	1.2	3.74

Tabella 5.3: Parametri delle distribuzioni di potenza che descrivono le dimensioni delle fratture per le famiglie generate nei modelli.

Forma delle fratture

Il problema della forma da attribuire alle singole fratture generate dal processo di simulazione è stato trattato nei capitoli dedicati all'approfondimento teorico. A partire dalle teorie di Veneziano e Baecher, la forma discoidale è stata universalmente accettata per la rappresentazione della geometria delle fratture, in funzione della sua capacità di rappresentare in maniera realistica le caratteristiche geometriche delle fratture e della relativa semplicità della sua formulazione matematica. La forma discoidale fa riferimento ad un'elisse, con rapporto tra i due assi definito dall'utente in funzione dell'allungamento preferenziale mostrato dalle fratture. La forma discoidale viene quindi approssimata nel modello matematico ad un poligono regolare costituito da un numero di lati definito dall'utente. Nel caso in esame, non essendoci evidenze per giustificare l'introduzione di un rapporto di allungamento di forma, le fratture sono state simulate come poligoni regolari a sei lati.

5.3.6 Individuazione delle distribuzioni di probabilità dei parametri meccanici e idraulici delle fratture.

La generazione stocastica delle fratture che compongono il reticolo permette di modellizzare non solo le caratteristiche geometriche delle fratture ma anche i parametri meccanici ed idrogeologici da attribuire ad ogni discontinuità generata dal modello.

L'implementazione di modelli idrogeologici per la simulazione del flusso idrico nell'ammasso richiede la definizione di almeno tre proprietà per la caratterizzazione del comportamento idraulico delle fratture: apertura, permeabilità e compressibilità. L'utente può, in alternativa, esprimere i parametri idrogeologici anche in termini di apertura, trasmissività e coefficiente di immagazzinamento.

Oltre alle proprietà di base obbligatoriamente richieste dalla procedura di simulazione del reticolo sono state introdotte altre proprietà aggiuntive successivamente utilizzate per affinare i modelli idrogeologici realizzati. Le proprietà attribuite ad ogni frattura sono riassunte nell'elenco seguente:

- Apertura
- Permeabilità
- Compressibilità
- Joint Roughness Coefficient (JRC)

- Joint Compressive Strength (JCS)
- Alterazione

Nei paragrafi successivi verranno specificate le distribuzioni di probabilità attribuite ai vari parametri.

Apertura delle discontinuità

Poichè la trasmissività di una discontinuità dipende dall'apertura secondo una legge cubica, l'apertura è il parametro fisico più importante nella definizione della capacità di flusso e trasporto di una frattura. La notevole variabilità del parametro, unito alla difficoltà di acquisire un campione rappresentativo di misure, sia per ragioni legate all'impossibilità di accedere a punti di misura ubicati in profondità nell'ammasso, sia per la difficoltà tecnica connessa all'acquisizione delle misure, rende necessario un approccio di tipo probabilistico alla definizione del parametro.

La definizione della funzione di probabilità che meglio approssima l'apertura delle discontinuità è un problema molto complesso, affrontato dalla comunità scientifica internazionale che ha prodotto una copiosa bibliografia sull'argomento. Numerosi studi hanno analizzato la distribuzione delle aperture su campioni di dimensioni limitate, in genere inferiori al metro, altri hanno tentato di indagare le caratteristiche di sistemi di fratture riprodotte artificialmente in laboratorio. La rugosità in genere osservata sulle pareti delle fratture influenza poi in maniera notevole l'entità dell'apertura, che risulta ridotta a causa dei punti di contatto tra le sporgenze dovute alle asperità. Le ricerche sviluppate dalla comunità scientifica internazionale presentano in genere una serie di conclusioni sintetizzabili nei seguenti punti:

- Esiste di norma una ben precisa distribuzione di probabilità che descrive adeguatamente la distribuzione dell'apertura in un reticolo
- Si osserva sovente una correlazione spaziale dell'apertura nel dominio di interesse
- Le distribuzioni sono in generale invarianti di scala

La distribuzione che in genere meglio descrive la variabilità dell'apertura è la lognormale (Gentier e Billaux, 1989; Hakami, 1996), e subordinatamente la distribuzione gamma (Tsang, 1984). In alcuni casi anche la distribuzione gaussiana si è dimostrata adeguata (Piggott, 1990).

Le distribuzioni spaziali proposte sono comunque in genere contraddistinte da un elevato valore della varianza, ad indicare non solo l'elevata variabilità spaziale del parametro ma anche l'effetto della rugosità che determina repentine variazioni in funzione dello sfasamento fra gole e picchi sui piani opposti della discontinuità. La scabrezza delle pareti evidenzia inoltre proprietà frattali e di autosomiglianza a differenti scale di lavoro, ed è tuttora un argomento oggetto di approfondimento da parte della comunità scientifica internazionale l'individuazione di precise relazioni tra le caratteristiche della rugosità e l'apertura delle fratture.

La comunità scientifica internazionale pare comunque orientata ad individuare nella distribuzione lognormale la più idonea a rappresentare la distribuzione dell'apertura (Swan, 1983; Gale et al. 1985; Neuzil e Tracy, 1981)

Nel caso in studio le funzioni di probabilità da introdurre nell'algoritmo di simulazione sono state determinate a partire dall'analisi statistica dei dati osservati in affioramento. L'elaborazione è stata eseguita per ogni famiglia sul set di dati "parametri delle discontinuità principali". I risultati dell'elaborazione statistica effettuata con l'ausilio delle funzionalità messe a disposizione dal software sono presentati in Figura 5.14

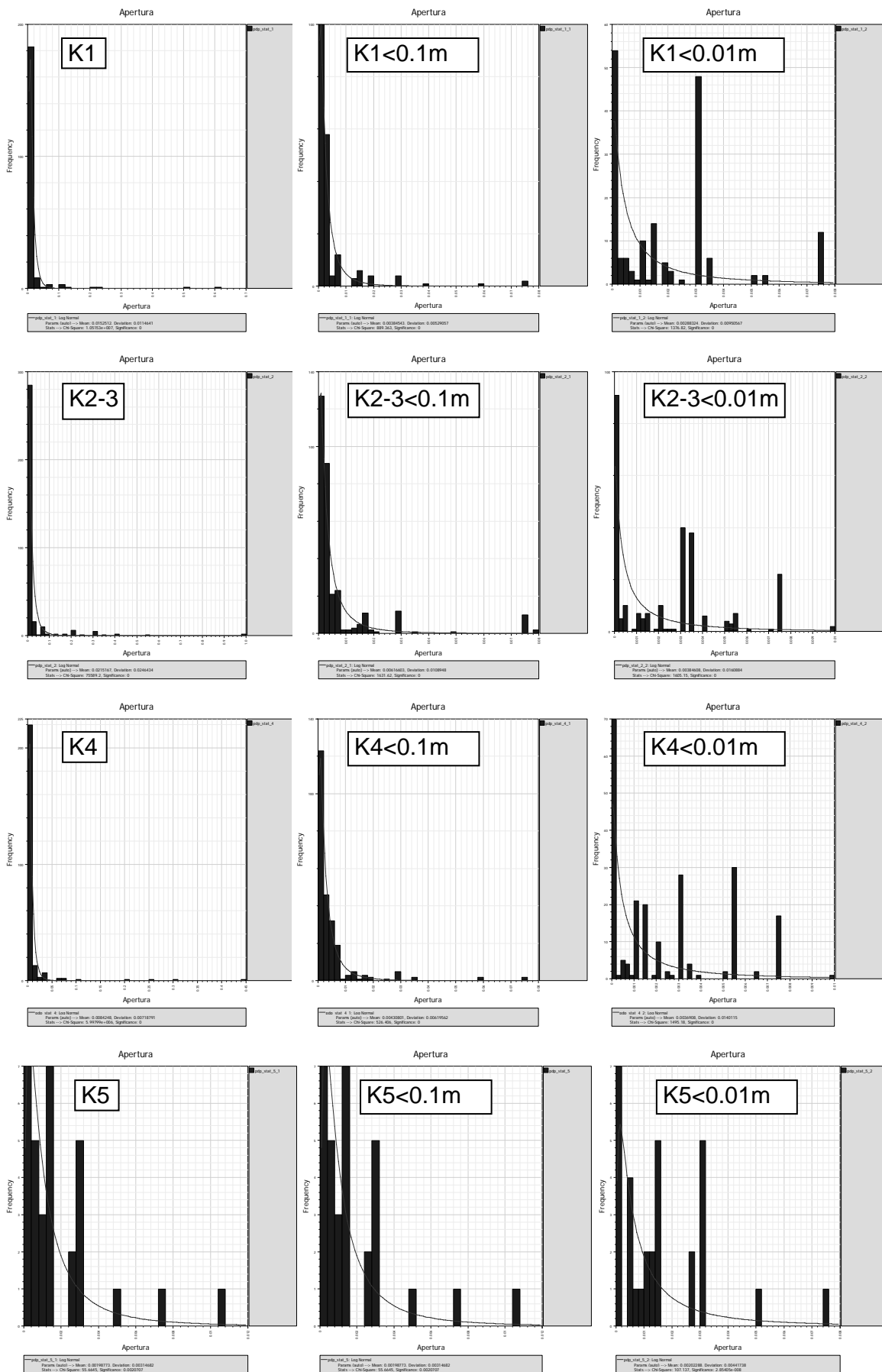


Figura 5.14: (pagina precedente). Istogrammi di frequenza per le aperture delle quattro famiglie di discontinuità. Nei grafici in colonna 1 è riportato l'istogramma relativo ai dati completi. In colonna 2 i dati sono stati censurati considerando solamente le aperture inferiori a 0.1m metri, mentre in colonna 3 la soglia di esclusione è stata abbassata a 1 cm. Sovrapposte ad ogni istogramma le funzioni di densità di probabilità che meglio descrivono i dati sperimentali.

L'analisi statistica dei dati rilevati ha permesso di definire le funzioni di densità di probabilità che descrivono le distribuzioni del parametro apertura per le quattro famiglie di fratture. In Figura 5.15 sono riportati gli istogrammi per i dati completi (colonna 1) e per quelli censurati con soglia pari a 0.1m (colonna 2) e 0.01m (colonna 3).

Per la costruzione dei modelli si è deciso di utilizzare la distribuzione che descrive i dati censurati alla soglia di 0.01m. Tale assunzione si giustifica con la necessità di escludere dal modello di simulazione le strutture caratterizzate da notevole apertura, che possono essere considerate outlier della popolazione statistica analizzata e che verranno introdotte deterministicamente nei modelli in forma di elementi singolari quali faglie e fratture caratterizzate da valori di conducibilità particolarmente elevati.

In Tabella 5.4 sono sintetizzate e riassunte le distribuzioni di probabilità introdotte nei modelli di simulazione per le quattro famiglie analizzate.

Famiglia	Distribuzione di frequenza	Media, m	Deviazione standard
K1	Log Normale	0.0028	0.0095
K2-3	Log Normale	0.0038	0.016
K4	Log Normale	0.0037	0.014
K5	Log Normale	0.002	0.0044

Tabella 5.4: Parametri delle distribuzioni delle aperture per le quattro famiglie simulate

Permeabilità

Alle fratture generate dal modello è stata attribuita una permeabilità definita in accordo con la legge cubica di dipendenza dall'apertura. Riprendendo brevemente i concetti esposti nel capitolo 4, il valore della permeabilità, relativa a un solo giunto liscio e in condizioni di moto laminare, si può esprimere come (Snow, 1969):

$$k = \frac{\gamma e^2}{12\eta} = \frac{g e^2}{12\nu}$$

dove e è l'apertura media del giunto (m), g è l'accelerazione di gravità (m/s^2), ν, γ, η sono, rispettivamente, la viscosità cinematica ($10^{-6} m^2/s$), la densità (Kg/m^3) e la viscosità dinamica ($10^{-3} Pa/s$) del fluido e k è espresso in m/s .

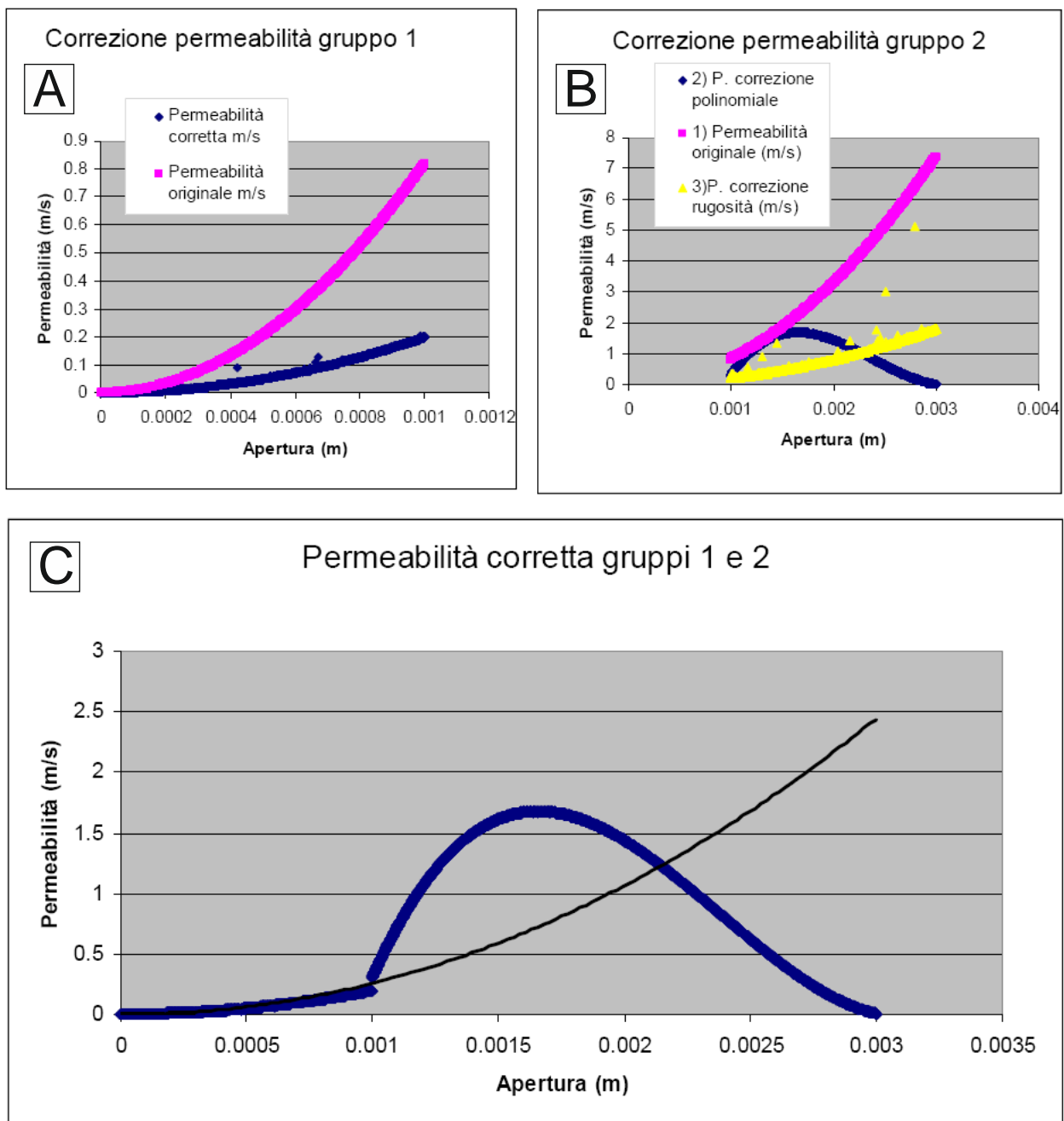
La permeabilità così definita è stata successivamente modificata in funzione del coefficiente di rugosità delle fratture (JRC). Il valore di k (m/s) relativo a giunti scabri, è quindi stato calcolato in funzione del coefficiente di rugosità JRC:

$$k = \frac{g \cdot e^2}{12\nu \cdot \left[1 + 8,8 \cdot \left(0,5 - \frac{e}{2JRC^{2,5}} \right)^{1,5} \right]}$$

Tale correzione è valida in regime di flusso laminare per un determinato campo di valori del rapporto fra l'ampiezza delle asperità (ε) e l'apertura idraulica della frattura (D_h) ed è quindi stata applicata alle sole fratture che soddisfano la condizione $\varepsilon/D_h > 0.033$. Altre relazioni vengono suggerite in letteratura per la correzione della permeabilità per quelle fratture in cui il rapporto ε/D_h sia inferiore al valore soglia di 0.033. Una verifica effettuata per il valore di tale rapporto ha evidenziato come tutte le fratture stocasticamente generate con i parametri d'ingresso definiti nel presente capitolo rispettino il campo di applicabilità della relazione che è quindi stata utilizzata su per tutte le fratture con apertura inferiore ad 1 mm (vedi seguito).

L'influenza della rugosità sulla permeabilità di una frattura diminuisce all'aumentare dell'apertura idraulica della frattura ed è trascurabile, anche per fratture molto rugose, per aperture maggiori 1mm. All'aumentare dell'apertura delle fratture l'indagine di terreno ha inoltre mostrato una tendenza all'aumento della frequenza del riempimento, di natura sabbioso-limosa debolmente argillosa. La presenza di riempimento diviene significativa per aperture superiori ai 2 mm, ed è stata riscontrata in modo continuo per valori di apertura superiori ai 3 mm. Per tale ragione i set di fratture generati dal processo di simulazione stocastica sono stati suddivisi in tre gruppi in corrispondenza di valori soglia di apertura assunti pari a 1 e 3mm. Sui tre gruppi così definiti sono state applicate apposite legge di correzione della permeabilità. La permeabilità delle fratture aventi apertura inferiore a 1 millimetro è stata definita in accordo con la legge cubica (esponente al quadrato) a cui è stata successivamente applicata la correzione che permette di ridurre la permeabilità in funzione del JRC (vedi sopra). Per le fratture di apertura compresa tra 1 e 3 mm è stata ipotizzata una permeabilità calcolata in accordo con la legge cubica senza alcuna correzione in funzione della rugosità per la prima parte dell'intervallo (fino a circa 2 mm), successivamente la permeabilità è stata progressivamente ridotta ipotizzando la presenza di riempimento via via più significativo all'aumentare dell'apertura nell'intervallo tra 2 e 3 mm. La funzione che esprime la permeabilità in funzione dell'apertura è stata quindi definita

individuando una legge numerica che permettesse di raccordare la permeabilità calcolata per le fratture del primo gruppo con quella delle fratture del terzo gruppo. La legge più appropriata è stata individuata in una funzione polinomiale di terzo grado ricavata per approssimazione e interpolazione delle funzioni definite per i gruppi 1 e 3. In figura 5.15 è plottata la permeabilità risultante per le fratture del primo gruppo (apertura < 1mm) e del secondo gruppo (apertura compresa tra 1 e 3 mm) prima e dopo aver applicato le correzioni ai due gruppi secondo i criteri sopra definiti.



5.15: Curve di permeabilità per i gruppi 1 (aperture <1mm) e 2 (aperture compresa tra 1 e 3 mm). In A: permeabilità originale, calcolata applicando la legge cubica e permeabilità corretta in funzione della rugosità

per il gruppo1. In B) Permeabilità permeabilità originale, calcolata applicando la legge cubica, permeabilità corretta in funzione della rugosità con la stessa legge usata per il gruppo1 e permeabilità corretta con legge polinomiale. In C) Andamento della permeabilità in funzione dell'apertura per le fratture del reticolo dopo l'applicazione della correzione (vedi testo).

Per le fratture di apertura superiore ai 3mm la permeabilità risulta invece influenzata in maniera determinante dalla presenza di riempimento, ed è quindi stata assegnata attribuendo una distribuzione di probabilità coerente con i valori di permeabilità tipici di un materiale di natura sabbioso limosa. Nello specifico, a queste fratture è stata attribuita una permeabilità definita da una funzione normale con media $1e-5$ m/s e deviazione standard $2e-6$ m/s.

La fase di indagine aveva permesso di individuare alcune strutture fragili (faglie) continue e con caratteristiche approssimativamente costanti nell'area di studio. Tali strutture mostrano aperture variabili tra i 5 e i 50 cm e sono costantemente riempite da materiale a granulometria sabbiosa costituito in prevalenza da quarzo frantumato. Nell'immediato intorno delle faglie principali si è osservata una fascia di disturbo tettonico costituita da materiale molto fratturato, con dimensione media dei blocchi di circa $5 \times 5 \times 5$ cm. Tale fascia fortemente tettonizzata è stata considerata nei modelli incrementando l'apertura media misurata per le faglie di 50 cm su entrambi i lati. Le faglie sono quindi state inserite nei modelli come strutture deterministicamente definite caratterizzate da apertura totale di circa $1/1.5$ m e riempimento costituito da quarzo frantumato la cui permeabilità è stata stimata in $1e-3$ m/s. La permeabile ipotizzata per il materiale di riempimento è stata successivamente validata con una procedura di back analysis mediante confronto tra le portate misurate e quelle simulate dal modello verso il sistema di cunicoli che interseca l'ammasso.

Compressibilità

Il parametro compressibilità delle fratture influenza il coefficiente di immagazzinamento definito dal prodotto tra la compressibilità e l'apertura delle fratture. Non essendo disponibili dati specifici sulla compressibilità delle fratture nell'area di studio, questa è stata assunta da informazioni bibliografiche pari a $1e-6$ 1/kPa. La stima del parametro è comunque stata fatta in maniera approssimativa anche in considerazione della sua irrilevanza nella successiva modellazione di flusso, effettuata in condizioni stazionarie.

Joint Roughness Coefficient (JRC)

Il coefficiente di rugosità è stato stimato sulla base delle distribuzioni di frequenza definite per i dati raccolti in corrispondenza dei 12 Rilievi Geo Meccanici (RGM) effettuati sull'ammasso di quarzo. L'analisi statistica dei valori rilevati è stata ampiamente trattata nel Capitolo 3, a cui si

fa riferimento per una descrizione dettagliata delle metodologie applicate e dei risultati raggiunti. I risultati dell'analisi statistica hanno permesso di ricavare i parametri descrittivi della distribuzione della rugosità per le quattro famiglie simulate; in Tabella 5.5 vengono riassunti i parametri descrittivi delle distribuzioni introdotte nei modelli.

Famiglia	Distribuzione di frequenza	Media, m	Deviazione standard
K1	Normale	10	4
K2-3	Normale	8	2.5
K4	Normale	9.5	2.5
K5	Costante	10	

Tabella 5.5: distribuzione di probabilità JRC

Joint Compressive Strength (JCS)

Come per il coefficiente di rugosità, anche la resistenza a compressione delle pareti dei giunti (JCS) è stata stimata sulla base delle distribuzioni di frequenza definite per i 12 Rilievi Geo Meccanici (RGM) effettuati sull'ammasso di quarzo. I risultati dell'analisi statistica sul JCS, utilizzati per la simulazione del reticolo di fratture, sono riassunti in Tabella 5.6

Famiglia	Distribuzione di frequenza	Media, m	Deviazione standard
K1	Normale	42	2
K2-3	Normale	50	5
K4	Normale	47	3
k5	Costante	45	

Tabella 5.6: distribuzione di probabilità JCS

Alterazione

Il parametro alterazione è stato stimato sulla base dell'analisi statistica effettuata sui valori rilevati sulle discontinuità principali rilevate nell'area di cava. In Figura 5.16 sono riportati gli istogrammi di frequenza costruiti per le 4 famiglie, con sovrapposta funzione di densità di probabilità che meglio approssima i dati rilevati. In Tabella 5.7 sono sintetizzati i parametri delle distribuzioni di frequenza inserite nei modelli. Poiché il parametro è espresso da una variabile nominale, ad ogni classe di alterazione è stata attribuita una corrispondenza numerica trasformando la variabile da nominale a ordinale. La conversione dei valori è stata attuata con la seguente corrispondenza: WD1=0; WD2=1; WD3=2; WD=3. L'analisi statistica tratta le variabile come se fosse continua; valori frazionari vanno quindi intesi come intermedi tra le due classi discrete immediatamente vicine.

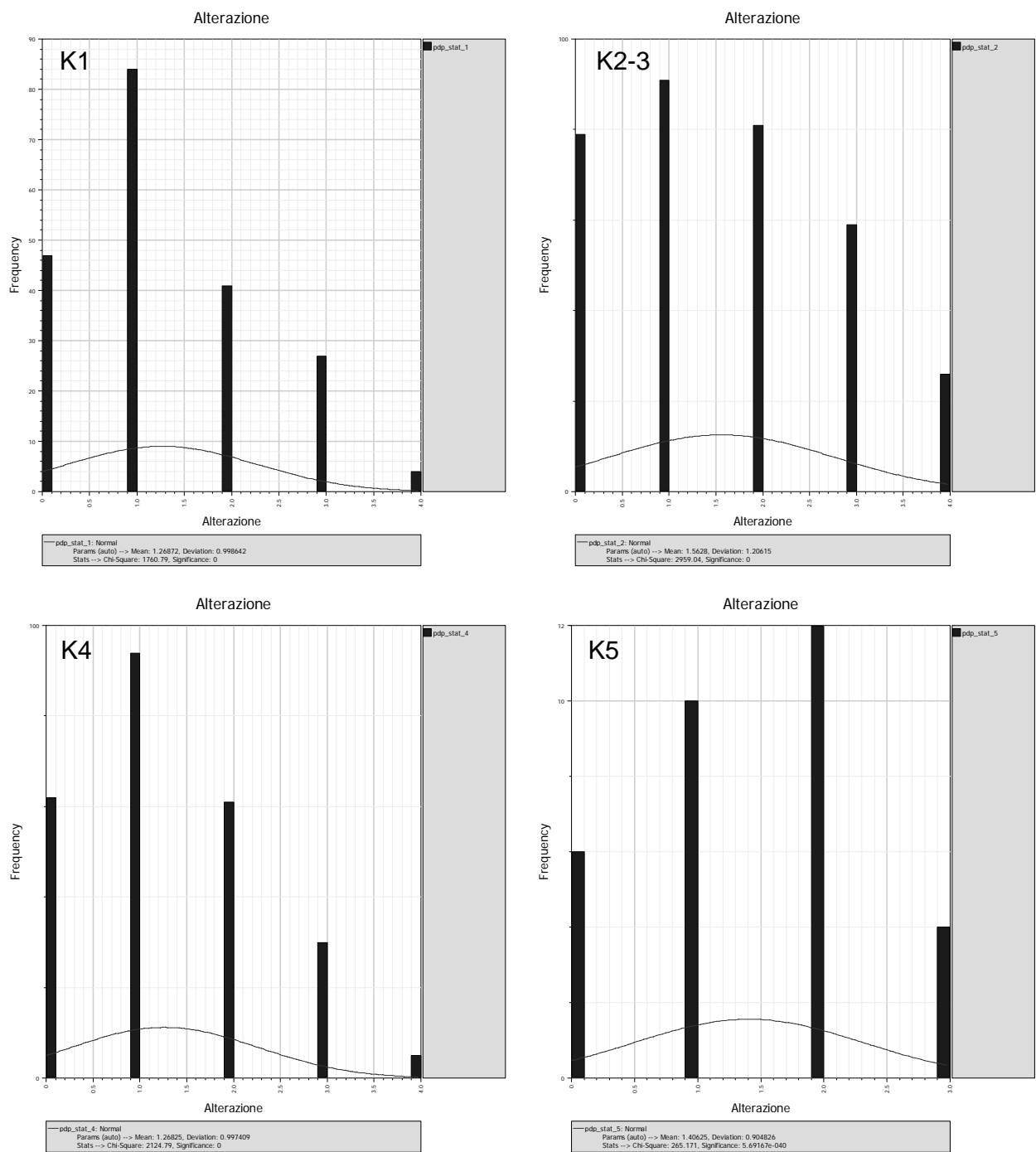


Figura 5.16: Istogrammi di distribuzione delle classi di alterazione misurate per le 4 famiglie

Famiglia	Distribuzione di frequenza	Media, m	Deviazione standard
K1	Normale	1.3	1
K2-3	Normale	1.5	1.2
K4	Normale	1.3	1
K5	Normale	1.4	0.9

Tabella 5.7: Tabella riassuntiva delle funzioni di distribuzione dell'alterazione introdotte nei modelli di simulazione per le 4 famiglie di discontinuità.

5.4 Generazione del reticolo di fratturazione

La generazione del reticolo di fratturazione è stata effettuata utilizzando i parametri di ingresso definiti nei paragrafi precedenti. Sono state effettuate diverse generazioni variando di volta in volta i parametri geometrici delle fratture così da affinare il modello fino a trovare il miglior accordo con la realtà. Per l'orientazione delle fratture sono stati utilizzati diversi modelli: un gruppo di generazioni è stato effettuato utilizzando i parametri di orientazione evidenziati in Tabella 5.1, definiti in maniera univoca, spazialmente omogenea, per l'intero dominio di generazione. In Figura 5.17 sono mostrati gli elementi geometrici che definiscono il modello.

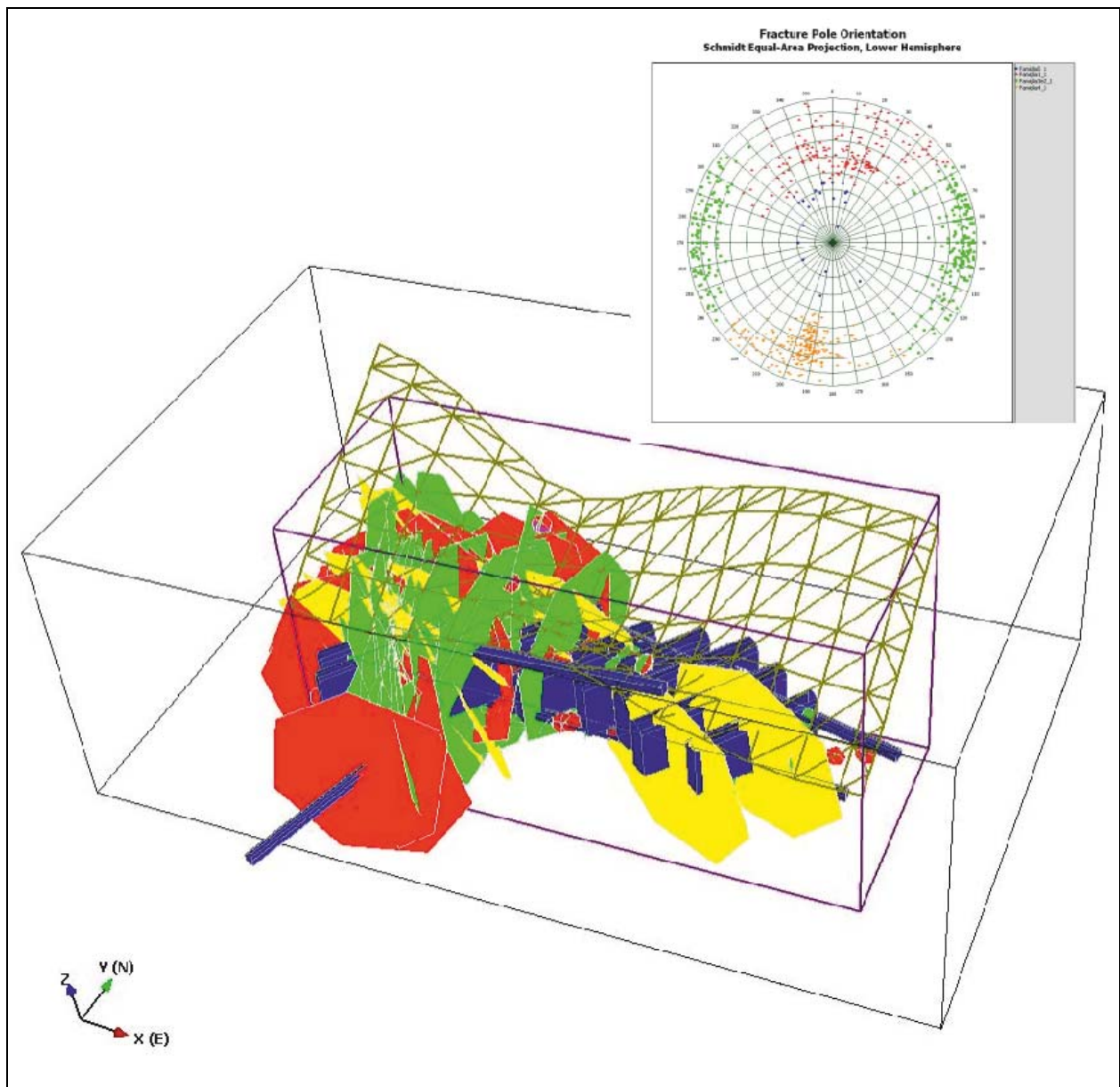


Figura 5.17: Elementi geometrici del dominio di generazione: Il parallelepipedo interno definisce il dominio di generazione corrispondente all'ammasso di quarzo. Il parallelepipedo esterno identifica il dominio di generazione ampliato al fine di allontanare i limiti esterni del modello dalla zona di interesse. In figura sono

inoltre riportati i set di fratture “parametri discontinuità principali” corrispondenti alle strutture principali rilevate durante la fase di indagine. Tali fratture costituiscono il set di condizionamento utilizzato per la generazione stocastica del reticolo. La distribuzione delle giaciture del set è riportata nello stereogramma in alto a destra. La superficie topografica nella zona sovrastante l’area di cava è rappresentata dalla superficie wireframe in colore verde. Le gallerie di coltivazione sono rappresentate dai volumi in blu.

I risultati ottenuti mostrano reticoli caratterizzati da elevata dispersione, con una non ottimale coerenza tra le orientazioni simulate e quelle realmente misurate. Un secondo tentativo è stato effettuato utilizzando una funzionalità resa disponibile dal software FracMan denominata Boot Strap. Tale modello condiziona l’orientazione della frattura generata con un dato casualmente selezionato all’interno di un set utilizzato per il condizionamento, andando a selezionare casualmente una frattura appartenente al set di condizionamento posta in un intorno di 20 m dal centro della frattura. La frattura viene quindi generata assumendo una distribuzione di tipo Fisher, con un certo k definito dall’operatore, intorno alla giacitura di condizionamento (le giaciture utilizzate per il condizionamento sono rappresentate in Figura 5.18). Sono stati testati diversi valori del coefficiente k di Fisher, ottenendo i risultati migliori (buona aderenza ai dati sperimentali) con un k pari a 50. Per il condizionamento è stato utilizzato il Set di dati “Parametri discontinuità Principali”. Questa modalità di generazione condizionata permette di ottenere risultati in buon accordo con i dati sperimentali nelle porzioni del dominio di generazione ove sono disponibili dati da utilizzare per il condizionamento. Nelle porzioni periferiche del dominio invece, ove non erano disponibili dati sperimentali nelle immediate vicinanze, la generazione risulta sistematicamente condizionata dagli stessi dati e mostra una sorta di orientazione preferenziale all’interno di ampi settori in cui il condizionamento è dato da un unico dato. Entrambi i metodi sopra descritti mostrano quindi punti di forza ed elementi di debolezza.

Dopo aver effettuato diversi tentativi di simulazione, nel modello finale qui presentato il problema della mancanza di dati di condizionamento nelle porzioni periferiche è stato risolto con un artificio, utilizzando un approccio diverso nelle due porzioni, centrale ed esterna, del dominio di generazione. Nello specifico è stato generato un set di dati, successivamente utilizzato per il condizionamento dei modelli, costituito dai dati reali ove questi erano disponibili, e da dati simulati sulla base dei parametri statistici medi dei dati reali, nelle porzioni esterne del dominio di generazione. Il set risultante è stato quindi utilizzato per il condizionamento dei dati simulati utilizzando il metodo Boot strap. I risultati ottenuti permettono di riprodurre in maniera molto precisa la variabilità riscontrata nella porzione centrale dell’ammasso, mentre risultano coerenti con le distribuzioni medie dei dati nelle porzioni esterne al dominio di interesse. I risultati

saranno approfonditamente descritti e commentati nel capitolo 5.5 dedicato alla validazione del modello. Nelle Figure 5.18 e 5.19 vengono mostrati i risultati del processo di simulazione, suddivisi per le diverse famiglie. Oltre alla generazione effettuata nel dominio delimitato dai confini geometrici dell'ammasso di quarzo vengono mostrate anche le generazioni effettuate nel dominio appositamente ampliato al fine di estendere il modello in modo da applicare le condizioni al contorno dell'analisi idrogeologica a distanza sufficiente da garantire la significatività dell'analisi nella zona d'interesse, costituita dall'ammasso di quarzo intersecato dalle gallerie di coltivazione mineraria.

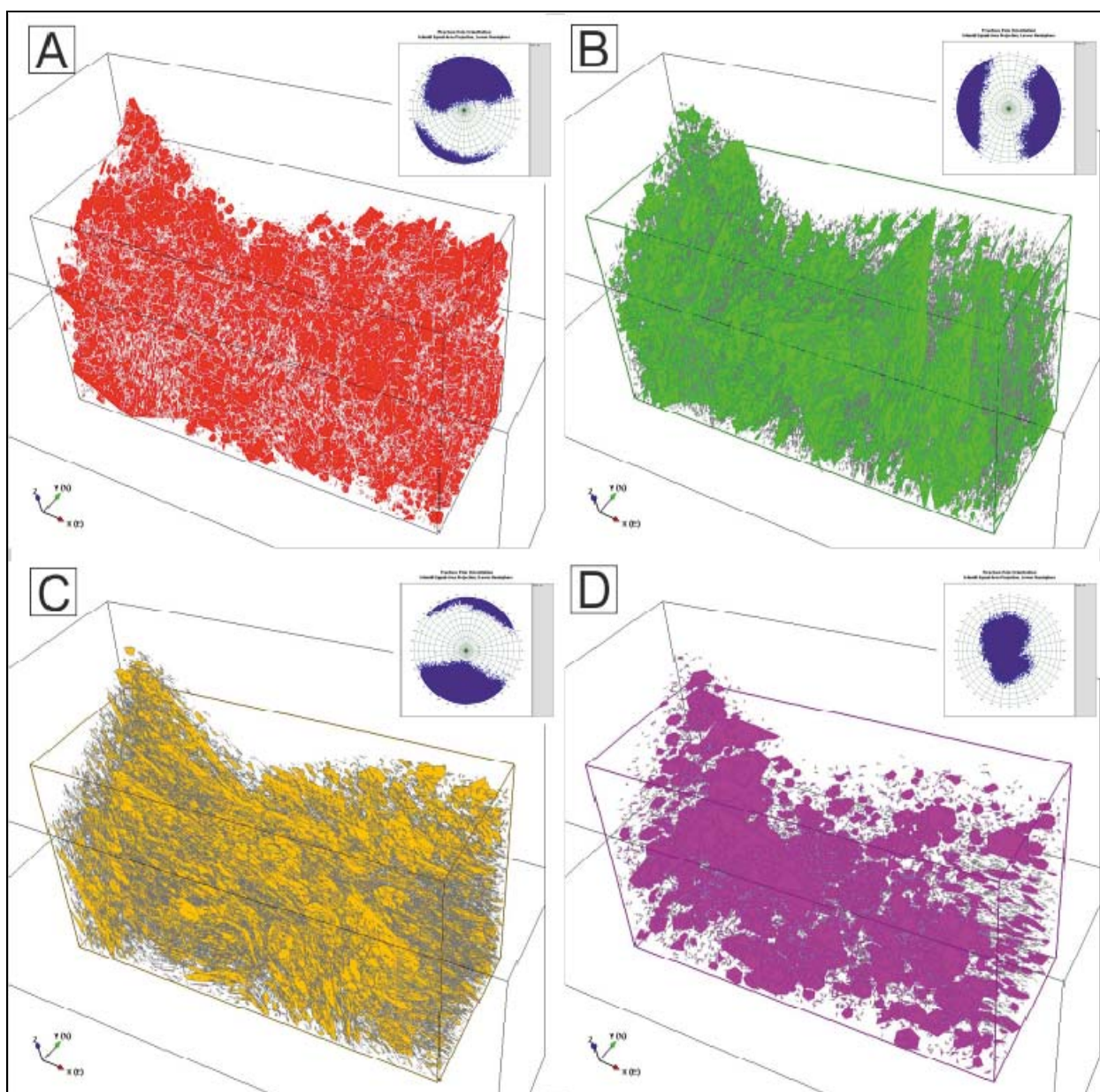


Figura 5.18: generazione stocastica del reticolo di fratturazione nella porzione centrale del modello relativa all'ammasso di quarzo. In figura sono riportati i reticoli generati con il metodo bootstrap per le 4 famiglie

analizzate. A:famiglia K1; B:famiglia K2-3; C:famiglia K4; D:famiglia K5. Gli stereogrammi rappresentano i poli delle fratture generate in proiezione equiarea. Per rendere leggibile l'immagine è stato rappresentato solamente il 20 % delle fratture totali, casualmente selezionate.

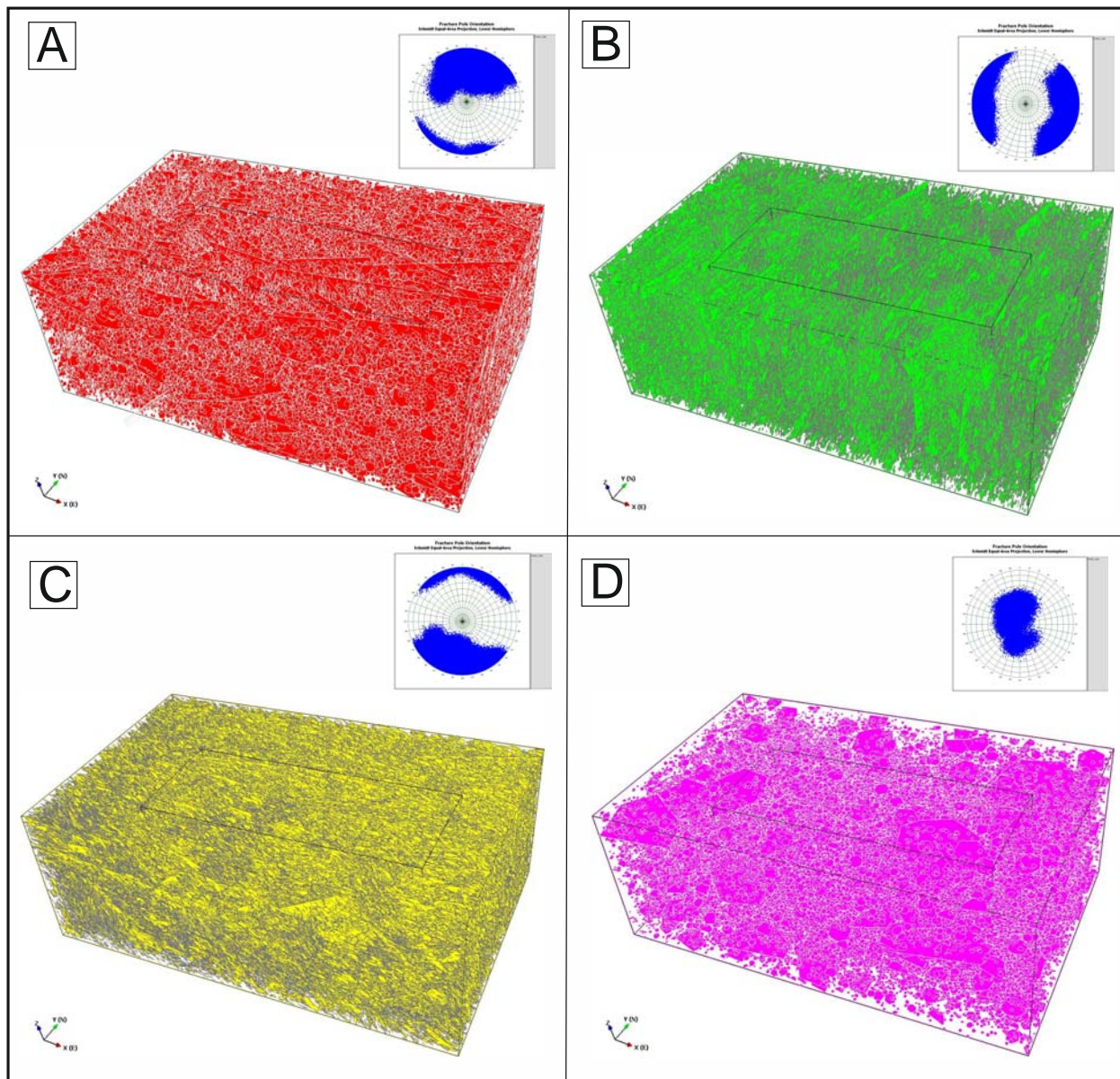


Figura 5.19: generazione stocastica del reticolo di fratture nel dominio allargato. Il rettangolo centrale rappresenta il volume di cava. Gli stereogrammi di ogni set generato mostrano la dispersione dei valori giacitureali dei dati simulati secondo il modello boot strap. Nelle immagini il numero di discontinuità rappresentato è limitato al 20% del totale.

Caratteristiche meccaniche e idrogeologiche delle discontinuità generate

Il reticolo di discontinuità generato dal modello stocastico con i dati di input sopra definiti ha fornito i risultati che saranno sintetizzati e discussi nel seguito del capitolo. Verranno discusse

con particolare attenzione le proprietà idrogeologiche attribuite alle fratture, in relazione alla loro importanza nella valutazione del comportamento idraulico dell'ammasso. La presentazione dei risultati è stata effettuata con l'ausilio delle funzionalità fornite dal software FracMan; gli isogrammi di frequenza sono mostrati nelle Figure 5.20-5.23.

In Tabella 5.8 vengono riportate le proprietà statistiche riassuntive del reticolo generato. Oltre ai valori medi, massimi, minimi e deviazione standard di permeabilità, trasmissività e apertura, vengono riportati anche i valori relativi alla densità del reticolo generato, sia in termini di dimensioni delle fratture che di intensità volumetrica di fratturazione, definita come il rapporto tra il volume delle fratture e il volume della regione di indagine, nel caso specifico individuata nell'ammasso di quarzo (parallelepipedo interno nei modelli). Vengono infine riportati i parametri relativi alla forma e alla resistenza delle fratture, definite in termini di JRC e JCS. I dati presentati sono suddivisi nelle quattro famiglie che compongono il reticolo.

Un'ulteriore suddivisione dei dati presentati è stata effettuata sulla base delle soglie di apertura definite nel paragrafo 5.3.6: aperture minori di 1 mm (Gruppo 1), aperture comprese tra 1 e 3 mm (Gruppo 2) e aperture superiori ai 3 mm (Gruppo 3). Per ogni gruppo è stata definita una specifica correzione della permeabilità (Paragrafo 5.3.6); in Figura 5.22 sono riportati gli istogrammi delle permeabilità per le fratture generate suddivise nei tre gruppi.

In funzione della modellazione idrogeologica che sarà di seguito sviluppata, il totale delle fratture generate, senza distinzione per famiglie, è stato suddiviso in due sub set, denominati rispettivamente set "trasmissivo" e set "poco trasmissivo". La soglia di separazione dei due subset è stata definita in funzione della trasmissività delle fratture e dalla loro dimensione. In particolare sono state attribuite al set poco trasmissivo le fratture con trasmissività inferiore a $1e-3 \text{ m}^2/\text{s}$ e raggio equivalente inferiore a 30m. I parametri statistici riassuntivi dei due set sono mostrati in Tabella 5.8 insieme alle statistiche ricavate per ognuno dei tre gruppi in cui sono state suddivise le famiglie generate e alle statistiche relative alla totalità dei dati. Nel set trasmissivo ricadono invece tutte le altre.

	All	Poco Trasmiss.	Trasmissive	K1<1mm	K1_1-3mm	K1>3mm	K2<1mm	K2_1-3mm	K2>3mm	K4<1mm	K4_1-3mm	K4>3mm	K5<1mm	K5_1-3mm	K5>3mm
Fracture Statistics															
P32/P33 Volume (mc)	1.64E+07	1.64E+07	1.64E+07	1.64E+07	1.64E+07	1.64E+07	1.64E+07	1.64E+07	1.64E+07	1.64E+07	1.64E+07	1.64E+07	1.64E+07	1.64E+07	1.64E+07
Number of Fractures	2.51E+06	2.51E+06	8.50E+01	2.91E+05	1.32E+05	1.12E+05	4.50E+05	2.01E+05	2.04E+05	4.91E+05	2.32E+05	2.30E+05	9.32E+04	4.64E+04	2.79E+04
P32 (fracArea/volume)	2.91E+00	2.87E+00	3.89E-02	3.78E-01	1.73E-01	1.50E-01	4.23E-01	1.92E-01	1.97E-01	6.39E-01	3.03E-01	2.95E-01	9.36E-02	4.49E-02	2.46E-02
P33 (fracVolume/volume)	8.97E-03	8.90E-03	7.03E-05	1.46E-04	3.10E-04	1.51E-03	1.56E-04	3.46E-04	2.24E-03	2.39E-04	5.38E-04	3.20E-03	4.00E-05	7.72E-05	1.85E-04
Mean pole (trend, plunge)				8, 33	8, 33	8, 33	092, 04	092, 04	092, 04	195, 23	195, 23	195, 23	333, 73	333, 73	333, 73
Equivalent Radius mean (m)	2.05E+00	2.05E+00	4.61E+01	2.17E+00	2.17E+00	2.18E+00	1.87E+00	1.87E+00	1.87E+00	2.17E+00	2.17E+00	2.17E+00	1.88E+00	1.87E+00	1.86E+00
Equivalent Radius std dev	1.36E+00	1.33E+00	1.62E+01	1.44E+00	1.45E+00	1.51E+00	1.19E+00	1.23E+00	1.24E+00	1.44E+00	1.45E+00	1.40E+00	1.30E+00	1.24E+00	1.06E+00
Equivalent Radius min	5.86E-01	5.86E-01	3.00E+01	5.86E-01	8.50E-01	9.83E-01	7.44E-01	7.36E-01	7.36E-01	7.15E-01	8.58E-01	7.36E-01	8.54E-01	6.52E-01	8.60E-01
Equivalent Radius max	1.36E+02	1.36E+02	9.55E+01	1.18E+02	9.55E+01	1.00E+02	7.56E+01	9.65E+01	1.12E+02	1.03E+02	8.17E+01	8.65E+01	1.36E+02	7.48E+01	2.64E+01
Fracture Properties:															
Aperture, mean (m)	3.07E-03	3.07E-03	1.80E-03	3.81E-04	1.77E-03	9.79E-03	3.68E-04	1.78E-03	1.13E-02	3.80E-04	1.78E-03	1.09E-02	4.23E-04	1.74E-03	7.52E-03
Aperture, std dev	6.64E-03	6.64E-03	4.33E-04	2.71E-04	5.60E-04	9.79E-03	2.73E-04	5.62E-04	1.14E-02	2.73E-04	5.61E-04	1.10E-02	2.66E-04	5.51E-04	6.76E-03
Aperture, min	1.44E-07	1.44E-07	1.16E-03	3.98E-07	1.00E-03	3.00E-03	1.44E-07	1.00E-03	3.00E-03	2.29E-07	1.00E-03	3.00E-03	2.47E-06	1.00E-03	3.00E-03
Aperture, max	5.00E-02	5.00E-02	2.63E-03	1.00E-03	3.00E-03	5.00E-02	1.00E-03	3.00E-03	5.00E-02	1.00E-03	3.00E-03	5.00E-02	1.00E-03	3.00E-03	5.00E-02
Permeability, mean (m/s)	2.91E-01	2.91E-01	1.29E+00	4.35E-02	1.10E+00	2.00E-05	4.17E-02	1.10E+00	2.00E-05	4.35E-02	1.10E+00	2.00E-05	4.97E-02	1.11E+00	2.00E-05
Permeability, std dev	5.22E-01	5.22E-01	3.37E-01	5.13E-02	4.96E-01	5.01E-06	5.10E-02	4.98E-01	4.99E-06	5.15E-02	4.98E-01	5.00E-06	5.26E-02	4.88E-01	5.00E-06
Permeability, min	4.15E-09	4.15E-09	4.03E-01	3.15E-08	5.71E-03	1.21E-07	4.15E-09	5.70E-03	3.69E-07	1.05E-08	5.73E-03	1.69E-07	1.21E-06	5.70E-03	9.69E-07
Permeability, max	1.68E+00	1.68E+00	1.68E+00	3.94E-01	1.68E+00	4.08E-05	3.27E-01	1.68E+00	4.48E-05	2.79E-01	1.68E+00	4.35E-05	1.99E-01	1.68E+00	4.16E-05
Trasmissivity, mean (m ² /s)	4.65E-04	4.65E-04	2.24E-03	3.00E-05	1.84E-03	1.96E-07	2.87E-05	1.84E-03	2.25E-07	3.01E-05	1.85E-03	2.18E-07	3.46E-05	1.85E-03	1.51E-07
Trasmissivity, std dev	8.97E-04	8.97E-04	5.86E-04	4.63E-05	8.86E-04	2.08E-07	4.57E-05	8.86E-04	2.40E-07	4.64E-05	8.86E-04	2.32E-07	4.83E-05	8.79E-04	1.46E-07
Trasmissivity, min	5.99E-16	5.99E-16	1.06E-03	1.26E-14	1.71E-05	2.52E-09	5.99E-16	1.71E-05	3.64E-09	2.40E-15	1.72E-05	8.79E-10	3.00E-12	1.71E-05	4.06E-09
Trasmissivity, max	2.95E-03	2.95E-03	2.95E-03	3.48E-04	2.95E-03	1.84E-06	2.13E-04	2.95E-03	2.04E-06	2.61E-04	2.95E-03	1.88E-06	1.99E-04	2.95E-03	1.60E-06
Compressibility, mean (KPa)	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06
Compressibility, std dev	6.78E-12	6.78E-12	0.00E+00	1.95E-12	1.51E-12	1.33E-12	2.06E-12	1.80E-12	1.81E-12	2.08E-12	1.87E-12	1.86E-12	1.05E-12	1.01E-12	8.16E-13
Compressibility, min	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06
Compressibility, max	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06	1.00E-06
JRC, mean	9	9	9	10	10	10	8	8	8	9	9	10	10	10	10
JRC, std dev	3	3	3	4	4	4	2	2	2	2	3	2	0	0	0
JRC, min	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10	10
JRC, max	20	20	17	20	20	20	18	18	18	20	20	20	10	10	10
JCS, mean	47	47	46	42	42	42	49	49	50	47	47	47	45	45	45
JCS, std dev	4	4	4	2	2	2	5	5	5	3	3	3	0	0	0
JCS, min	27	27	39	31	33	34	27	28	29	34	34	35	45	45	45
JCS, max	73	73	58	51	51	51	73	72	72	60	62	59	45	45	45

Tabella 5.8: Principali proprietà statistiche del reticolo generato suddiviso nelle classi di apertura delle 4 famiglie e successivamente accorpate nei due set “poco trasmissive” e “trasmissive” sulla base della trasmissività e del raggio delle fratture (vedi capitolo 5.6). Le faglie non sono state considerate nell’analisi. La colonna “all” si riferisce alla totalità delle fratture generate, Le due colonne “trasmissive” e “Poco trasm.” riportano gli statistici dei due gruppi definiti sulla base della trasmissività e della dimensione delle fratture. I Dati relativi alle famiglie sono stati suddivisi in tre gruppi in funzione dell’apertura delle discontinuità

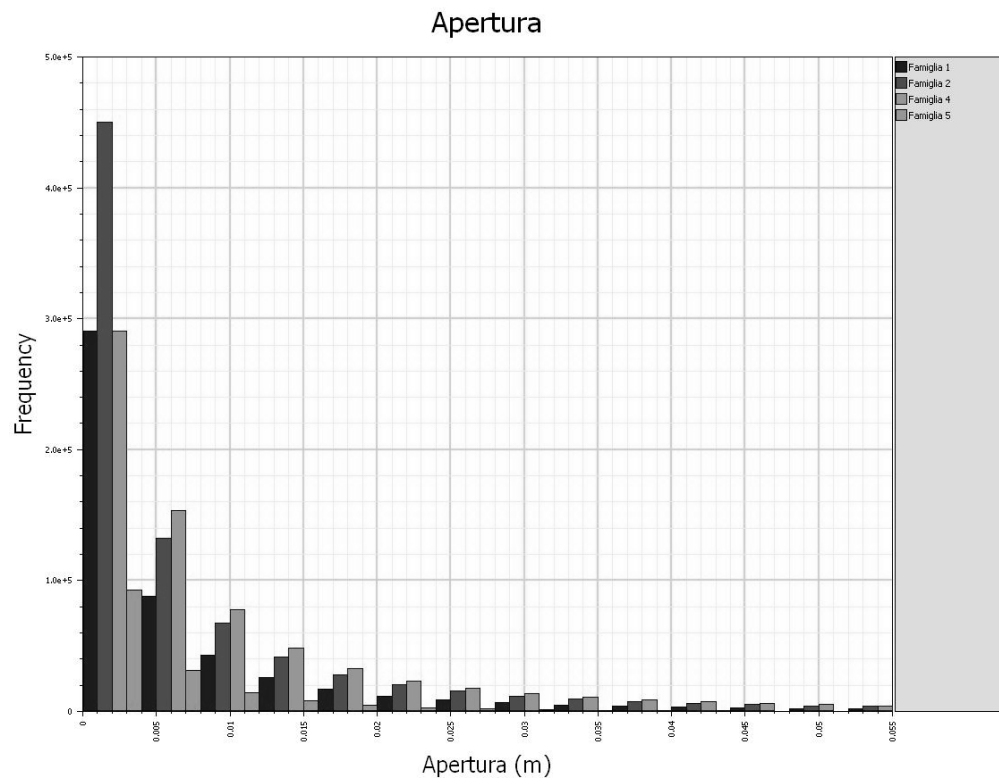


Figura 5.20: Istogramma di distribuzione delle aperture per le 4 famiglie generate dal modello stocastico. La scala delle ascisse è compresa tra 0 e 0.05 metri.

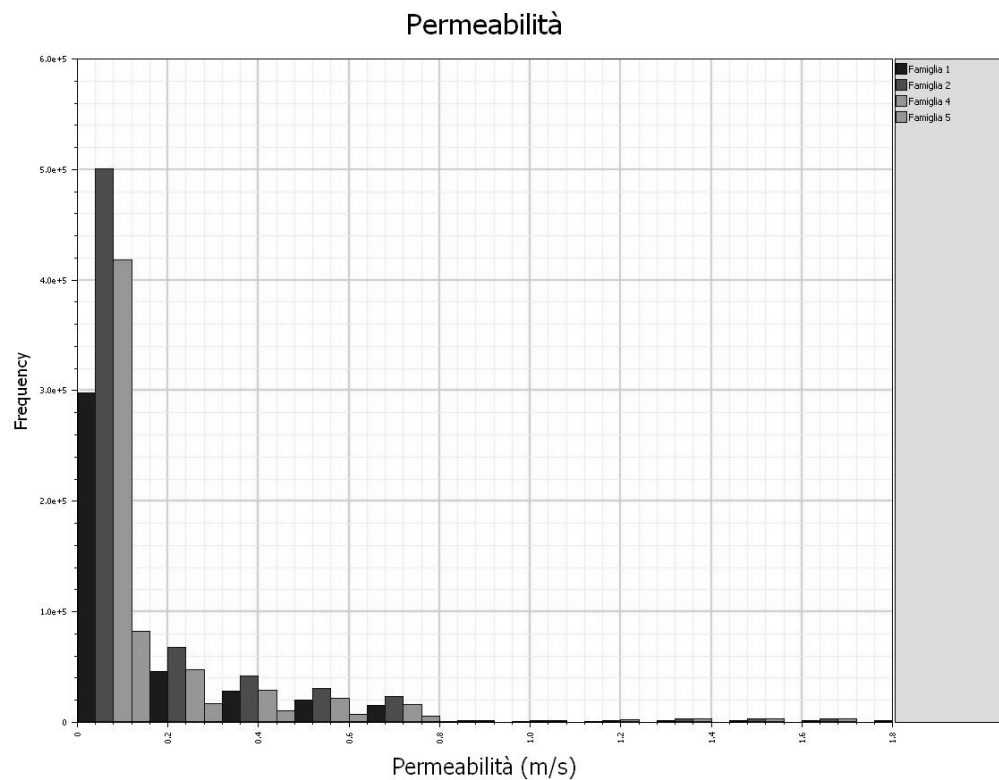


Figura 5.21: : Istogramma di distribuzione delle permeabilità per le 4 famiglie generate dal modello stocastico. Scala delle ascisse compresa tra 0 e 1.8 m/s

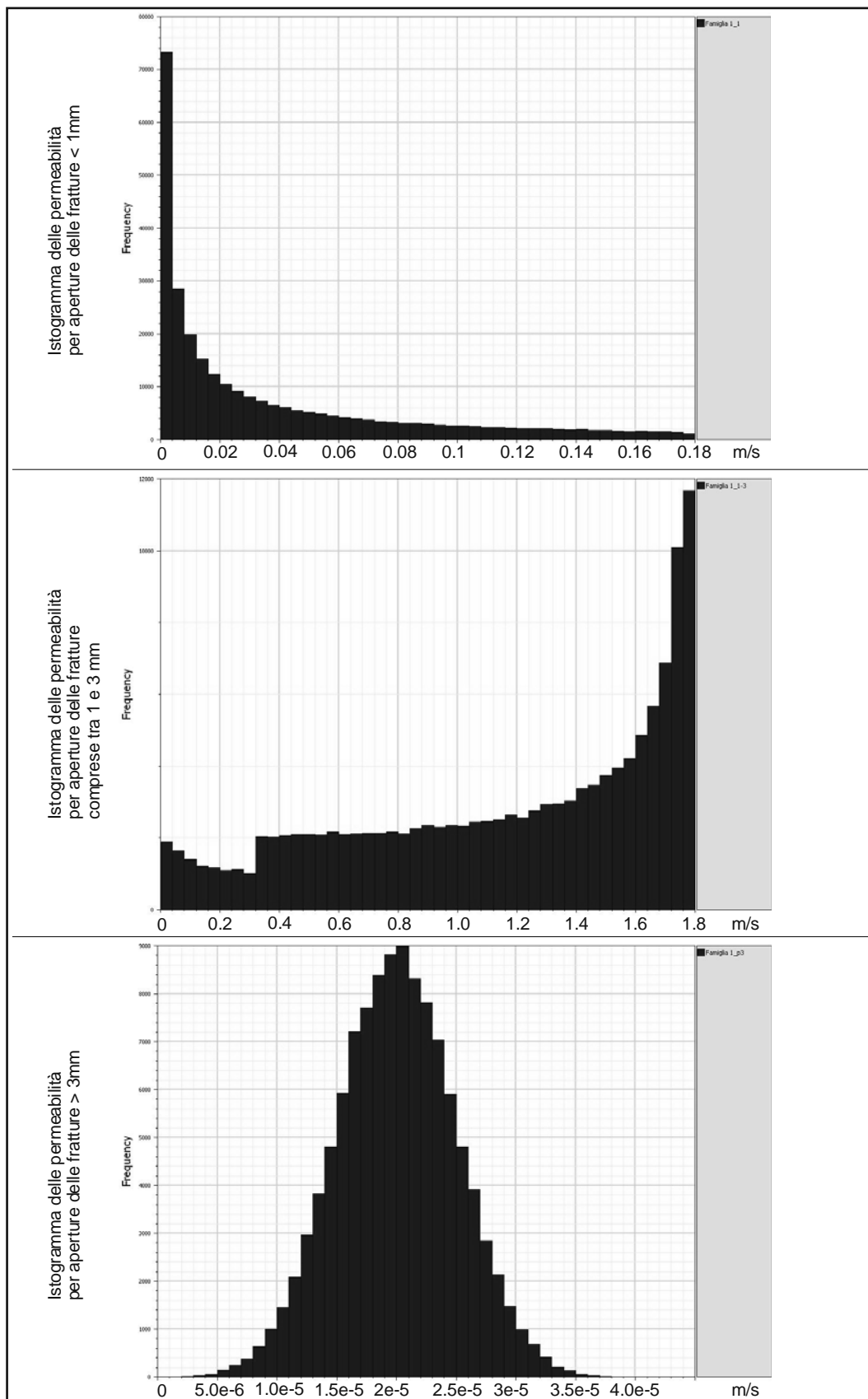


Figura 5.22: Istogrammi di permeabilità suddivisi in classi di apertura delle fratture; in alto è rappresentato il Gruppo 1 (aperture inferiori ad 1 mm); in centro il Gruppo 2 (aperture comprese tra 1 e 3 mm); in basso il gruppo 3 (aperture maggiori di 3 mm).

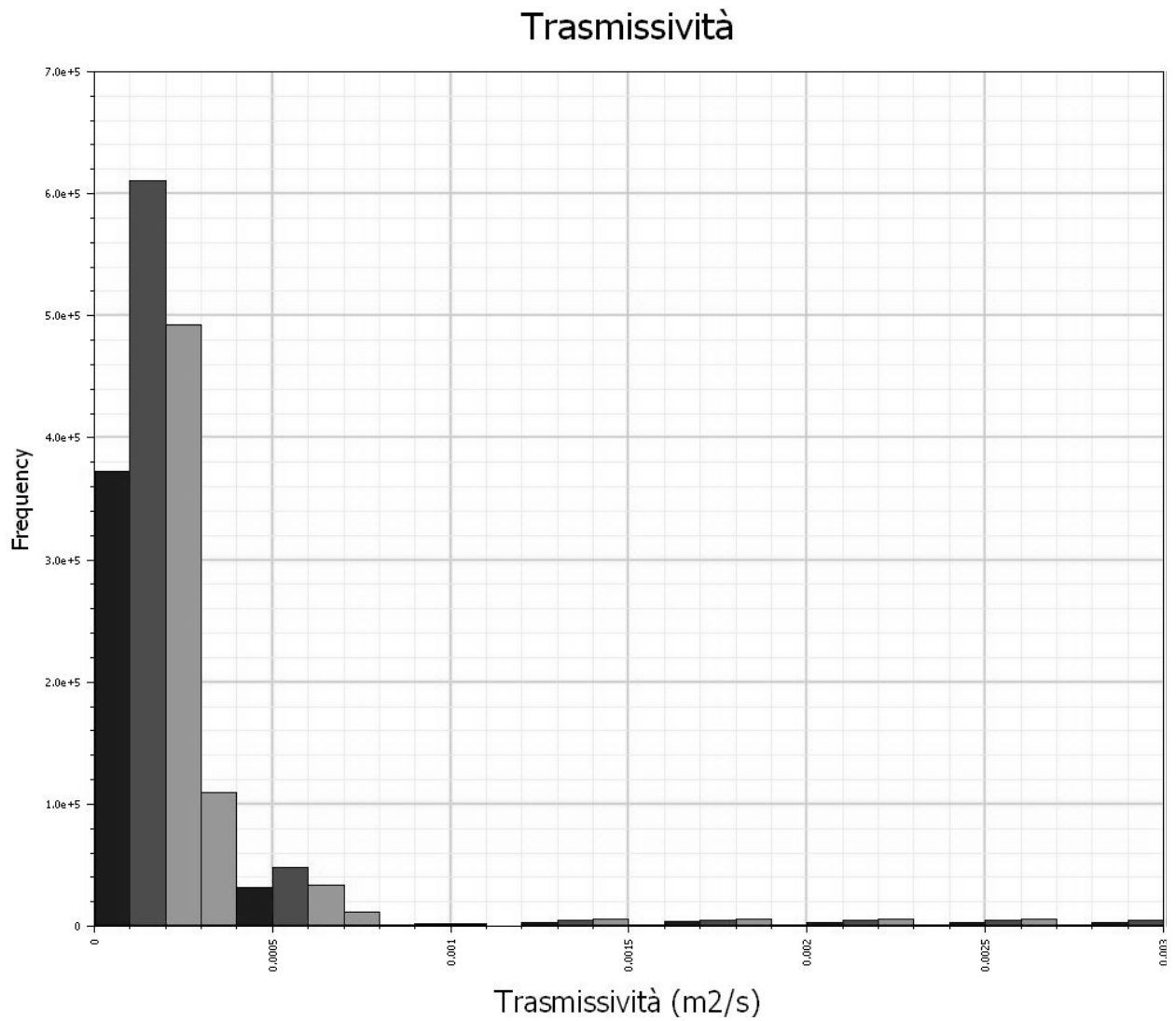


Figura 5.23: Istogramma di distribuzione delle trasmissività per le 4 famiglie generate dal modello stocastico.

5.5 Validazione Modello

La validazione dei modelli è stata effettuata confrontando i dati simulati con i dati rilevati nell'area di cava. Le proiezioni stereografiche delle fratture simulate sono state confrontate con quelle rilevate all'interno di volumi di controllo ove erano stati eseguiti i rilievi geomeccanici o dove erano state collezionate informazioni giaciture non georeferenziate singolarmente ma acquisite in un'area di posizione ed estensione nota. Le informazioni raccolte non avevano una precisa collocazione spaziale e non sono state utilizzate per il condizionamento dei modelli ma, essendo state misurate in un'area nota, possono essere utilizzate per la validazione dei modelli. Il software permette infatti di campionare le fratture del reticolo selezionando quelle che intersecano una determinata linea, superficie o volume. La procedura è stata applicata alle superfici ove erano stati eseguiti gli RGM, ai volumi ove erano state collezionate le informazioni giaciture non georeferenziate e a due stendimenti lineari (Figura 5.24). I risultati sono sintetizzati nelle Figure 5.25-5.28.

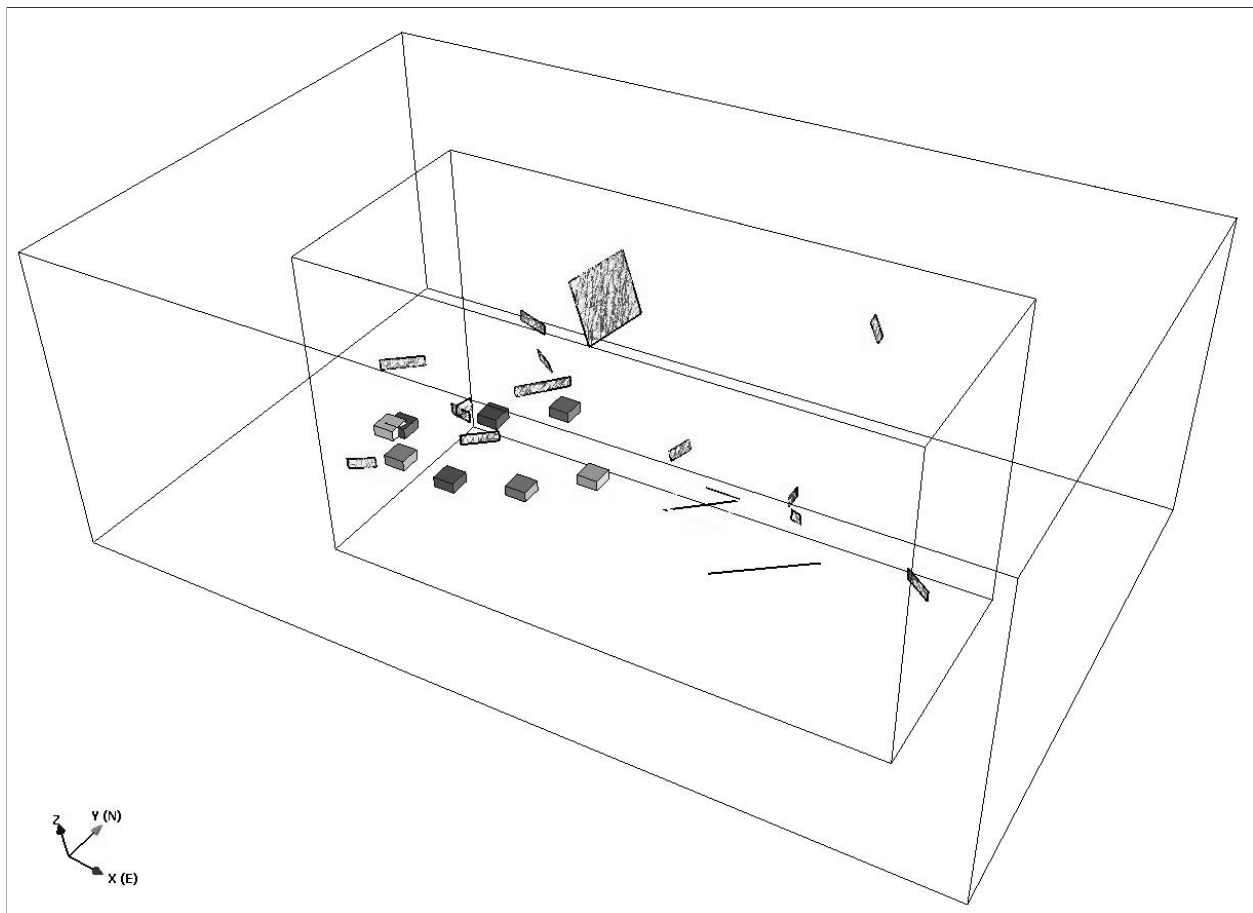
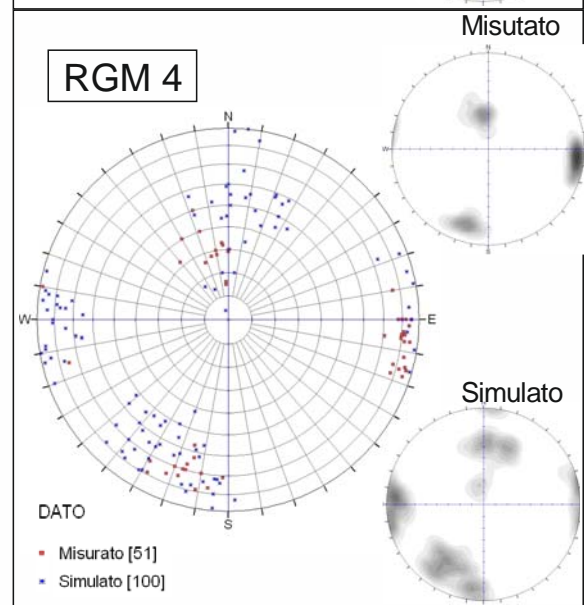
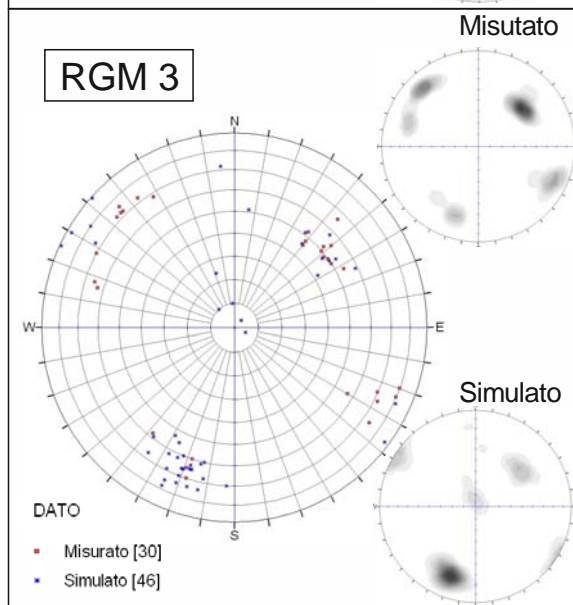
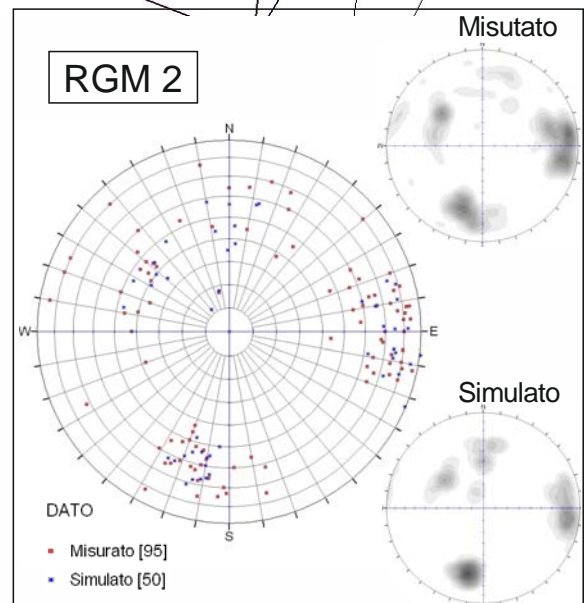
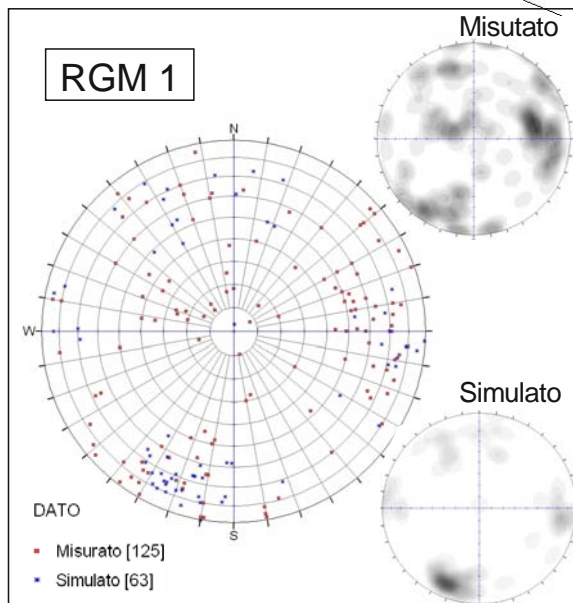
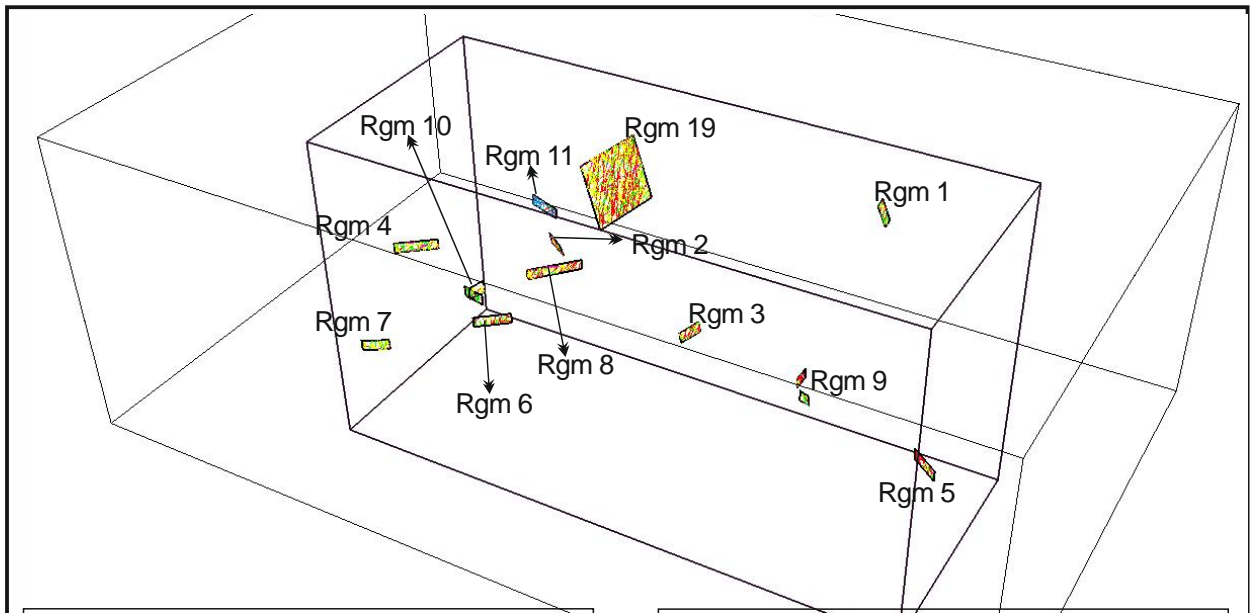
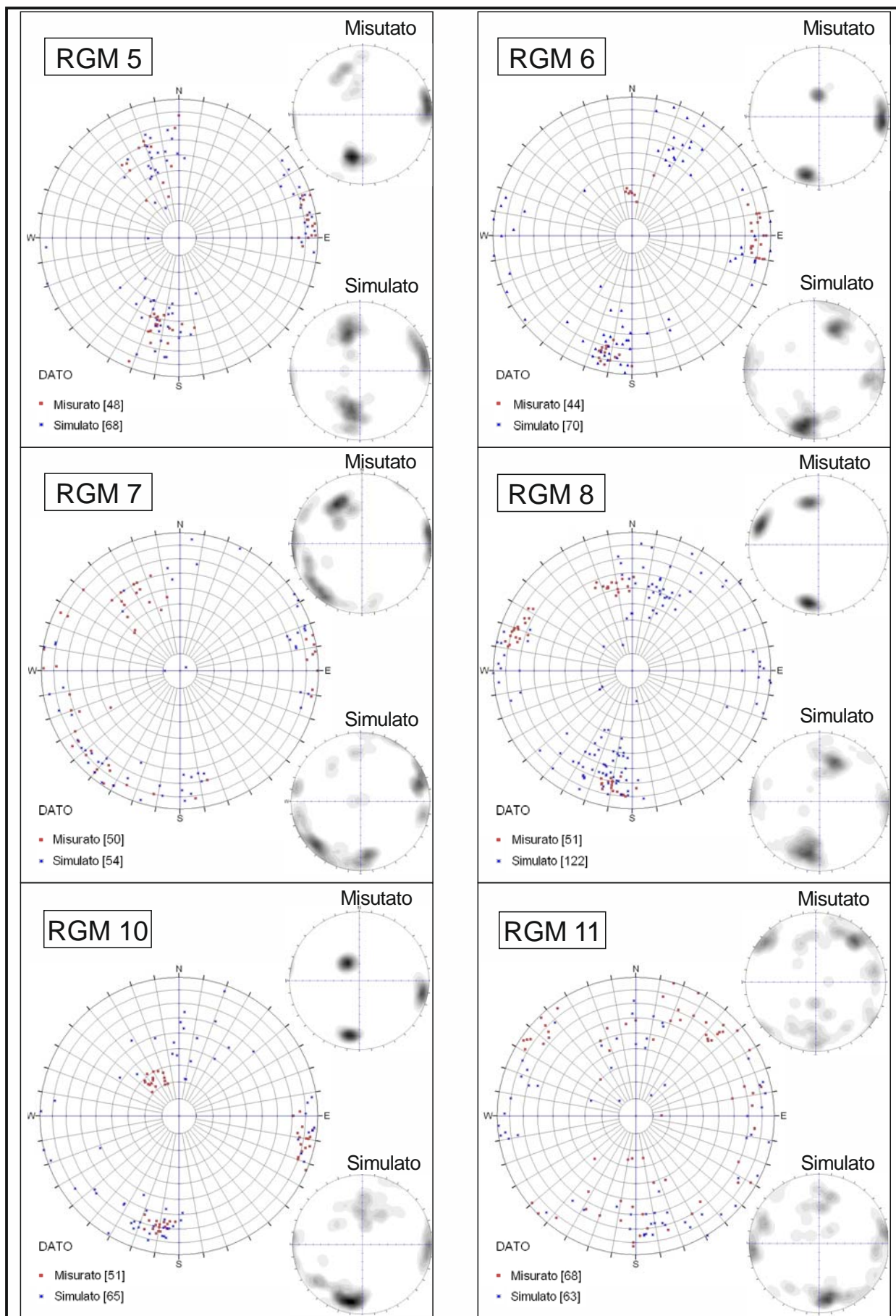
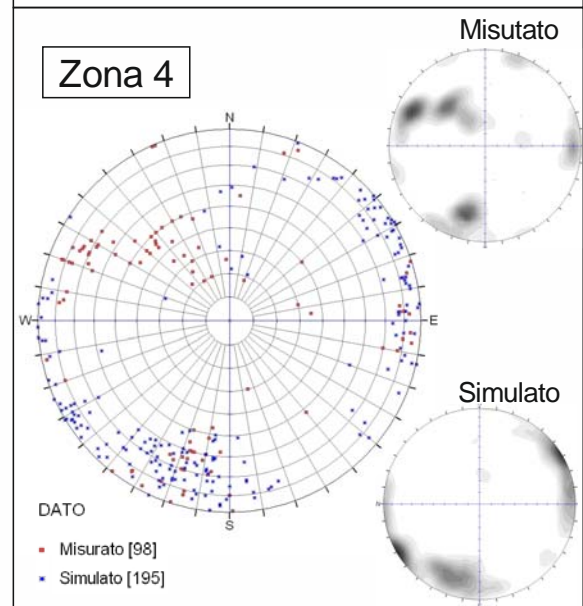
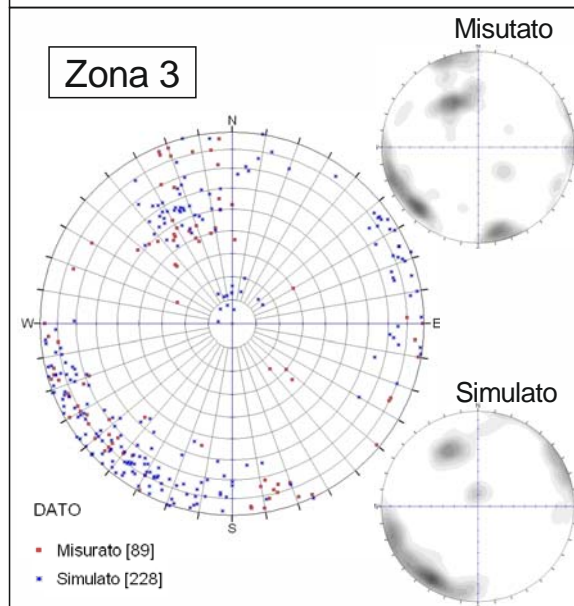
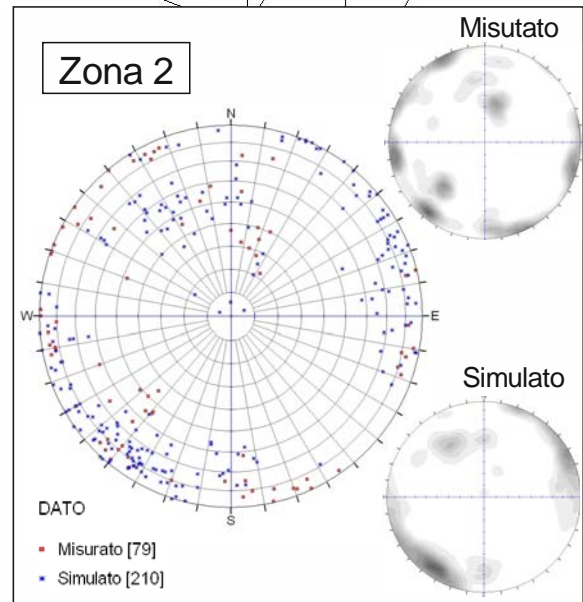
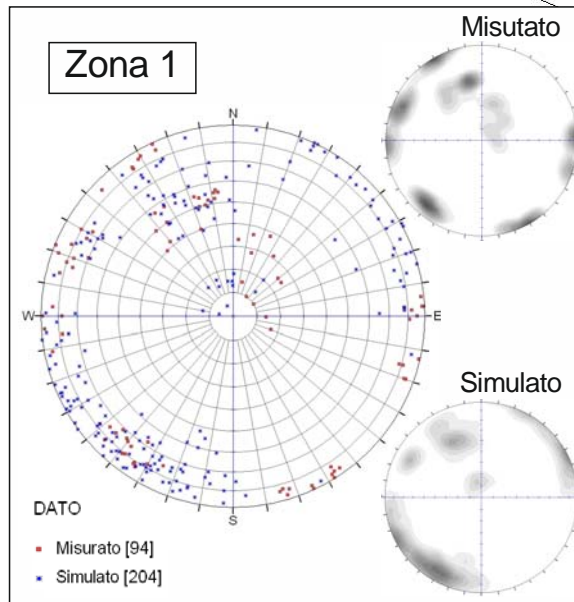
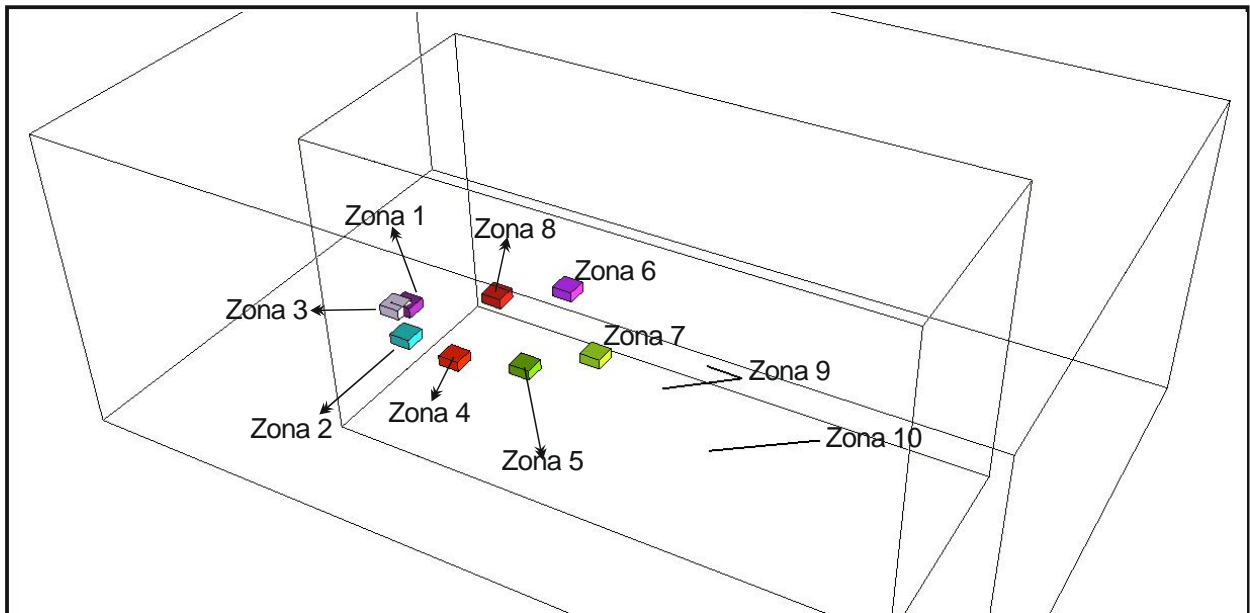


Figura 5.24: Posizione delle superfici e dei volume di campionamento del reticolo simulato. Le superfici hanno area e posizione corrispondente ai fronti dove sono stati eseguiti gli RGM. I parallelepipedi corrispondono alle aree di acquisizione delle giaciture non singolarmente georeferenziate e le linee rappresentano due stendimenti lineari







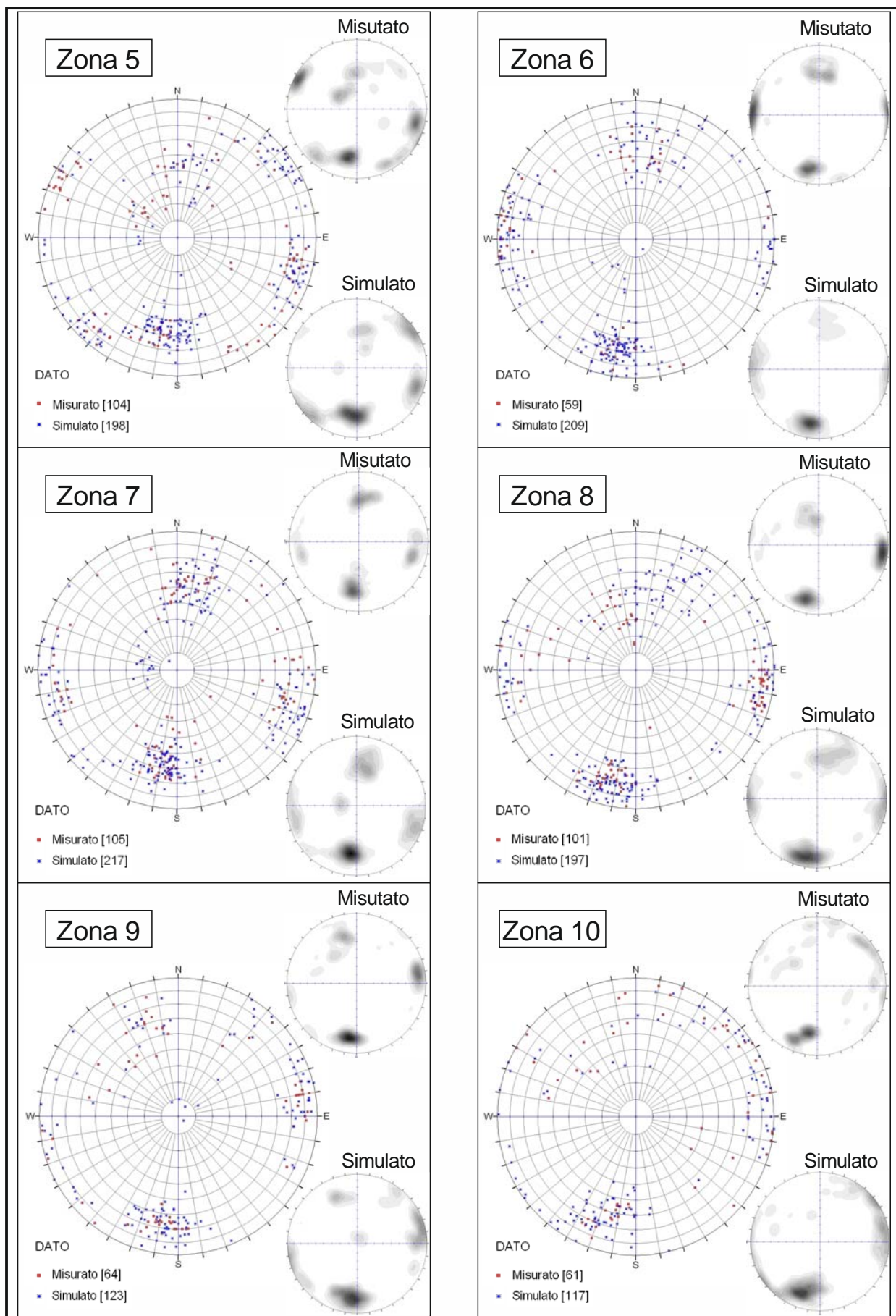


Figura 5.25 e Figura 5.26: (pagina 177-178) In alto: posizione delle tracemap che riproducono la posizione e l'estensione degli affioramenti su cui sono stati eseguiti i rilievi geomeccanici. In basso proiezioni stereografiche equiareali dei poli delle giaciture rilevate (in rosso) e delle fratture simulate (in blu).

Figura 5.27 e Figura 5.28: (pagina 179-180) In alto: posizione delle regioni che riproducono la posizione e l'estensione delle aree dove sono stati rilevati i dati giacitureali utilizzati per la validazione dei modelli. In basso proiezioni stereografiche equiareali dei poli delle giaciture rilevate (in rosso) e delle fratture simulate (in blu).

I dodici rilievi geomeccanici eseguiti in cava sono stati riportati nel modello FracMan sotto forma di superfici che rappresentano il fronte dell'ammasso su cui è stato eseguito il rilievo. Tali superfici sono quindi state intersecate con le fratture del reticolo simulato marcando sulle superfici le tracce delle intersezioni. Il set di fratture simulate che intersecano la superficie dell'affioramento è stato quindi esportato e utilizzato, insieme ai dati giacitureali rilevati durante l'esecuzione del rilievo geomeccanico, per costruire le proiezioni stereografiche riportate nelle Figure precedenti. In ogni proiezione stereografica risultano quindi sovrapposti i poli delle fratture simulate (riportate in blu) e i poli delle fratture rilevate sull'RGM. Gli istogrammi con le isolinee di densità dei poli, a complemento di ciascun RGM, sono riportati per facilitare la lettura e il confronto dei risultati ottenuti.

Si osserva in generale una buona corrispondenza tra i dati simulati e quelli misurati e appare ben simulata la forma delle dispersioni delle giaciture nei siti di misura. I dati simulati mostrano in generale un maggior grado di dispersione, in molti casi giustificabile con un certo livello di condizionamento dell'operatore nella raccolta dei dati che risultano eccessivamente concentrati attorno al valore medio atteso della famiglia, imputabile alle difficili condizioni ambientali e alla scarsa illuminazione in cui spesso ci si è trovati ad operare (RGM 6,8,10). In questi casi appare più realistica la dispersione dei dati simulati. Le famiglie 2 e 4 mostrano una corrispondenza molto buona tra i valori reali e quelli simulati. La famiglia 1 appare invece maggiormente problematica, in conseguenza della sua maggiore variabilità dell'orientazione media nei siti di misura che rende aleatorio definire una corretta legge di distribuzione da introdurre nei modelli di generazione. Anche in questo caso comunque, la simulazione risulta in grado di riprodurre con accuratezza sufficiente le caratteristiche del set. La famiglia 5 è caratterizzata da una densità di fratturazione minore delle altre due, con spaziatura media di qualche metro, tanto che spesso risulta espressa da pochissimi valori, tanto nelle misure reali che nei dati simulati. Anche per questa famiglia si ritiene che la corrispondenza tra i valori simulati e quelli misurati sia del tutto accettabile.

I risultati ottenuti dal confronto fra i valori misurati in porzioni specifiche dell'ammasso e i valori simulati all'interno di un volume che rispecchiano la dimensione e la posizione delle aree di acquisizione mostrano un'ottima corrispondenza tra i valori simulati e quelli reali. In questo caso i dati rilevati sono stati collezionati in maniera del tutto casuale e appaiono maggiormente dispersi rispetto a quelli degli RGM dove si evidenzia invece un certo grado di condizionamento nella selezione delle fratture. In tutte i casi considerati vi è un'ottima corrispondenza tra dati simulati e dati misurati.

Un ultimo tipo di confronto è stato fatto considerando anche la distribuzione delle tracce delle fratture sul piano d'affioramento, reale e simulato. È in questo caso possibile fare anche un confronto visivo tra l'aspetto dell'affioramento reale e di quello simulato, valutandone la somiglianza. La lunghezza delle tracce delle discontinuità per il caso reale e quello simulato è comunque stata analizzata con la metodologia già introdotta nel capitolo 5.3.5 e utilizzata per la derivazione della funzione di distribuzione della dimensione delle fratture. I risultati sono presentati nelle Figura 5.29 e 5.30 relative ai casi dell'RGM 19 e dell'RGM9. In entrambi i casi l'orientazione delle tracce reali e simulate sulla superficie dell'affioramento appare simile, come confermato dalle proiezioni stereografiche dei poli e dalle leggi di distribuzione delle lunghezze delle tracce, quasi perfettamente sovrapponibili almeno nel tratto centrale, non influenzato dall'effetto censoring dei dati.

Sfortunatamente non è stato possibile effettuare questo tipo d'analisi per la gran parte degli RGM effettuati in galleria data l'impossibilità tecnica di scattare fotografie dell'affioramento a una scala adatta al confronto con i dati simulati che riproducono esclusivamente le fratture principali, caratterizzate da spaziature mediamente superiori al metro e che necessitano quindi di affioramenti di grandi dimensioni per poter effettuare il confronto. Il caso presentato in Figura 5.29 è relativo all'affioramento RGM19 dove l'area della porzione intersecata dalle fratture rilevate è pari a 460 m^2 e l'area totale intersecata dalle fratture simulate è pari a 1050 m^2 . Il caso presentato in Figura 5.30 mostra invece le tracce delle fratture reali e simulate sovrapposte su un piano d'affioramento pari a circa 100 m^2 .

Concludendo e riassumendo i risultati dei confronti effettuati (per la validazione del reticolo simulato) tra le fratture reali e simulate, il reticolo simulato appare assolutamente realistico e rappresentativo delle caratteristiche del reticolo reale, sia per quanto riguarda l'orientazione delle fratture, la loro variabilità spaziale e la distribuzione delle lunghezze delle tracce in affioramento.

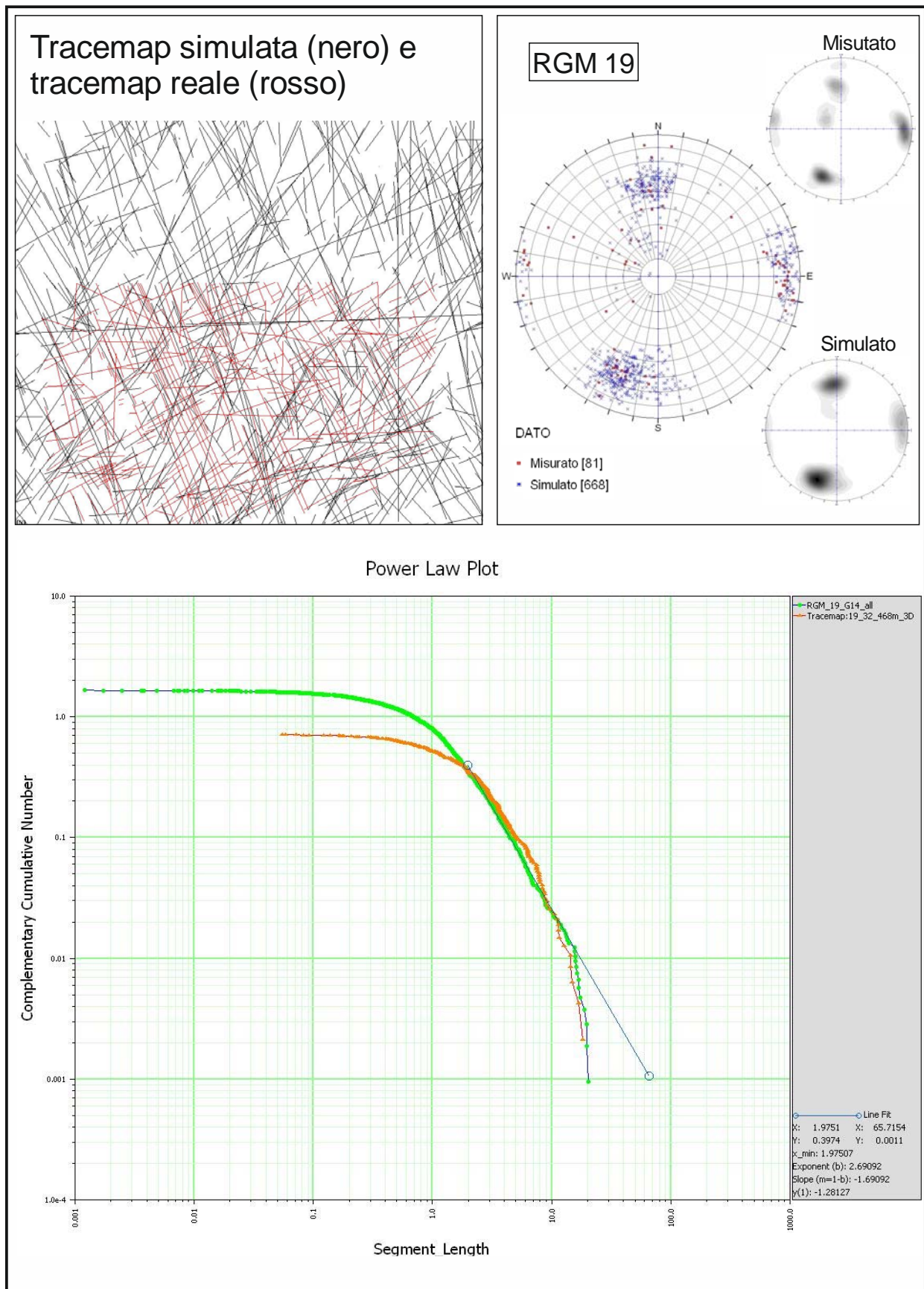


Figura 5.29: Confronto tra dati simulate e dati reali per l' RGM 19. In alto a sinistra: tracce delle fratture sul piano d'affioramento. In alto a destra: proiezioni stereografiche dei poli. In basso: CCDF delle tracce.

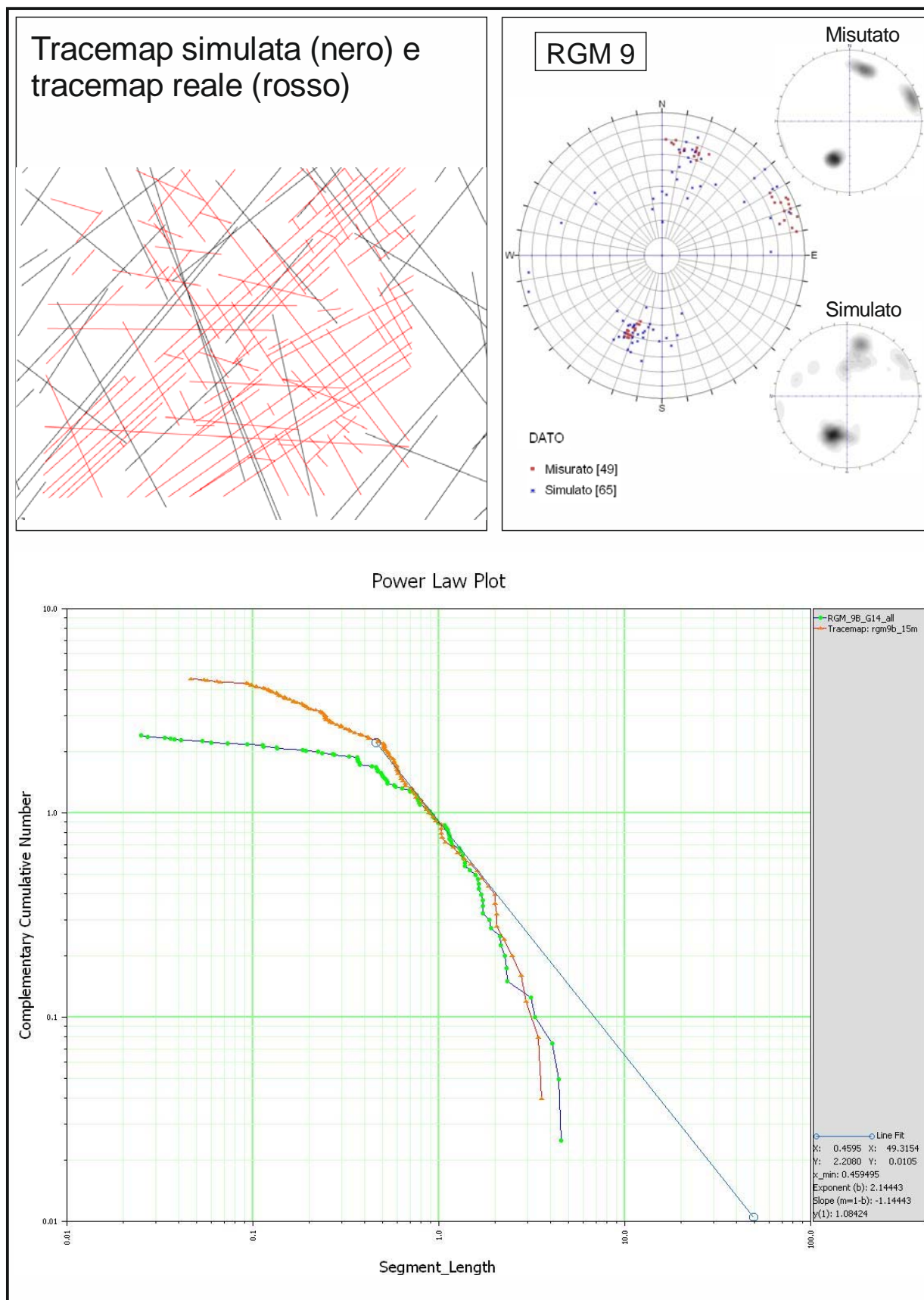


Figura 5.30: Confronto tra dati simulate e dati reali per l' RGM 19. In alto a sinistra: tracce delle fratture sul piano d'affioramento. In alto a destra: proiezioni stereografiche dei poli. In basso: CCDF delle tracce.

5.6 Modellazione di flusso

La progettazione di un modello numerico di flusso richiede l'accurata definizione delle caratteristiche geometriche del dominio di studio e l'individuazione dei processi che governano il flusso alla scala di interesse. In funzione del contesto idrogeologico e della scala d'analisi deve innanzi tutto essere scelto il tipo di modello da realizzare definendo il tipo di approccio più adatto tra le opzioni disponibili:

- Modelli continuo equivalenti
- Modelli discreti
- Modelli a duplice porosità

5.6.1 Introduzione teorica alla modellazione di flusso in FracMan

Fracman permette di effettuare la modellazione di flusso e trasporto idrico all'interno di un mezzo roccioso, tanto in regime stazionario che in transitorio, considerando sia il flusso nel reticolo di fratture che nella matrice. Il programma si interfaccia infatti in maniera completa con un software ausiliario, denominato MAFIC, anch'esso sviluppato dalla Golder Associated, che completa ed integra il pacchetto FracMan per l'analisi dei reticoli discreti.

Il flusso nelle fratture, considerate come elementi discreti, viene simulato in MAFIC utilizzando un approccio discreto tridimensionale agli elementi finiti. Il flusso nella matrice può invece essere simulato sia utilizzando l'approccio multidimensionale agli elementi finiti di Galerkin, sia utilizzando un approccio semplificato a blocchi di matrice, simile a quello utilizzato nei modelli convenzionali a doppia porosità (Kucuk e Sawyer, 1979).

Le condizioni al contorno dei modelli possono essere introdotte sia come condizioni a carico costante (Dirichlet) sia a flusso costante (Neumann). In entrambi i casi le condizioni possono essere costanti o variabili nel tempo.

L'equazione di diffusività che descrive il flusso nelle discontinuità, utilizzando un approccio continuo al bilancio di massa, può essere espressa da (Bear, 1972):

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\rho}{\mu} k_{ij} \left(\frac{\partial P}{\partial x_i} + \rho g \frac{\partial z}{\partial x_i} \right) \right] = \rho(\alpha + \phi B) \frac{\partial P}{\partial t} - q$$

Dove: ρ è la densità del fluido, μ la sua viscosità, k_{ij} la permeabilità assoluta, g l'accelerazione di gravità α la compressibilità dei pori, Φ la porosità, β la compressibilità del fluido, q le portate in afflusso e P è la pressione del fluido.

Per fluidi incompressibili e considerando il flusso nelle fratture con la semplificazione bidimensionale, l'equazione di conservazione di massa può essere espressa in maniera semplificata da un'equazione di conservazione del volume:

$$S \frac{\partial h}{\partial t} - T \overline{\nabla^2} h = q$$

Dove S è il coefficiente di immagazzinamento della frattura, h il carico idraulico, T la trasmissività di una frattura, q le portate affluenti/defluenti e $\overline{\nabla^2}$ è il laplaciano in due dimensioni.

Per la soluzione dell'equazione di diffusività MAFIC utilizza il modello risolutivo di Galerkin agli elementi finiti, approssimando l'equazione come:

$$\sum_{m=1}^N \left[\int_R (T_{mm} \overline{\nabla} \xi_n \cdot \overline{\nabla} \xi_m dR) h_m \right] + \sum_{m=1}^N \left[\int_R (S_{mm} \xi_n \cdot \xi_m dR) \frac{dh_m}{dt} \right] = \int_R (q \xi_n dR) \quad \text{con } n = 1, 2, \dots, N$$

Dove ξ è la funzione di base lineare o quadratica, R l'area dell'elemento, e N il numero di nodi.

Per quanto riguarda il flusso nella matrice rocciosa, l'equazione di diffusività che governa il flusso in campo tridimensionale per un mezzo poroso può essere espressa nella forma:

$$S_s \frac{\partial h}{\partial t} - K \overline{\nabla^3} h = q$$

Dove S_s è il coefficiente di immagazzinamento specifico, K la conducibilità idraulica e $\overline{\nabla^3}$ è il laplaciano tridimensionale. Tale equazione viene utilizzata in MAFIC per descrivere analiticamente il flusso nella matrice e come nel caso precedente viene risolta utilizzando l'approssimazione di Galerkin di cui si tralascia la trattazione matematica che esula dagli obiettivi di questa tesi.

MAFIC permette di simulare il flusso nella matrice secondo due diversi approcci: nel primo, definito "Fully Discretized Matrix Approach" gli elementi della matrice vengono completamente

discretizzati utilizzando una maglia tetraedrica, mentre nel secondo, denominato “Matrix Block Approach” viene utilizzato un approccio semplificato che prevede l’utilizzo di blocchi generici di matrice utilizzati per la simulazione del flusso all’interno della matrice interposta fra le fratture discrete.

L’utilizzo dell’approccio del blocco generico implica la definizione di un unico blocco di matrice, uguale per tutte le discontinuità del reticolo, senza differenza di forma, grandezza e parametri idraulici tra i blocchi.

I blocchi generici possono avere forma sferica o rettangolare, in funzione delle caratteristiche geometriche del reticolo. Reticoli costituiti in prevalenza da fratture parallele richiedono l’utilizzo di blocchi rettangolari, mentre per reticolo complessi, formati da fratture ortogonali o orientate casualmente nello spazio, è preferibile l’utilizzo di blocchi sferici. Ogni blocco di matrice è considerato in connessione idraulica con le fratture che lo confinano, e ad ogni nodo del reticolo che discretizza le fratture viene associata una porzione del contorno del blocco di matrice uguale all’area di ogni frattura in contatto con esso. Il raggio del generico blocco che viene determinato rispettando due condizioni: 1) L’area totale dei blocchi deve uguagliare l’area totale delle fratture presenti nel reticolo e 2) il volume totale della regione di simulazione deve uguagliare il volume totale dei blocchi. Il codice è in grado di calcolare automaticamente il raggio del blocco medio di matrice che soddisfa le due condizioni precedenti, che risulta, nel caso dei blocchi sferici pari a $3V_{regione}/2A_{fratture}$ lasciando comunque all’operatore la possibilità di specificare il parametro in funzione delle caratteristiche specifiche del reticolo. La semplificazione introdotta dal metodo a blocchi semplificati determina un notevole risparmio in termini di tempi di calcolo ma è concettualmente applicabile solo in quelle situazioni in cui il flusso avviene in maniera predominante all’interno delle fratture ossia in quelle situazioni in cui la conduttività delle fratture è molto maggiore di quella della matrice e riesce a simulare in maniera adeguata il comportamento di un mezzo in cui il flusso avviene principalmente nelle fratture mentre la maggior parte dell’acqua presente è immagazzinata nella matrice. Un’importante limitazione del metodo risiede però nell’incapacità di simulare il flusso tra fratture non interconnesse, collegate da porzioni di matrice. Il modello non considera infatti la possibilità di flusso tra blocchi di matrice diversi e non è quindi applicabile in situazioni dove il flusso nella matrice sia dominante. Quando applicabile, comunque, il metodo a blocchi di matrice è generalmente in grado di produrre buoni risultati con tempi di calcolo notevolmente inferiori rispetto all’altro tipo di approccio.

Per la soluzione delle equazioni di flusso MAFIC utilizza l'algoritmo ICCG (incomplete-Cholesky conjugate gradient), proposto da Meijerink e Van der Vorst (1977) basato sul metodo del "gradiente coniugato" per la definizione del minimo di una funzione (Hestenes e Steifel, 1952). Il metodo della decomposizione parziale di Cholesky permette di decomporre solo i termini non nulli della matrice di flusso, determinando un notevole risparmio in termini di memoria e tempo computazionale. La condizione di convergenza dell'algoritmo di calcolo è definita dall'operatore mediante il parametro "TOL". Il modello viene quindi considerato all'equilibrio quando:

1. la massima variazione, tra due iterazioni successive, di carico idraulico ai nodi è minore di TOL volte la differenza tra il carico idraulico maggiore e quello minore.
2. Il massimo valore del flusso non bilanciato ai nodi è minore di TOL volte la somma dei valori assoluti dei flussi netti ai nodi.

Un TOL di $1e-6$ è in genere sufficiente a garantire la convergenza dei modelli.

Caratteristiche dei modelli realizzati.

Fracman permette di simulare le modalità della circolazione sotterranea, ai fini di un controllo della risorsa, ma anche di stimare la distribuzione della velocità di flusso nelle singole fratture, e di indagare problematiche relative al trasporto di contaminanti. La modellazione può essere condotta sia in condizioni stazionarie che transitorie.

Il programma permette di eseguire le simulazioni di flusso sul reticolo di fratture generate dal processo stocastico sia attraverso procedure d'analisi effettuate sulle fratture componenti il reticolo considerate come elementi individuali, discretizzate attraverso un processo di tassellizzazione tridimensionale, sia ricavando le proprietà idrauliche equivalenti per le celle di una griglia a maglia regolare sovrapposta al dominio spaziale di interesse, utilizzandola per la modellazione del flusso secondo un modello di tipo "continuo equivalente".

Calcolo delle proprietà continuo-equivalenti.

Dato un reticolo di fratture discrete e una griglia che definisce le celle di un mezzo continuo equivalente, le proprietà che è necessario attribuire alle celle della griglia sono riassunte nell'elenco seguente:

- Porosità dovuta alle fratture ($P33$), definita come il volume totale delle fratture contenute in una cella (prodotto dell'area per l'apertura della frattura), diviso per il volume della cella.
- Intensità di fratturazione volumetrica ($P32$), definita come il numero di fratture per unità di volume della cella; rappresenta una sorta di conteggio normalizzato delle fratture contenute in ogni cella.
- Raggio equivalente della matrice (R_MTX): definisce la porzione volumetrica di una cella che è drenata da ogni frattura, e si ottiene dividendo il volume della cella per il numero di fratture in essa contenute.
- Fattore SIGMA: questo parametro è una misura del rapporto tra il flusso che avviene entro la matrice e il flusso all'interno delle fratture.
- Tensori di permeabilità equivalente.

Il calcolo della permeabilità del mezzo continuo equivalente viene effettuato dal software utilizzando due approcci concettuali alternativi: il primo denominato *ODA* (Oda, 1985 e 1986) e il secondo *BLOK K*.

Il fattore sigma viene calcolato per ogni cella misurando la spaziatura tra le fratture del reticolo lungo le tre direzioni X , Y e Z ; vengono quindi sommati i reciproci dei quadrati dei valori ottenuti e il risultato viene moltiplicato per quattro. Il valore ottenuto permette di caratterizzare le caratteristiche del flusso nel reticolo: se la spaziatura lungo una direzione è molto maggiore di quella nelle rimanenti 2 il fattore sigma risulterà elevato, ad indicare una tipologia di flusso di tipo “colonnare” (a sviluppo prevalentemente monodimensionale). Se la spaziatura in una direzione è molto minore delle altre due il fattore sigma sarà intermedio e il flusso sarà di tipo “tabulare” (a sviluppo prevalentemente bidimensionale). Se la spaziatura nelle tre dimensioni è simile, il fattore sigma sarà piccolo e il flusso risulterà di tipo “equidirezionale ” (a sviluppo tridimensionale). L'algoritmo di calcolo del fattore sigma fornisce, oltre al fattore sigma, altri quattro parametri aggiuntivi ad esso collegati: Il *VOLUME SIGMA* del blocco, che rappresenta il volume medio dei blocchi di matrice isolati dalle fratture, e le *DIMENSIONI SIGMA* nelle tre direzioni X , Y e Z , che rappresentano la lunghezza media dei blocchi di matrice nelle tre dimensioni di riferimento. L'algoritmo di calcolo del fattore sigma permette, in opzione, di calcolare altri due fattori di forma aggiuntivi: Il fattore di forma di “Warren and Root” e quello di “Gilman e Kazemi”.

L'algoritmo *ODA* per il calcolo della permeabilità equivalente permette di calcolare sia i tensori principali di permeabilità nelle tre direzioni principali sia le nove componenti del tensore di permeabilità. Il calcolo della permeabilità equivalente viene effettuato proiettando l'area delle fratture nella cella nel piano parallelo alla direzione del flusso. La proiezione dell'area della frattura è data dal prodotto scalare del polo della frattura e del vettore direzione del flusso, moltiplicato per l'area totale della frattura. L'area così proiettata viene quindi moltiplicata per la trasmissività della frattura. I risultati per ogni frattura vengono quindi sommati tra loro e divisi per l'altezza della cella della griglia. Il calcolo viene quindi ripetuto per le tre direzioni *X*, *Y* e *Z* della griglia. Il metodo *ODA* si basa sull'orientazione delle fratture presenti in una cella della griglia, espresse dal loro polo *n*. Integrando le fratture per tutte le normali *N*, si ottiene il momento di inerzia di massa delle normali delle fratture distribuite lungo una sfera unitaria:

$$N = \int_{\Omega/2} n_i n_j E(n) d\Omega$$

Dove:

N = numero di fratture in Ω

n_i, n_j = sono le componenti del vettore normale a una frattura *n*

E(n) = funzione di densità di probabilità che descrive il gruppo di fratture i cui poli unitari *n* sono orientati all'interno dell'angolo solido infinitesimo *dΩ*

Ω = angolo solido corrispondente alla sfera unitaria.

Per una certa cella contenente un numero di fratture di area totale *A_k* e trasmissività *T_k*, si può calcolare un tensore che definisce empiricamente le proprietà delle fratture sommando le fratture pesate in funzione della loro area e trasmissività:

$$F_{ij} = \frac{1}{V} \cdot \sum_{k=1}^N A_k \cdot T_k \cdot n_{ik} \cdot n_{jk}$$

Dove:

F_{ij} = è il tensore delle fratture

V = volume della cella

N = numero di fratture nella cella

A_k = area della *k*-esima frattura

T_k = trasmissività della k-esima frattura

n_{ik}, n_{jk} = sono le componenti del vettore normale alla k-esima frattura

Il metodo Oda deriva quindi il tensore di permeabilità da F_{ij} assumendo che F_{ij} esprima il flusso nelle fratture come un vettore allineato lungo il polo unitario della frattura. Assumendo che la frattura sia impermeabile nella direzione normale al piano della frattura, F_{ij} deve essere ruotato nei piani della permeabilità:

$$k_{ij} = \frac{1}{12} (F_{kk} \delta_{ij} - F_{ij})$$

Dove:

k_{ij} = è il tensore di permeabilità

F_{ij} = è il tensore delle fratture

δ_{ij} = è il delta di Kroenecker

Il calcolo della permeabilità equivalente col metodo *ODA* ha il notevole vantaggio, in termini di tempi di calcolo, di poter essere calcolata senza ricorrere a simulazioni di flusso, come avviene invece utilizzando il metodo *Block k*. Uno svantaggio del metodo è però rappresentato dal fatto che il calcolo non tiene conto dell'effetto delle dimensioni e dell'interconnettività delle fratture e deve quindi essere utilizzato solamente per reticoli ben interconnessi. Una variante del metodo, indicata *ODA Gold*, è comunque stata implementata nella versione più recente di *FracMan* e, se utilizzata, esegue una verifica dell'interconnettività delle fratture ed esclude dall'analisi quelle fratture che non fanno parte di un sistema interconnesso e che sono quindi ininfluenti ai fini del calcolo della permeabilità. Il metodo *Block K* non è stato utilizzato nelle modellazioni qui presentate a causa dell'eccessiva capacità computazionale richiesta dal metodo, tale da renderlo inapplicabile sul modello realizzato con l'hardware a nostra disposizione.

5.6.2 Implementazione dei modelli

I modelli di flusso sono stati realizzati all'interno di un dominio appositamente allargato nell'intorno della zona di interesse in modo da garantire che i limiti al contorno fossero sufficientemente lontani dalla zona di interesse da non influenzare in maniera irrealistica i risultati delle simulazioni. I modelli sono quindi stati realizzando considerando il cubo esterno rappresentato in Figura 5.8

Imprescindibili limiti di fattibilità numerica impongono di limitare fortemente il numero delle fratture che è possibile introdurre in un modello di flusso discreto. Per tale ragione si è scelto di utilizzare un approccio a doppia porosità, suddividendo le fratture del reticolo in due gruppi distinti. Al primo gruppo sono state attribuite le fratture caratterizzate da trasmissività maggiore di $1e-3 \text{ m}^2/\text{s}$ e raggio equivalente superiore ai 30m, mentre tutte le altre sono state classificate come appartenenti al secondo gruppo. Le fratture del primo gruppo, con l'aggiunta delle faglie presenti nell'area di cava, inserite nel modello come elementi deterministici caratterizzati dalle proprietà medie su di esse rilevate in sito, sono state inserite nei modelli come elementi discreti, mentre tutte le altre fratture, caratterizzate da minor trasmissività e/o dimensione, sono state utilizzate per ricavare i parametri idraulici equivalenti calcolati su una maglia di passo 5 metri sovrapposta all'area di studio. I modelli sono stati realizzati per indagare le caratteristiche della circolazione idrica nell'area della cava. Le condizioni al contorno sono state definite in considerazione della posizione delle sorgenti nel dominio adiacente all'area di cava, con le opportune assunzioni in considerazione degli scenari che si volevano indagare.

Caratteristiche delle fratture discrete

Come accennato nel capitolo precedente, le fratture costituenti il reticolo sono state suddivise in due gruppi sulla base della loro dimensione e trasmissività. Le fratture con raggio equivalente superiore ai 30m e con trasmissività maggiore di $1e-3 \text{ m}^2/\text{s}$ sono state raggruppate in un set specifico che è stato successivamente utilizzato per la modellazione della componente discreta dei modelli di flusso a duplice porosità. A questo set, denominato "Fratture conduttive e faglie" sono state attribuite anche le 7 faglie individuate in cava, inserite nei modelli come elementi deterministici. In Figura 5.31 sono mostrate le caratteristiche geometriche e i principali parametri idrogeologici delle discontinuità appartenenti al set.

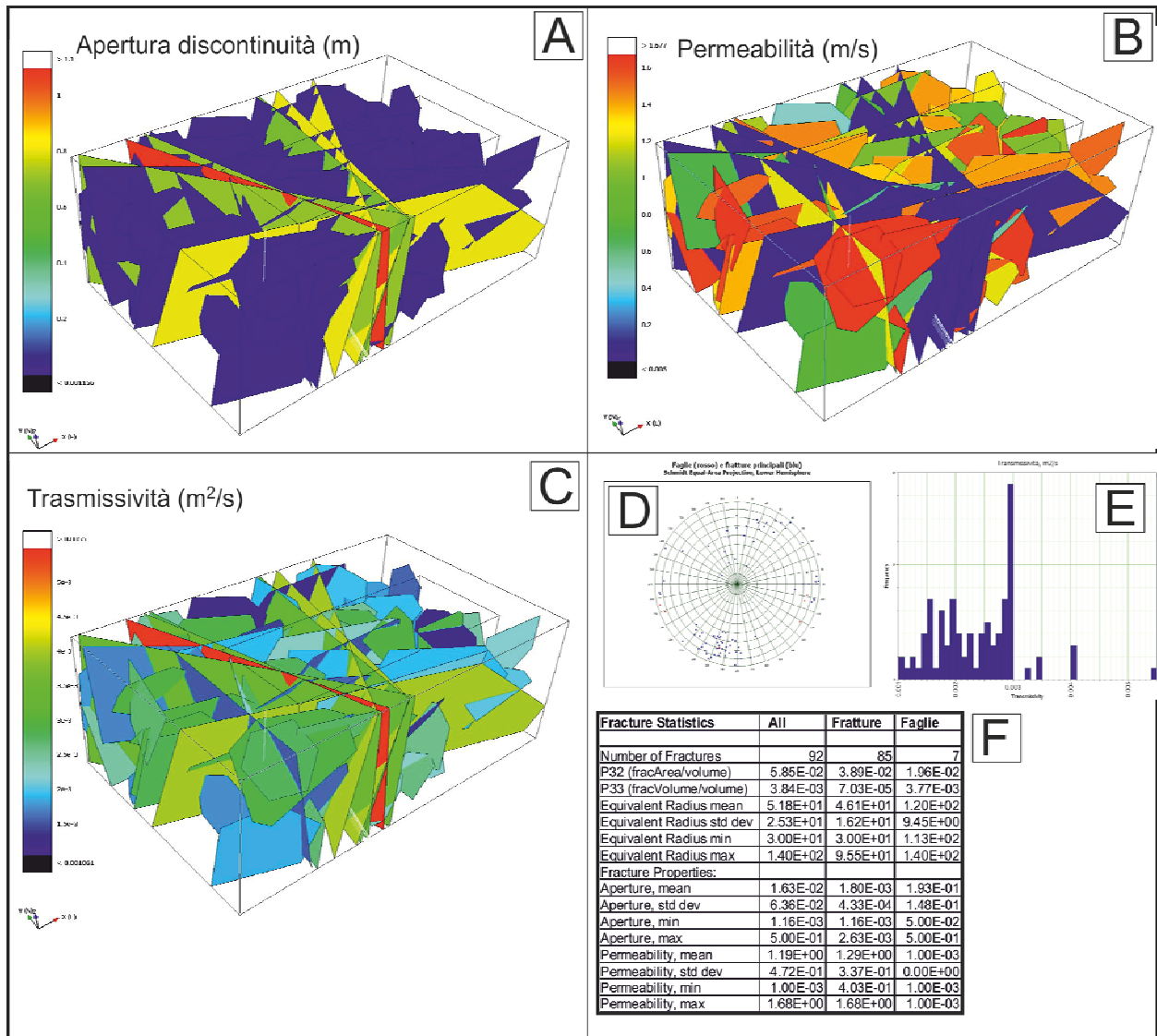


Figura 5.31: Caratteristiche geometriche e principali parametri idrogeologici delle fratture raggruppate nel set “Fratture conduttive e faglie”. In A) discontinuità classificate in funzione della loro apertura. In B) discontinuità classificate in funzione della loro permeabilità, in C) classificate in funzione della loro trasmissività. In D) proiezioni dei poli delle discontinuità: In blu le fratture principali, in rosso le faglie. In E) Istogramma delle trasmissività, In F) tabella riassuntiva delle proprietà statistiche del set

Caratteristiche della griglia “Continuo equivalente”

Dopo aver scorporato dal set di fratture globali quelle più trasmissive, descritte nel paragrafo precedente, tutte le altre sono state raggruppate nel set denominato “discontinuità poco trasmissive”. Questo set è stato quindi utilizzato per ricavare i parametri idrogeologici della griglia successivamente utilizzata per rappresentare la componente “continuo equivalente” dei modelli a doppia porosità. I principali parametri idrogeologici delle celle della griglia sono rappresentati in figura 5.32.

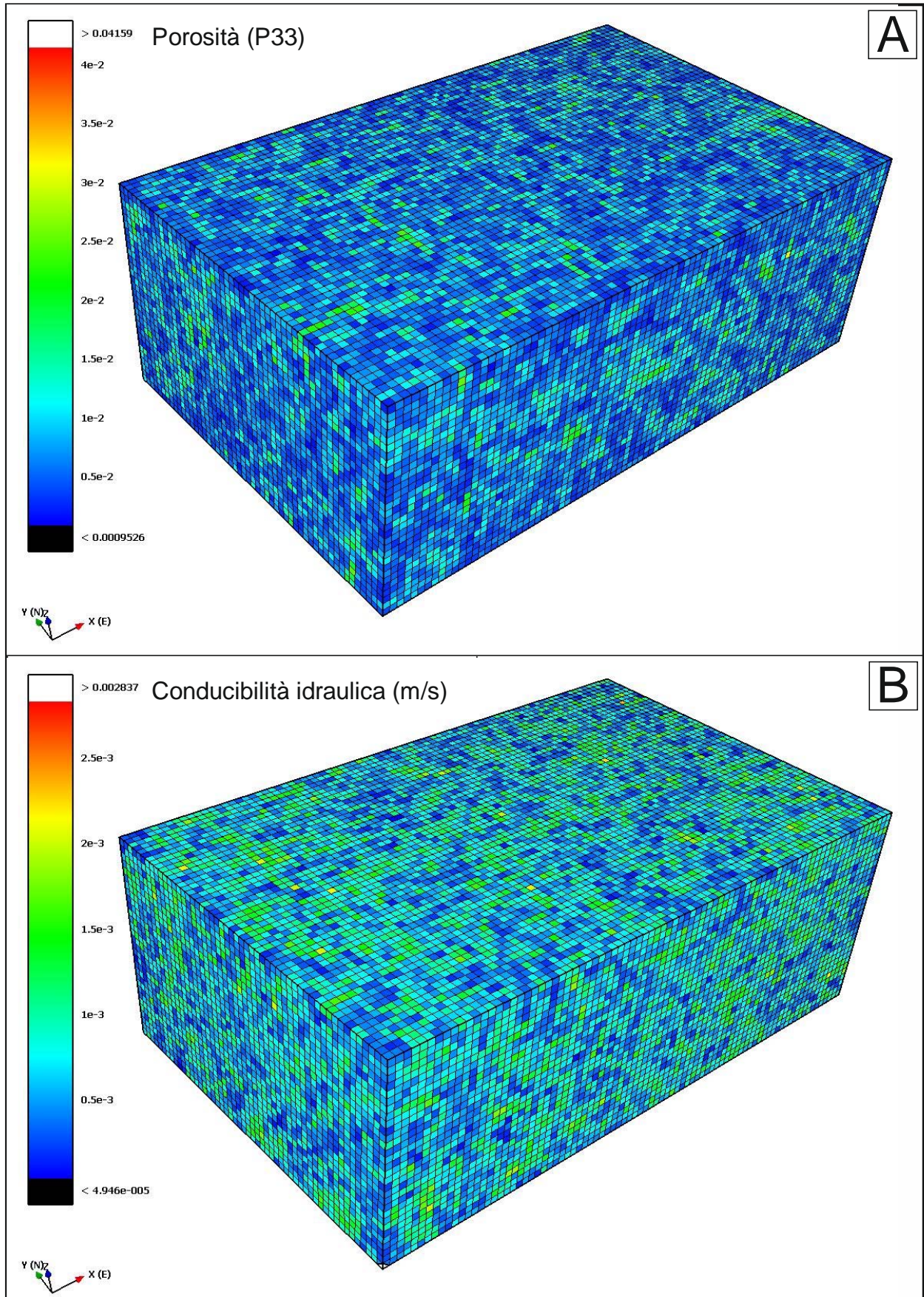


Figura 5.32: Permeabilità e conducibilità della griglia “continuo equivalente”

In Tabella 5.9 sono rappresentate le principali proprietà statistiche della griglia:

Cell Properties			
Cell Count	131042		
Vertex Count	139654		
CONDUCTIVITY min (m/s)	3.07E-05	Sigma_Factor min	4.2656002
CONDUCTIVITY max (m/s)	0.003725999	Sigma_Factor max	124.5728
CONDUCTIVITY mean (m/s)	0.000875947	Sigma_Factor mean	32.525472
CONDUCTIVITY dev (m/s)	0.000411382	Sigma_Factor dev	11.679765
Oda_Kxx min (m/s)	3.19E-05	Sigma_Length_I min (m)	0.28901735
Oda_Kxx max (m/s)	0.003011381	Sigma_Length_I max (m)	2.5
Oda_Kxx mean (m/s)	0.000671191	Sigma_Length_I mean (m)	0.71481004
Oda_Kxx dev (m/s)	0.000319648	Sigma_Length_I dev (m)	0.18839907
Oda_Kyy min (m/s)	4.78E-05	Sigma_Length_J min (m)	0.22935779
Oda_Kyy max (m/s)	0.003753807	Sigma_Length_J max (m)	1.6666666
Oda_Kyy mean (m/s)	0.001012705	Sigma_Length_J mean (m)	0.53681438
Oda_Kyy dev (m/s)	0.000429223	Sigma_Length_J dev (m)	0.12502378
Oda_Kzz min (m/s)	0.001094704	Sigma_Length_K min (m)	0.3267974
Oda_Kzz max (m/s)	0.000777625	Sigma_Length_K max (m)	3.125
Oda_Kzz mean (m/s)	0.00011152	Sigma_Length_K mean (m)	0.81261695
Oda_Kzz dev (m/s)	0.000138861	Sigma_Length_K dev (m)	0.20175211
Oda_Kxy min (m/s)	0.001254327	Sigma_Block_Volume min (m ³)	0.032740649
Oda_Kxy max (m/s)	0.00095267	Sigma_Block_Volume max (m ³)	5.2057304
Oda_Kxy mean (m/s)	3.37E-05	Sigma_Block_Volume mean (m ³)	0.33607002
Oda_Kxy dev (m/s)	0.000162009	Sigma_Block_Volume dev (m ³)	0.22214389
Oda_Kyz min (m/s)	0.000730964	FRAC_POROSITY min	0.000952603
Oda_Kyz max (m/s)	0.000737673	FRAC_POROSITY max	0.041587003
Oda_Kyz mean (m/s)	2.01E-05	FRAC_POROSITY mean	0.008904256
Oda_Kyz dev (m/s)	9.26E-05	FRAC_POROSITY dev	0.00400606
Oda_Kzx min (m/s)	4.95E-05	FRAC_COUNT min	32
Oda_Kzx max (m/s)	0.002837279	FRAC_COUNT max	121
Oda_Kzx mean (m/s)	0.000823848	FRAC_COUNT mean	76.699809
Oda_Kzx dev (m/s)	0.000337032	FRAC_COUNT dev	10.249656

Tabella 5.9: Proprietà della griglia su sono state calcolate le proprietà “continuo equivalenti” per il set di fratture poco conduttive .

Condizioni al contorno dei modelli realizzati

La modellazione di flusso è stata eseguita considerando diversi scenari caratterizzati da altezze piezometriche diverse imposte ai limiti del modello. Si è quindi cercato di ipotizzare il range di variazione dei carichi idraulici compatibili con le condizioni idrogeologiche ragionevolmente prevedibili per l'area di cava sulla base delle osservazioni idrogeologiche effettuate in sito, in particolare per quanto concerne la posizione e il regime stagionale delle sorgenti presenti a ovest e a sud della cava. Sono quindi stati implementati tre modelli, il primo rappresentativo di condizioni ordinarie, denominato “Modello ordinario” e gli altri due di condizioni estreme, denominati “Falda alta” e “Falda bassa”. I carichi piezometrici imposti ai bordi dei modelli sono rappresentati in Figura 5.33.

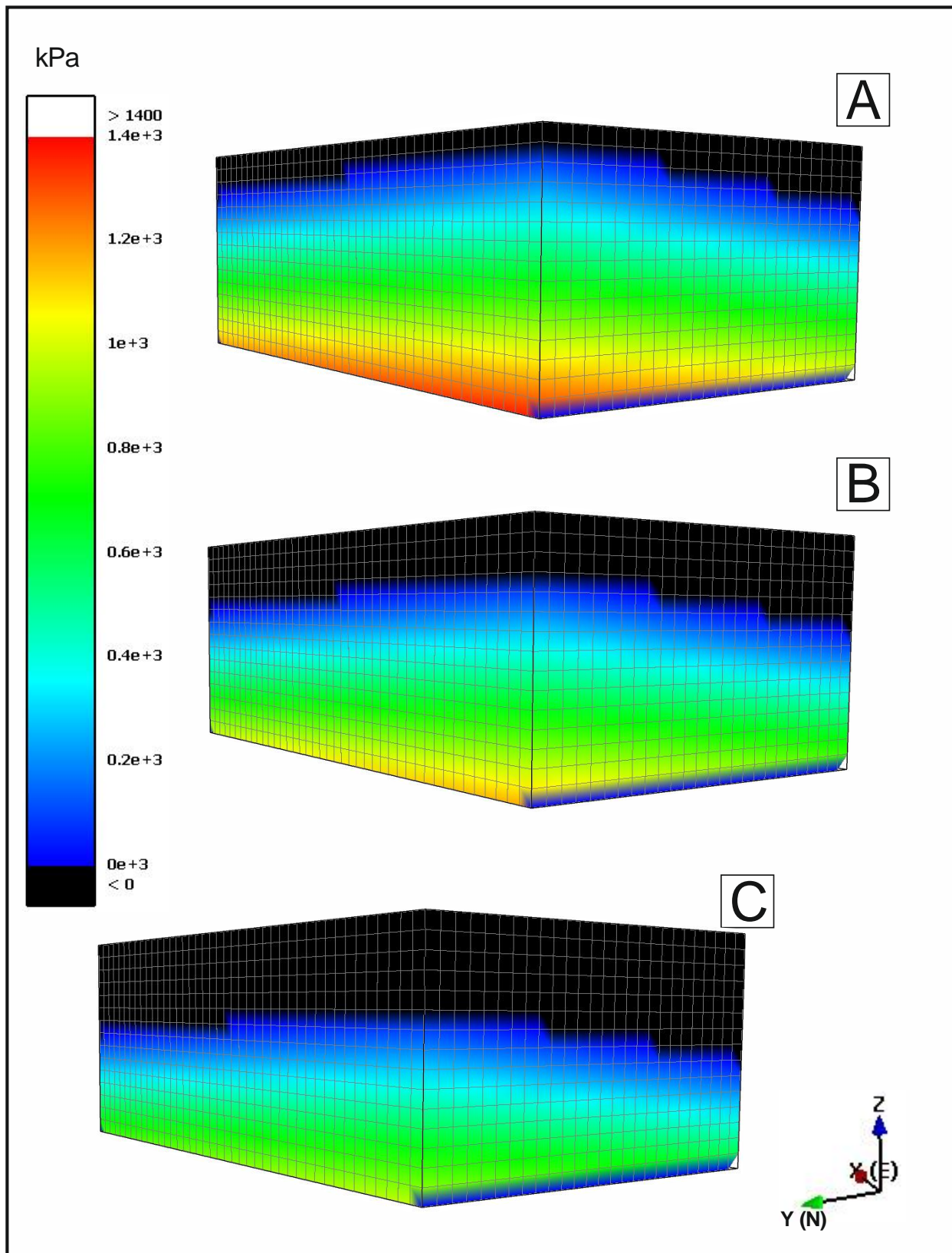


Figura 5.33: Condizioni piezometriche (kPa) imposte ai tre modelli realizzati: A) Modello con falda alta. B) modello con falda in condizioni ordinarie; C) Modello con falda bassa. Le immagini sono prese da NW: il lato lungo è quello di monte (N), l'altro è il lato Ovest.

I modelli sono stati costruiti con base orizzontale posta alla quota di riferimento $Z=0$ e hanno estensione $420 \times 260 \times 150$ metri nelle direzioni X(Est), Y(Nord) e Z(Alto) rispettivamente. Le condizioni al contorno sono state imposte sui quattro lati dei modelli simulando la presenza di una superficie di falda inclinata verso Sud-Est. Le altezze piezometriche ai quattro spigoli del modello sono riportate in Tabella 5.10, le altezze piezometriche lungo i bordi del modello si ottengono per interpolazione lineare dei valori agli spigoli.

Altezza piezometrica (m)					
	SPIGOLO	Nord-Ovest	Nord-Est	Sud-Ovest	Sud-Est
MODELLO					
Ordinario		120	100	90	70
Falda Alta		140	120	110	90
Falda Bassa		100	80	70	50

Tabella 5.10: Condizioni al contorno dei modelli espressi come altezza piezometrica agli spigoli

Le gallerie di coltivazione sono state inserite nei modelli come elementi geometrici rappresentativi della forma e dimensioni reali a cui è stata applicata una condizione di carico costante pari a zero, simulando in tal modo l'effetto drenante esercitato dai vuoti di coltivazione scavati nell'ammasso.

5.6.3 Risultati della modellazione di flusso

Modello "Ordinario"

Il modello "Ordinario" ipotizza condizioni piezometriche medie con livello di falda posto a quota variabile tra 120m (Ovest) e 100m (Est) sul lato di monte, coincidente col Nord geografico. Sul lato di valle le quote piezometriche sono state imposte pari a 90m (Ovest) e 70m (Est) interpolando i valori lungo i lati del modello. Tali valori piezometrici possono essere considerati rappresentativi delle condizioni idrogeologiche medie dell'area, desunte sulla base dell'ubicazione e del regime stagionale delle sorgenti presenti sul lato occidentale dell'area di cava. I risultati dell'analisi mostrano come la superficie piezometrica originaria venga depressa dal sistema di gallerie che agisce come elemento drenante. Le pressioni idrostatiche risultano nulle al di sopra delle gallerie ad indicare che il sistema viene completamente desaturato per effetto del drenaggio (vedi Figura 5.34 e 5.35). L'analisi dei flussi evidenzia il continuo scambio idrico che avviene tra le fratture del reticolo discreto e la matrice del mezzo poroso equivalente. La direzione del flusso dipende dai contrasti di permeabilità tra le fratture discrete e la griglia

che simula il comportamento della porzione di reticolo trattata come un mezzo continuo equivalente. La piccola differenza di conducibilità idraulica tra la griglia e la maggior parte delle fratture utilizzate per la modellazione discreta di flusso determina un continuo alternarsi tra drenaggio e alimentazione dalla matrice alle fratture discrete pur con una chiara prevalenza dell'effetto drenante delle fratture sulla matrice. Il segno attribuito ai flussi calcolati dal software risulta positivo quando il flusso è entrante nel mezzo considerato, e negativo viceversa. Il flusso che avviene dalla matrice verso una frattura sarà quindi positivo per la frattura e negativo per la matrice rappresentata dalla griglia continuo equivalente. Le possibilità di visualizzazione dei risultati offerte dal software sono sfortunatamente piuttosto insoddisfacenti, soprattutto per quanto riguarda la visualizzazione della porzione interna del reticolo di fratture che risulta totalmente oscurata dalla porzione esterna. Non è quindi possibile visualizzare il comportamento idrogeologico delle strutture più conduttive rappresentate dalle faglie, la cui visibilità risulta oscurata dalla porzione più esterna del reticolo. Il software permette comunque di esportare i valori di pressione e di flusso ai nodi della griglia e lungo il reticolo con cui sono state discretizzate le fratture. Gli afflussi calcolati dal modello verso il sistema di gallerie possono quindi essere valutati anche se solamente in termini di afflussi totali verso il sistema di cunicoli sotterranei inserito nei modelli. I risultati indicano un afflusso totale verso le gallerie di coltivazione pari a 3.2 l/s, suddiviso in un apporto pari a 1.3 l/s dalla matrice e 1.9 l/s dalle fratture. I risultati forniti dal modello sono in ottimo accordo con i dati di deflusso misurati in uscita dal sistema di cunicoli e anche il rapporto tra afflusso dalle fratture e afflusso diffuso è assolutamente compatibile con le osservazioni effettuate sul terreno. Il capitolo successivo è specificamente dedicato alla discussione dei dati di portata calcolati dai modelli confrontandoli con i dati disponibili relativi alle venute d'acqua misurate in galleria.

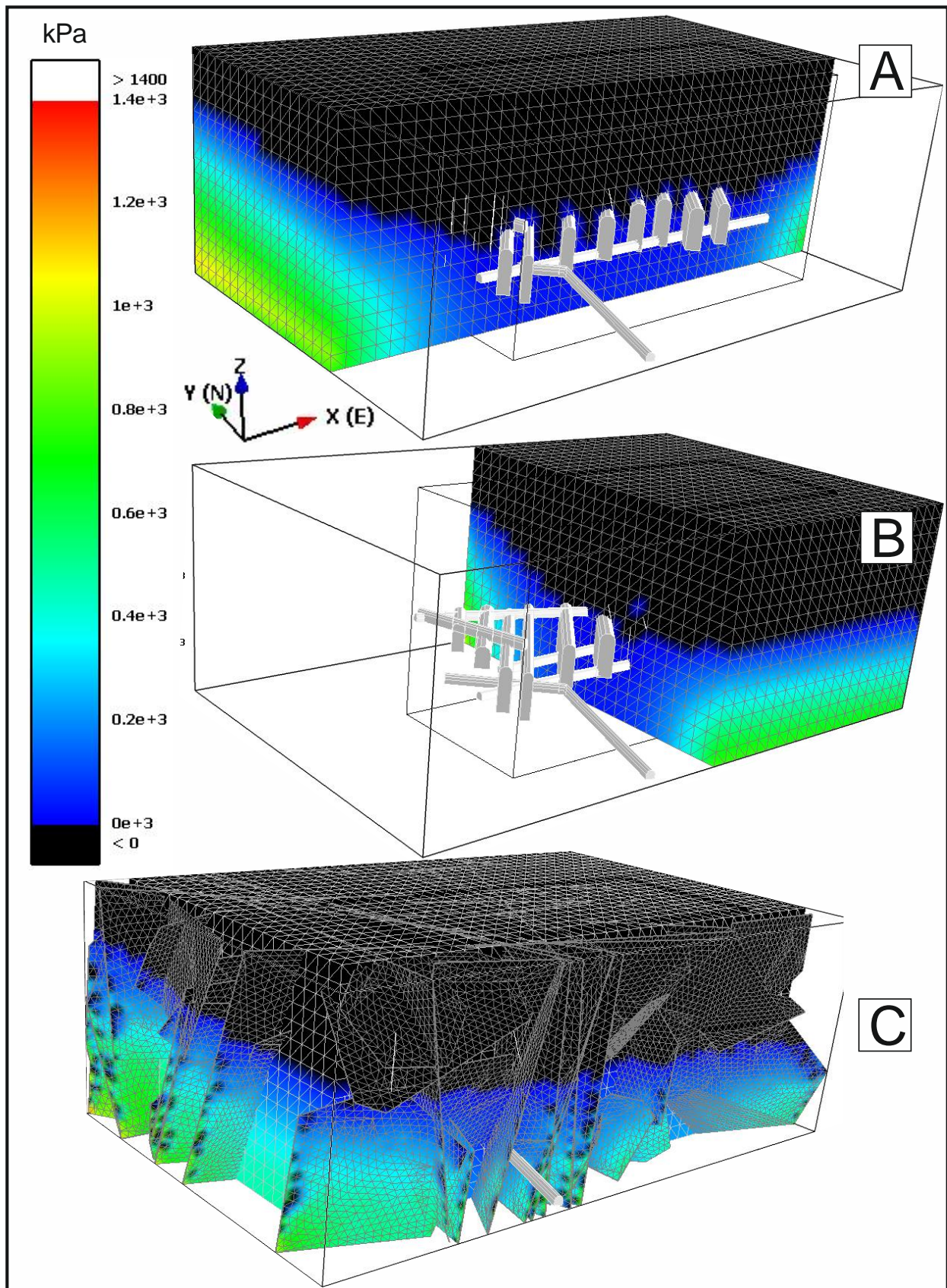


Figura 5.34: Pressioni idrostatiche calcolate lungo sezioni diverse del modello. In C alla griglia continuo-equivalente è stato sovrapposto il reticolo di fratture modellizzato secondo l'approccio discreto.

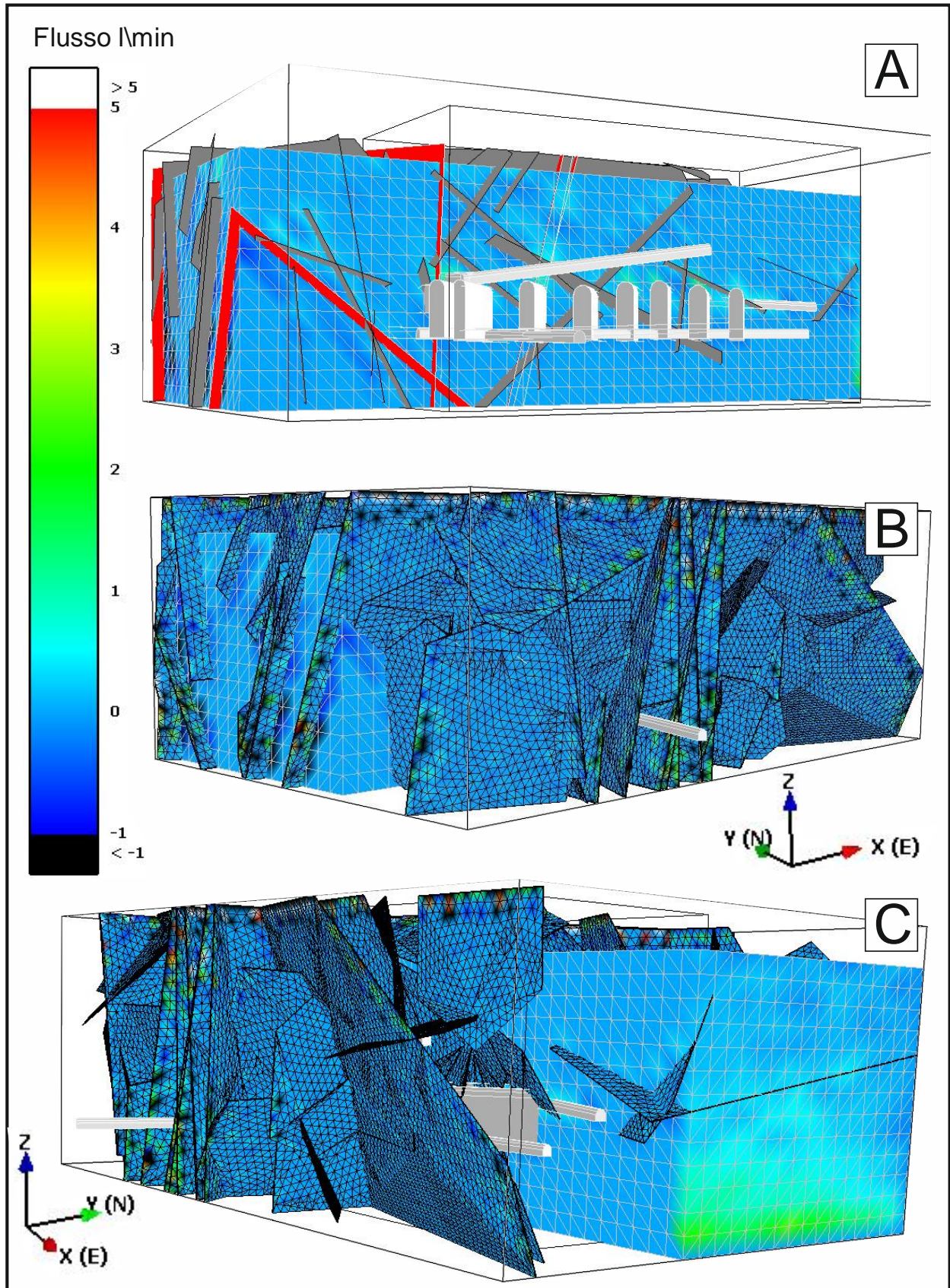


Figura 5.35: Flussi idrici lungo diverse sezioni del modello. In A) è visualizzata solamente la griglia continuo equivalente, in B e C è stato sovrapposto il reticolo discreto

Modello “Falda alta”

Il modello denominato “Falda alta” simula condizioni idrogeologiche più gravose ed è stato realizzato innalzando il livello piezometrico di 20m rispetto al modello precedente. Il modello simula quindi uno scenario caratterizzato da abbondante afflusso di acque meteoriche che determinano sia un innalzamento dei livelli piezometrici al contorno che un afflusso di acque dalla superficie superiore del modello. Il limite superiore si è quindi mantenuto libero, permettendo al modello di scambiare fluido con l’intorno in funzione delle pressioni sviluppate ai nodi interni. I risultati, visualizzati nelle Figura 5.36 e 5.37 mostrano un consistente innalzamento del livello di saturazione nei modelli. Come nel caso precedente i cunicoli agiscono da elementi drenanti e deprimono il livello di falda fino alla quota del tetto delle gallerie. Anche per i flussi idrici valgono le stesse considerazioni esposte per il caso precedente anche se si osserva un leggero aumento degli afflussi soprattutto in corrispondenza delle gallerie. Gli apporti verso le gallerie calcolati dal modello sono risultati complessivamente pari a 6.6 l/s, suddivisi in 2.9 l/s dalla matrice e 3.7 l/s dalle fratture. Il contributo delle fratture appare quindi percentualmente minore rispetto al caso precedente.

Modello “Falda bassa”

L’ultimo modello realizzato ipotizza una condizione di scarso afflusso meteorico che si traduce in un abbassamento ipotizzato dei livelli piezometrici imposti al contorno di 20m rispetto al caso “Modello ordinario”. I risultati evidenziano un notevole abbassamento del livello saturo e una conseguente riduzione dei flussi idrici all’interno del modello. L’afflusso calcolato dal modello alla rete di cunicoli sotterranei è risultato pari a 1 l/s suddiviso in un contributo di 0.3 l/s da parte della matrice e 0.7 l/s affluenti della rete di fratture discrete. L’afflusso dalle fratture è risultato quindi più del doppio rispetto a quello proveniente dalla matrice. Nelle Figura 5.38 e 5.39 vengono mostrati i risultati della modellazione.

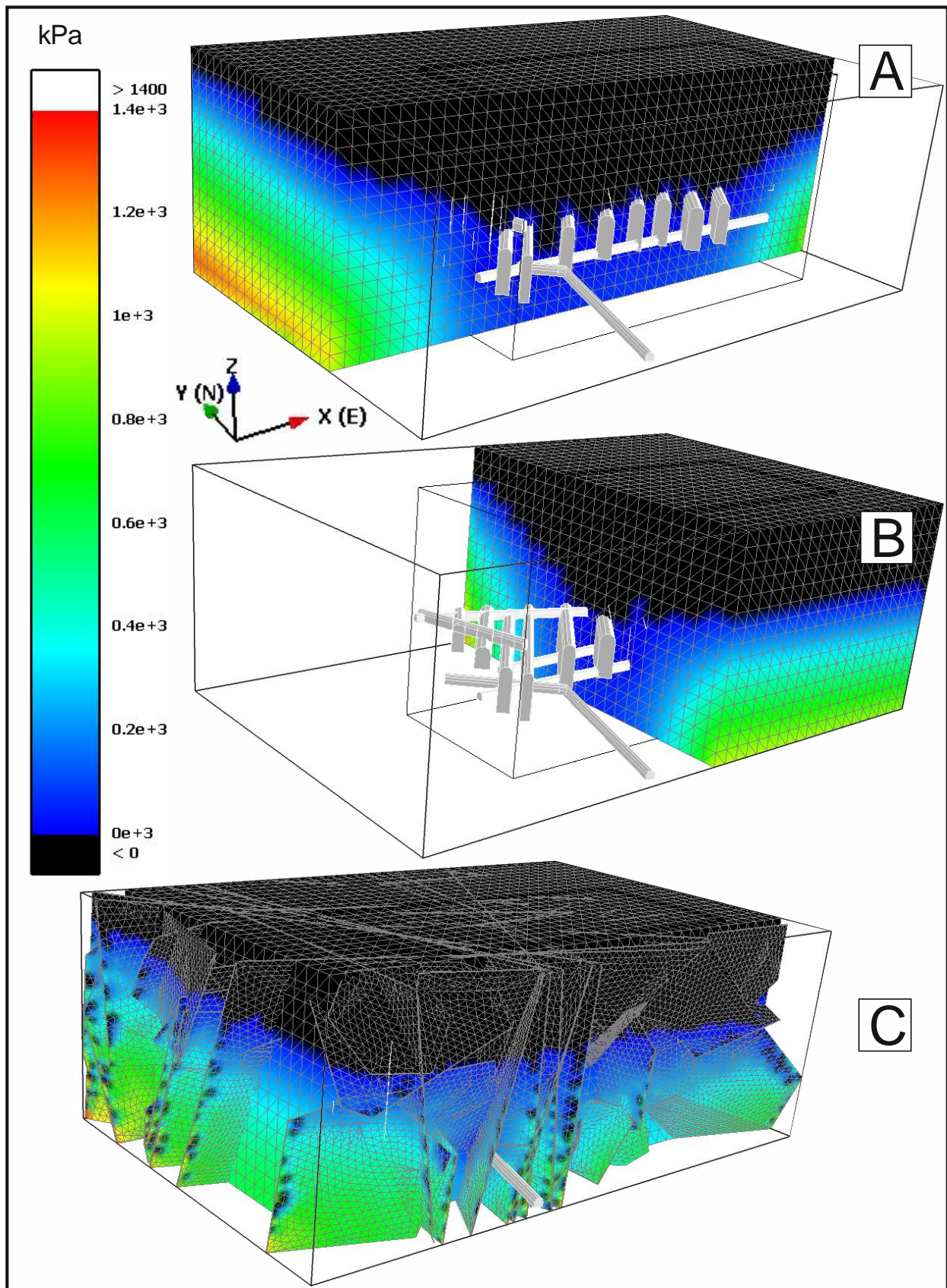


Figura 5.36: Pressioni idrostatiche calcolate lungo sezioni diverse del modello “Falda Alta”. In C alla griglia continuo-equivalente è stato sovrapposto il reticolo di fratture modellizzato secondo l’approccio discreto.

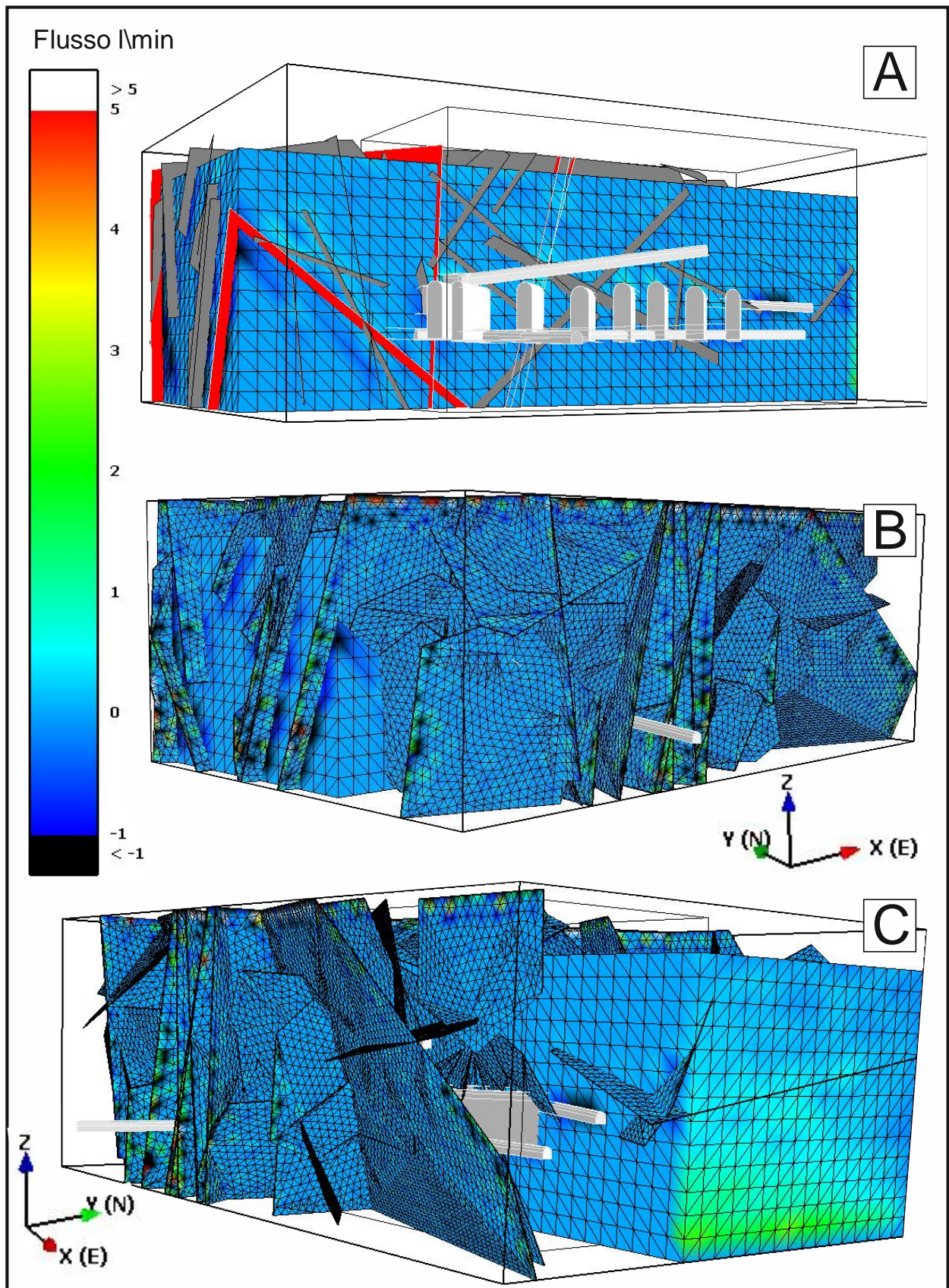


Figura 5.37: Flussi idrici lungo diverse sezioni del modello “Falda Alta”. In A) è visualizzata solamente la griglia continuo equivalente, in B e C è stato sovrapposto il reticolo discreto

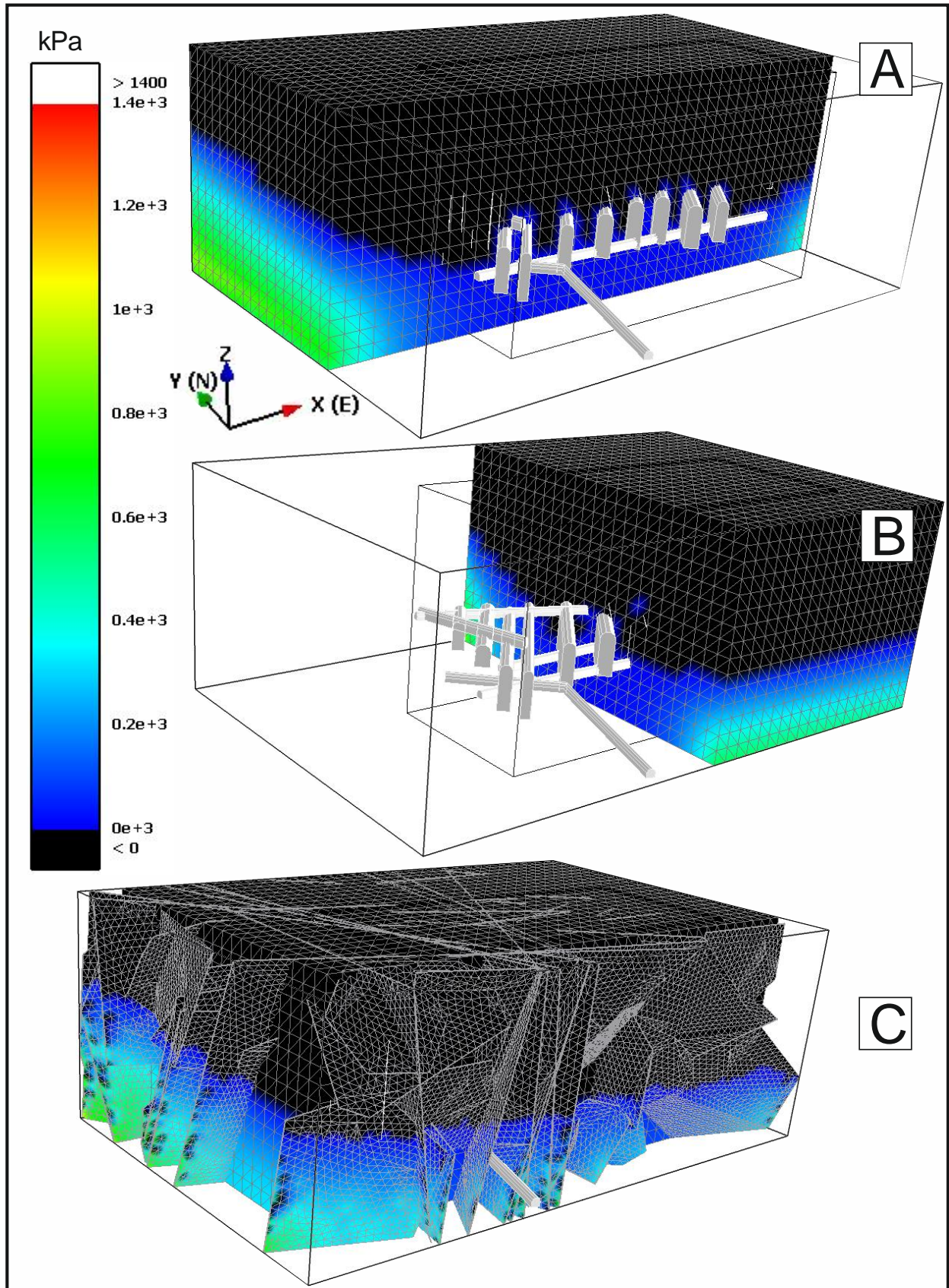


Figura 5.38: Pressioni idrostatiche calcolate lungo sezioni diverse del modello “Falda bassa”. In C alla griglia continuo-equivalente è stato sovrapposto il reticolo di fratture modellizzato secondo l’approccio discreto.

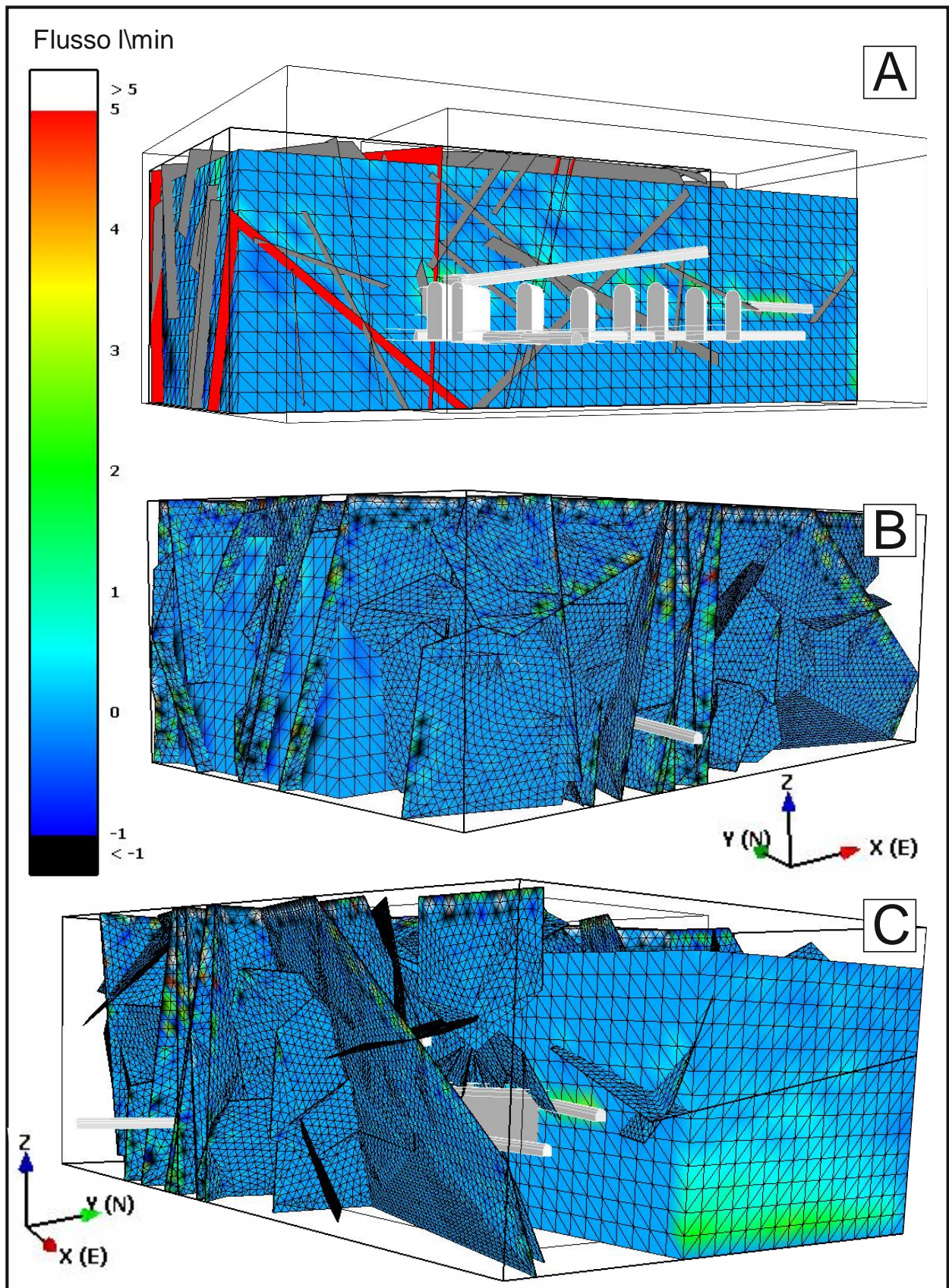


Figura 5.39: Flussi idrici lungo diverse sezioni del modello “Falda Bassa”. In A) è visualizzata solamente la griglia continuo equivalente, in B e C è stato sovrapposto il reticolo discreto.

5.6.4 Discussione dei risultati della modellazione di flusso

I modelli realizzati hanno permesso di simulare le venute idriche lungo il sistema di gallerie di coltivazione mineraria che interseca l'ammasso di quarzo al variare delle condizioni idrogeologiche imposte al contorno dei modelli. Gli scenari ipotizzati simulano sia una condizione ordinaria, caratterizzata da portate in regime di morbida, che condizioni di piena e di magra dell'acquifero contenuto nell'ammasso che costituisce il sistema d'alimentazione delle acque affluenti in galleria. I risultati ottenuti sono riassunti in Tabella 5.11, espressi sotto forma di afflusso idrico al sistema di cunicoli nelle tre diverse condizioni idrogeologiche ipotizzate.

Portate in afflusso alle gallerie (l/s)			
	Modello "Falda ordinaria"	Modello "Falda alta"	Modello "Falda bassa"
da matrice continuo equivalente	1.36	2.89	0.35
dalle fratture discrete	1.89	3.74	0.63
afflusso totale	3.25	6.63	0.98

Tabella 5.11: Sunto dei risultati dei modelli in termini di previsione delle venute d'acqua al sistema di gallerie

I risultati ottenuti posso essere validati considerando le portate defluenti dalle gallerie di coltivazione misurate con cadenza approssimativamente settimanale nel periodo giugno/settembre 2009. Il grafico in Figura 5.40 mostra le portate misurate e la curva interpolante.

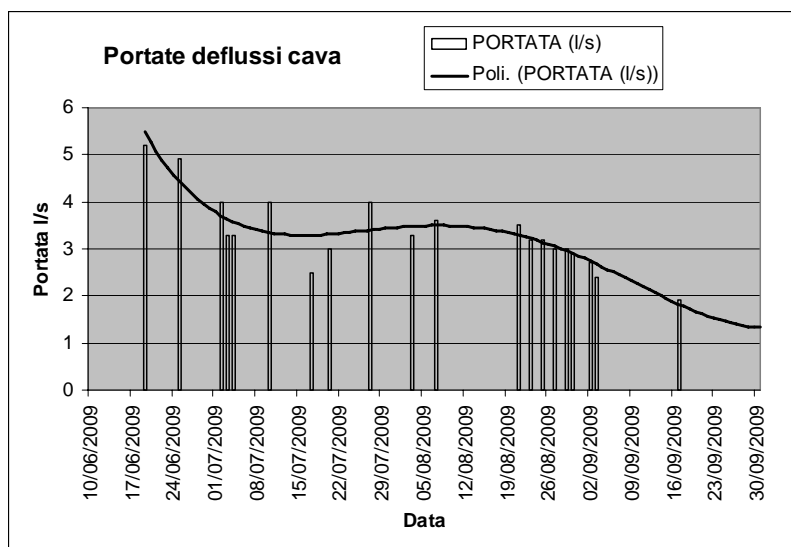


Figura 5.40: diagramma delle portate in afflusso alle gallerie di coltivazione misurate nell'estate 2009.

Le portate misurate mostrano un massimo poco superiore ai 5 l/s nella stagione primaverile, giustificabile con gli elevati apporti idrici al sistema idrogeologico durante il disgelo. Durante l'estate si osserva quindi una sostanziale stabilizzazione dell'idrogramma intorno a valori compresi tra 3 e 4 l/s, con un'ulteriore decrescita nel periodo autunnale verso valori del flusso di base ipotizzabili in circa 1 l/s.

Per una valutazione speditiva delle caratteristiche idrogeologiche del bacino di alimentazione che porta acqua alle gallerie, queste sono state assimilate ad una sorgente estesa: analizzando l'idrogramma della sorgente con il metodo di Maillet (Maillet 1905), la curva di esaurimento della sorgente viene espressa mediante un'equazione esponenziale del tipo:

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha \cdot t}$$

Dove:

Q_t è la portata della sorgente al tempo t

Q_0 è la portata della sorgente al tempo 0, fissato in corrispondenza di un massimo dell'idrogramma della sorgente.

α è il coefficiente di esaurimento;

t è il tempo in giorni dall'inizio del periodo di esaurimento.

Nel caso in esame, la curva di esaurimento dell'idrogramma può essere costruita a partire dal massimo di inizio agosto. Diagrammando le portate in scala log, in funzione del tempo si ottiene il grafico in figura 5.41. Dal coefficiente angolare della retta interpolante si ottiene il coefficiente di esaurimento della sorgente che nel caso in esame risulta pari a 1.4 giorni⁻¹. Il tempo all'esaurimento può essere stimato dall'intersezione della retta interpolante con la portata all'esaurimento (1 l/s nel caso in esame) e risulta circa pari a 80 giorni.

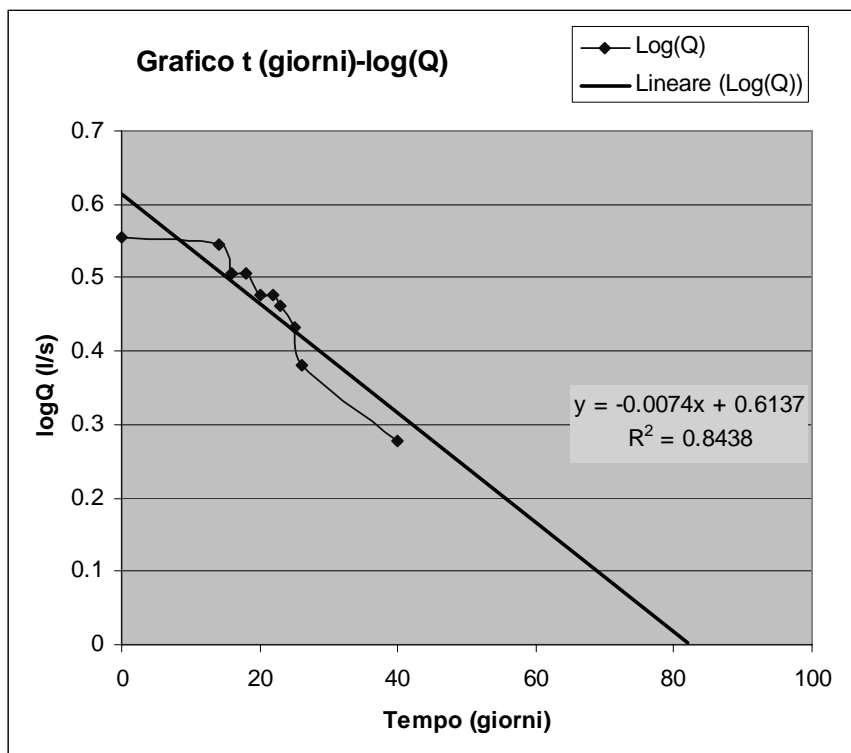


Figura 5.41: Curva di esaurimento della sorgente plottata su un grafico semi-log.

I risultati ottenuti dai tre modelli si mostrano quindi del tutto coerenti con il regime delle portate misurate all'uscita della cava, permettendo di validare con buona certezza i parametri idrogeologici attribuiti alle fratture simulate dal processo stocastico e le condizioni al contorno introdotte nei modelli.

5.7 Analisi di stabilità

FracMan fornisce delle metodologie numeriche appositamente sviluppate per il calcolo della stabilità dei blocchi rocciosi isolati dall'intersezione tra le fratture che compongono il reticolo e la superficie topografica o il perimetro dei tunnel sotterranei che intersecano l'ammasso. L'analisi permette di analizzare, secondo una metodologia statistica, i cinematismi di collasso e le condizioni di stabilità in corrispondenza dei tunnel e dei fronti di scavo. L'analisi può essere effettuata sulle fratture simulate dalla procedura di generazione del reticolo e non richiede quindi alcuna definizione aprioristica del numero e delle geometria dei set presenti. Il metodo permette quindi di valutare la probabilità associata alla presenza di blocchi potenzialmente instabili e non solo di valutare la possibilità che si realizzino specifici cinematismi di instabilità come normalmente effettuato applicando le classiche analisi di stabilità dei blocchi rocciosi, quali ad esempio il test di Markland (Hoek e Bray, 1981) o il test di Matheson (Matheson, 1988) che permettono di valutare la stabilità di un pendio considerando solamente la geometria del pendio e delle discontinuità e l'angolo d'attrito, evidenziando la possibilità che avvengano scivolamenti a cuneo sul fronte di esposizione dell'ammasso. Tali metodologie permettono quindi di individuare solamente le discontinuità che rappresentano potenziali piani di scivolamento ma non permettono di effettuare un'analisi statisticamente significativa della probabilità connessa all'instabilità dei blocchi in funzione delle caratteristiche realistiche del reticolo e della configurazione geometrica dei fronti d'analisi.

5.7.1 Introduzione teorica alle metodologie di analisi di stabilità dei blocchi

Identificazione dei blocchi rocciosi

I blocchi rocciosi vengono individuati dal programma identificando per prima cosa le fratture che individuano blocchi rocciosi bidimensionali sulla superficie ove viene condotta l'analisi (perimetro del tunnel o fronte d'esposizione dell'ammasso). L'analisi viene quindi ripetuta sulle fratture precedentemente individuate, che vengono trattate a loro volta come superfici d'analisi ove vengono individuati i blocchi rocciosi bidimensionali creati dall'intersezione delle altre fratture del reticolo. E così via finché tutte le fratture che definiscono fronti di studio reali o teorici vengono analizzate. Viene quindi costruito un set di facce 2D connesse tra loro secondo specifici rapporti geometrici. Le facce così identificate vengono analizzate attraverso un

algoritmo che identifica il più piccolo poliedro connesso con la superficie d'analisi e delimitato da un sottoinsieme delle facce precedentemente definite. La procedura termina una volta definiti i poliedri di roccia definiti a partire da ogni poligono bidimensionale definito dall'intersezione delle fratture con la superficie ove è condotta l'analisi. Una volta definiti i blocchi rocciosi adiacenti al perimetro del tunnel ne viene calcolato il volume attraverso un processo di tassellazione tridimensionale e il loro peso, in funzione della densità del materiale roccia definito dall'utente.

Aspetti teorici di base per l'analisi di stabilità

I blocchi identificati secondo il procedimento sopra descritto vengono quindi analizzati per determinarne le condizioni di stabilità. Vengono quindi effettuate tre tipologie di verifica numerica in funzione del numero di facce che identificano il blocco: 1) verifica di stabilità per caduta libera; 2) verifica di stabilità per scivolamento a cuneo; 3) verifica allo scivolamento piano.

La prima verifica viene effettuata per i blocchi in contatto con tre facce non complanari (esclusa la faccia libera, ad esempio quella esposta sul perimetro del tunnel). Per ognuna delle tre facce viene calcolata la forza normale su di essa agente risolvendo il sistema:

$$\begin{bmatrix} l_1 & l_2 & l_3 \\ m_1 & m_2 & m_3 \\ n_1 & n_2 & n_3 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ N_3 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} -\sum_1^{nf} U_i \cdot l_i \\ -\sum_1^{nf} U_i \cdot m_i \\ -\sum_1^{nf} U_i \cdot n_i + W \end{pmatrix}$$

Dove:

l_1, m_1, n_1 – sono i coseni direttori della normale uscente della faccia 1

l_2, m_2, n_2 – sono i coseni direttori della normale uscente della faccia 2

l_3, m_3, n_3 – sono i coseni direttori della normale uscente della faccia 3

N_1, N_2, N_3 – sono le forze normali agenti sulle facce 1, 2 e 3 rispettivamente.

nf – è il numero di facce che delimita il blocco

U_i – è la forza esercitata dalla pressione idrostatica agente sulla faccia

l_i, m_i, n_i – sono i coseni direttori della normale uscente della faccia i

W è il peso del blocco.

Se tutte e tre le forze normali sono positive il blocco è incondizionatamente stabile.

Qualora il blocco non sia incondizionatamente stabile viene effettuata la verifica dello scivolamento a cuneo lungo l'intersezione tra due piani. Come per il caso precedente deve essere risolto il sistema per calcolare la forza normale agente su ognuna delle 2 facce che definiscono il cuneo oltre alla componente di taglio diretta lungo la linea d'intersezione dei 2 piani (spigolo del cuneo):

$$\begin{bmatrix} l_1 & l_2 & l_{12} \\ m_1 & m_2 & m_{12} \\ n_1 & n_2 & n_{13} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} N_1 \\ N_2 \\ S_{12} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} -\sum_1^{nf} U_i \cdot l_i \\ -\sum_1^{nf} U_i \cdot m_i \\ -\sum_1^{nf} U_i \cdot n_i + W \end{pmatrix}$$

Dove, oltre al significato dei simboli definito in precedenza:

l_{12}, m_{12}, n_{12} – sono i coseni direttori dello spigolo definito dall'intersezione delle facce 1 e 2

S_{12} – è la forza di taglio sullo spigolo definito dall'intersezione delle facce 1 e 2

Se le forze normali alle 2 facce sono entrambe positive il blocco può scivolare sui due piani dando luogo a un cinematismo di scivolamento a cuneo.

Qualora il blocco non sia incondizionatamente stabile e non sia soggetto a scivolamento a cuneo deve essere verificata l'eventualità di instabilità per scivolamento planare risolvendo il sistema per calcolare la forza normale agente sulla faccia e le due forze tangenziali, una diretta secondo l'immersione del piano e l'altra nella direzione orizzontale:

$$\begin{bmatrix} l_1 & l_{1d} & l_{1h} \\ m_1 & m_{1d} & m_{1h} \\ n_1 & n_{1d} & n_{1h} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} N_1 \\ S_{1d} \\ S_{1h} \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} -\sum_1^{nf} U_i \cdot l_i \\ -\sum_1^{nf} U_i \cdot m_i \\ -\sum_1^{nf} U_i \cdot n_i + W \end{pmatrix}$$

Dove, oltre al significato dei simboli definito in precedenza:

l_{1d}, m_{1d}, n_{1d} – sono i coseni direttori del vettore immersione del piano

l_{1h}, m_{1h}, n_{1h} – sono i coseni direttori del vettore direzione del piano

S_{1d} – è la forza di taglio lungo la direzione di immersione

S_{1h} – è la forza di taglio lungo la direzione orizzontale del piano.

Se la forza normale è positiva il blocco può scivolare lungo il piano.

In fine, qualora il blocco non sia incondizionatamente stabile e non possa scivolare secondo un cinematismo a cuneo o planare, è soggetto a instabilità per caduta libera.

Per i blocchi soggetti a qualche tipo di cinematismo di instabilità viene quindi calcolato il fattore di sicurezza utilizzando il criterio di rottura di Mohr-Coulomb o, in alternativa a scelta dell'utente, di Barton-Bandis (Barton e Choubey, 1977). Il fattore di sicurezza viene calcolato in modo differente in dipendenza del cinematismo di rottura a cui è soggetto il blocco. Per un blocco stabile viene definito un fattore di sicurezza pari ad infinito, mentre un blocco in caduta libera ha coefficiente di sicurezza pari a zero. Tra i due estremi si collocano i fattori di sicurezza calcolati per gli scivolamenti planari e per quelli a cuneo. I fattori di sicurezza per questi due casi possono essere calcolati come di seguito esposto:

Fattore di sicurezza per lo scivolamento planare:

Utilizzando il criterio di rottura di Mohr-Coulomb il Fattore di sicurezza (FS) risulta pari a:

$$FS = \frac{A \cdot c + |N'| \cdot \tan(\phi)}{S}$$

Dove:

A è l'area della faccia

C è la coesione del giunto

N' è la forza normale efficace agente sulla faccia

Φ è l'angolo d'attrito del giunto

S è la forza di taglio agente lungo l'immersione della faccia.

Mentre, utilizzando il criterio di Barton-Bandis si ottiene:

$$FS = \frac{N' \cdot \tan(JRC \cdot \log(\frac{JCS \cdot A}{N'}) + \phi_b)}{S}$$

Dove

Φ_b è l'angolo d'attrito di base del giunto

JCS e JRC Sono la resistenza a compressione monoassiale e il coefficiente di rugosità del giunto. Nelle verifiche di stabilità effettuate applicando il criterio di Barton-Bandis il coefficiente di rugosità deve essere corretto per l'effetto scala, data la sua rilevante influenza.

Fattore di sicurezza per lo scivolamento a cuneo:

Utilizzando il criterio di rottura di Mohr-Coulomb il Fattore di sicurezza (FS) risulta pari a:

$$FS = \frac{A_1 \cdot c_1 + |N_1'| \cdot \tan(\phi_1) + A_2 \cdot c_2 + |N_2'| \cdot \tan(\phi_2)}{S_{12}}$$

Dove:

A_i è l'area della faccia i

c_1 e c_2 sono le coesioni dei giunti

N_1' e N_2' sono le forze normale efficaci agenti sulla facce 1 e 2, rispettivamente.

ϕ_i è l'angolo d'attrito del giunto i

S_{12} è la forza di taglio agente lungo lo spigolo creato dall'intersezione delle due facce.

Mentre, utilizzando il criterio di Barton-Bandis si ottiene:

$$FS = \frac{|N_1'| \cdot \tan(JRC_1 \cdot \log(\frac{JCS_1 \cdot A_1}{N_1'}) + \phi_{b1}) + |N_2'| \cdot \tan(JRC_2 \cdot \log(\frac{JCS_2 \cdot A_2}{N_2'}) + \phi_{b2})}{S_{12}}$$

Dove

ϕ_{bi} è l'angolo d'attrito di base del giunto i

JCS_i e JRC_i Sono la resistenza a compressione monoassiale e il coefficiente di rugosità del giunto i .

Analisi della dimensione dei blocchi

Il comportamento idrogeologico degli ammassi fratturati viene spesso riprodotto utilizzando modelli a doppia porosità che permettono di indagare la diversa risposta idraulica delle fratture più conduttive e della matrice studiando la propagazione nel tempo della perturbazione piezometrica indotta dal pompaggio. L'analisi condotta secondo un approccio a doppia porosità richiede però la caratterizzazione numerica di diversi parametri correlabili alla forma e alla dimensione media dei blocchi di matrice individuati dall'intersezione delle discontinuità costituenti il reticolo. L'area della superficie dei blocchi riveste inoltre una notevole influenza sulla quantità di fluido che può passare dalla matrice al sistema di fratture. La dimensione verticale media dei blocchi di matrice influenza i meccanismi di infiltrazione delle acque meteoriche sotto l'effetto della gravità. La forma dei blocchi di matrice influenza la scelta dei

modelli teorici ottimali da utilizzare nei modelli a doppia porosità. Per tutte queste ragioni risulta di fondamentale importanza identificare i parametri descrittivi delle caratteristiche di forma dei blocchi di matrice isolati dal reticolo di fratture.

Fracman fornisce una serie di metodologie analitiche capaci di assistere l'operatore nella valutazione dei parametri di forma da introdurre nei modelli analitici di flusso a doppia porosità. Tali algoritmi analizzano il reticolo di fratture generato con le modalità sopra definite e generano una serie di output in forma adatta ad essere utilizzata dai principali software di modellazione idrogeologica.

Una delle metodologie proposte è denominata "Spaziatura Multi Dimensionale" (MDS) e si basa sulla generazione di una serie di linee aventi direzioni definite dall'operatore, posizionate in maniera casuale all'interno del dominio di generazione. Lungo queste linee casualmente generate il programma individua le fratture che intersecano la linea di misura e calcola l'intercetta nelle diverse direzioni. Tipicamente le direzioni testate comprendono la direzione verticale e due o tre direzioni nel piano orizzontale, definite in funzione della geometria del reticolo di fratture. La dimensione dei blocchi viene quindi stimata attraverso un processo Monte Carlo di campionamento casuale, selezionando in punti casualmente individuati un set di valori di intercette nelle direzioni X, Y, e Z e moltiplicandoli tra loro per ottenere un volume prismatico. La probabilità di selezionare un punto per il campionamento dell'intercetta è proporzionale alla frequenza del suo valore d'intercetta, e in questo modo il processo è in grado di fornire una distribuzione di probabilità del volume dei blocchi coerente con le distribuzioni delle dimensioni nel volume d'analisi. Il volume del blocco *i*-esimo definito dalla simulazione Monte Carlo è calcolato come il prodotto delle spaziature nelle direzioni X, Y e Z:

$$\text{Volume Blocco} = X_i \cdot Y_i \cdot Z_i;$$

mentre l'area della superficie del blocco *I*-esimo è data dalla:

$$\text{Area Blocco} = 2 \cdot (X_i \cdot Y_i + X_i \cdot Z_i + Y_i \cdot Z_i)$$

E Il rapporto di forma del blocco è definito dai rapporti tra i valori medi delle spaziature nelle tre dimensioni: $X_m/Y_m/Z_m$.

La dimensione dei blocchi nella direzione verticale viene assunta pari alla media della distribuzione dei valori di spaziatura calcolati nella direzione Z. Il fattore sigma, utilizzato come fattore di forma nei modelli a doppia porosità (vedi Capitolo 5.6) viene infine calcolato da:

$$\sigma_i = 0.25 \cdot \left(\frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} \right)$$

La seconda delle metodologie disponibili per il calcolo dei parametri dimensionali dei blocchi discretizzati dal sistema di fratture è basato un semplice algoritmo di calcolo proposto da Dershowitz (Dershowitz 1988). Il metodo, denominato “RAY”, prevede una generazione casuale di un set di punti posizionati all’interno del dominio di generazione del reticolo. A partire dal punto vengono generate delle linee nelle tre direzioni principali dello spazio (o in altre direzioni definite dall’utente) e viene misurata la distanza che separa il punto dalla prima frattura intersecata lungo ogni linea. A partire dal set di distanze così definito vengono calcolati la dimensione caratteristica R , l’area della superficie dei blocchi A , e il volume di ogni blocco, V dalle:

$$R = \frac{1}{n_R} \sum_{i=1}^{n_s} \left(\frac{L_i}{2} \right)$$

$$A = S_A \prod_{i=1}^{n_s} \left(\frac{L_i}{2} \right)^{2/n}$$

$$V = S_V \prod_{i=1}^{n_s} \left(\frac{L_i}{2} \right)^{3/n}$$

Dove S_A e S_V sono i fattori di forma areale e volumetrica, rispettivamente, dipendenti dalla forma del blocco; nR è il numero di raggi proiettati da ogni punto, e L_i è la lunghezza misurata lungo il raggio passante per il punto d’analisi, che separa le due fratture più vicine situate in direzioni opposte rispetto al punto da cui è stato generato il raggio. In Figura 5.42 sono rappresentati graficamente i parametri utilizzati dalla procedura di calcolo. Nonostante l’algoritmo mostri notevoli potenzialità per la definizione delle caratteristiche geometriche medie dei blocchi di matrice, è necessario rilevare come vi siano alcuni problemi di bias nei risultati forniti: la

generazione casuale dei punti ha infatti maggiori probabilità di ricadere all'interno dei blocchi di maggiori dimensioni, la cui frequenza tende quindi ad essere sovrastimata dal metodo d'analisi.

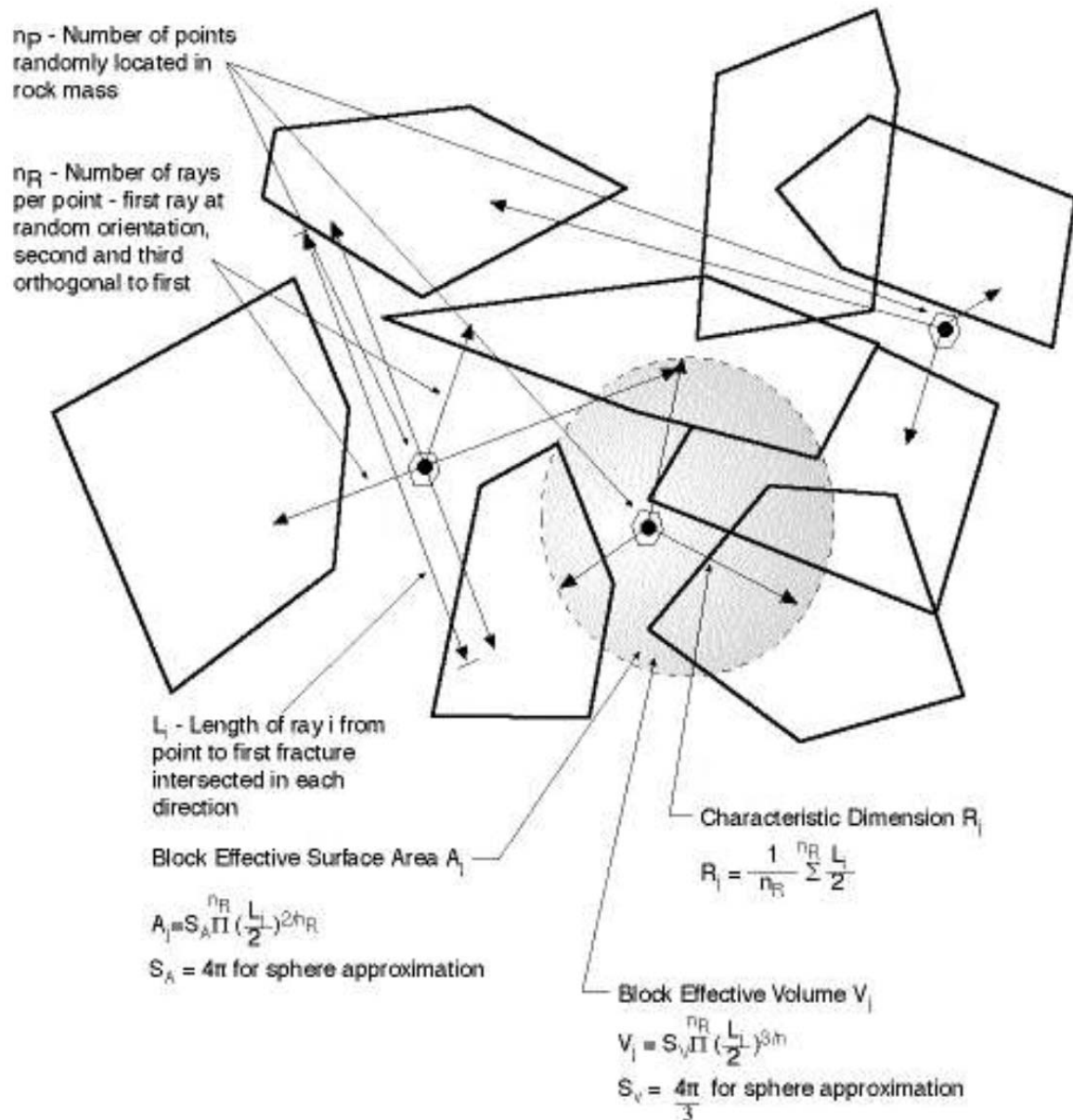


Figura 5.42: Schematizzazione grafica dei parametri geometrici utilizzati dal modello di calcolo delle caratteristiche geometriche dei blocchi.

5.7.2 Analisi dimensionale dei blocchi applicata al caso di studio.

L'analisi della dimensione dei blocchi è stata implementata nel volume di generazione interno, corrispondente all'estensione dell'ammasso di quarzo (Vedi Figura 5.8). Nella regione d'analisi sono stati selezionati casualmente 1000 punti e sono state valutate le dimensioni di un totale di 1000 blocchi adiacenti ai punti. L'analisi è stata effettuata utilizzando entrambi i metodi disponibili, descritti nell'introduzione teorica. I risultati sono esposti nella Figura 5.43.

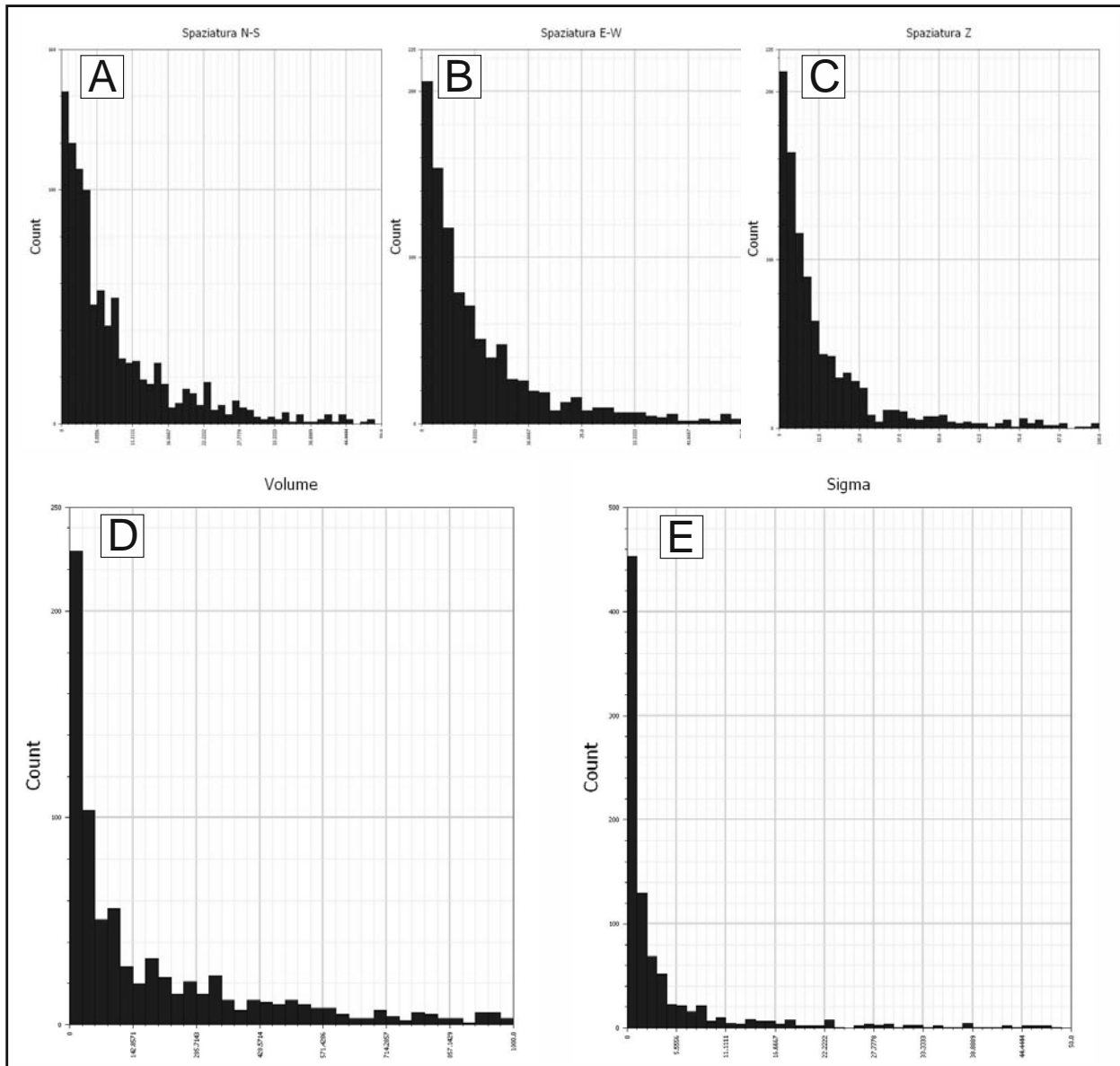


Figura 5.43: Risultati dell'analisi dimensionale. In A) Istogramma delle spazature calcolate lungo la direzione orizzontale N-S. In B) Istogramma delle spazature calcolate lungo la direzione orizzontale E-W. In C) Istogramma delle spazature calcolate lungo la direzione verticale. L'asse X per i tre grafici ha valori compresi tra 0 e 100 metri. In D) Istogramma dei volumi dei blocchi. (Asse X nel range tra 0 e 1000 mc). In E) Istogramma del fattore sigma. (asse x tra 0 e 50 metri).

I valori medi calcolati nelle tre direzioni Nord, Est e verticale sono risultati pari a 9.2m, con deviazione standard di 11m; 10.1m con deviazione standard di 13m e 16.6m con deviazione standard di 24m, rispettivamente. Il rapporto tra le dimensioni medie è quindi all'incirca pari a 1, ad indicare una forma approssimativamente cubica dei blocchi, leggermente allungata nella direzione z. Il fattore sigma individua il diametro medio della porzione di matrice, assimilata a un solido di forma sferica, drenato da ogni frattura del reticolo ed è risultato in media pari a 16m. Il volume medio dei blocchi calcolato col metodo MDS è risultato pari a 1480 m³. Dai grafici si nota comunque come gli istogrammi siano notevolmente asimmetrici, con una concentrazione delle frequenze in corrispondenza dei valori più bassi. Il valore medio risulta quindi influenzato in maniera determinante da pochi valori molto elevati e non è rappresentativo delle spazature e dei volumi più frequenti che risultano notevolmente minori. Il metodo MDS non permette inoltre di aggirare il problema connesso al bias del campionamento, che determina una notevole sovrastima dei blocchi a volume maggiore. In considerazione delle problematiche insite nel metodo, l'analisi è stata ripetuta utilizzando il metodo dei raggi, che permette di effettuare una correzione per limitare il bias insito nella metodologia di analisi. I risultati sono mostrati in Figura 5.44. Le due funzioni di densità cumulativa riportate nel grafico riportano le frequenze cumulate in funzione del diametro del blocco calcolato. È evidente dal grafico come la correzione applicata incrementi di molto la frequenza dei blocchi di piccole dimensioni che tendono invece ad essere esclusi dalla procedure di selezione casuale dei punti di campionamento (che hanno molte più probabilità di ricadere all'interno di blocchi di grandi dimensioni). I risultati ottenuti con questo metodo indicano un volume medio dei blocchi pari a 11m³, con mediana pari a 3.7m³, e sono quindi coerenti con i valori calcolati nell'analisi di stabilità trattata nel capitolo seguente. Alla luce dei risultati ottenuti il metodo RAY si è dimostrato più efficace del metodo MDS nella valutazione dei volumi medi dei blocchi definiti dall'intersezione delle fratture costituenti il reticolo simulato.

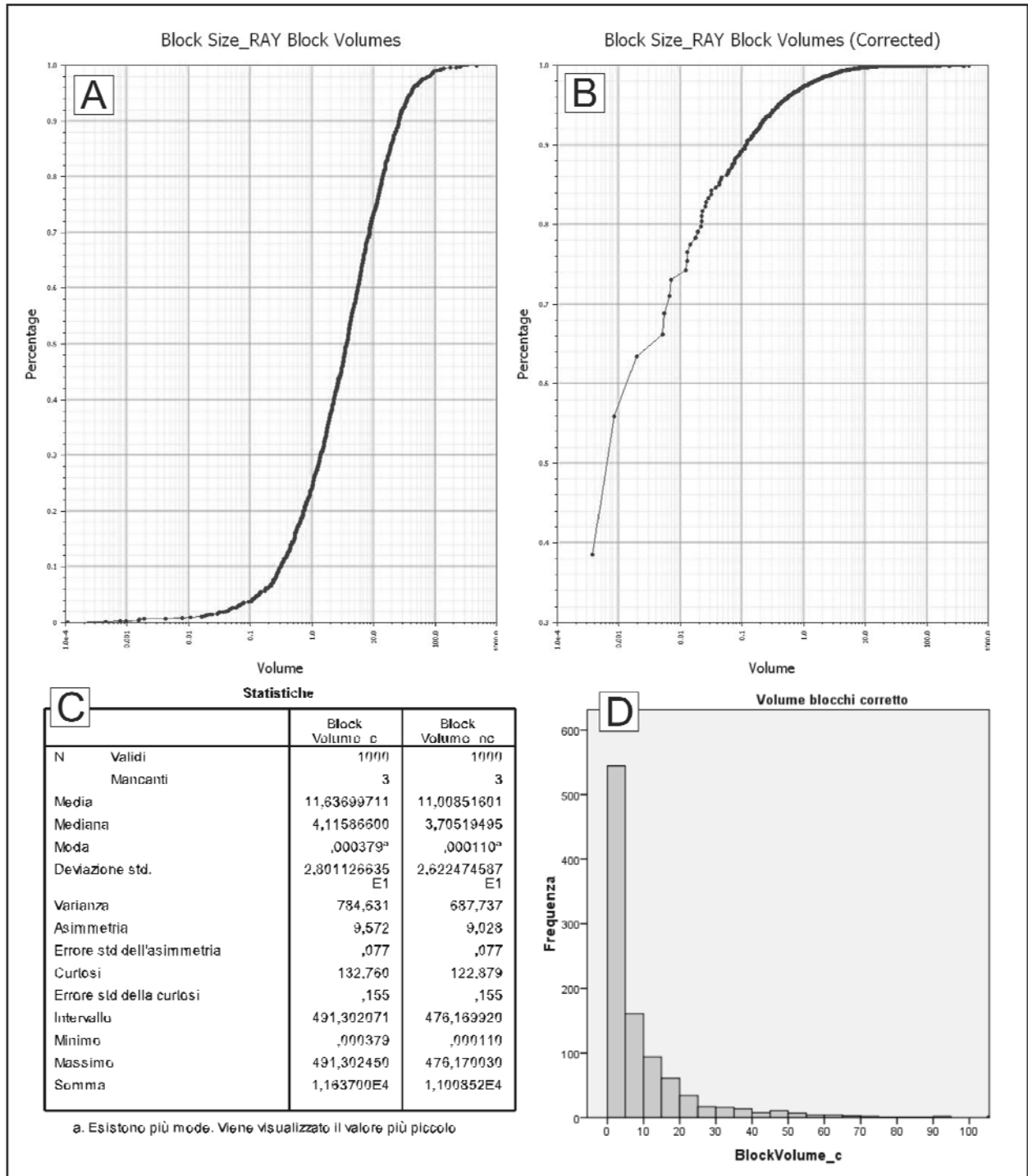


Figura 5.44: Analisi del volume dei blocchi effettuata col metodo RAY. A) curva cumulativa dei volumi dei blocchi senza l'applicazione della correzione per il bias. In B) curva cumulativa corretta.

Risultati dell'analisi di stabilità

L'analisi di stabilità dei blocchi è stata eseguita lungo 3 gallerie, una in direzione N-S, una in direzione E-W e la terza in direzione N45E, quindi disposta secondo la direzione che biseca l'angolo formato dalle prime due. I tunnel sui quali è stata eseguita l'analisi hanno raggio pari a 5 metri, altezza dei fianchi pari a 10 metri e lunghezza pari a 80 metri per i tunnel in direzione Est e Nord e 100 metri per quello in direzione Nord-Est e sono quindi rappresentativi delle dimensioni delle camere di coltivazione del giacimento. I tre tunnel sono stati definiti in modo che fossero rappresentativi della geometria e dell'orientazione delle gallerie effettivamente presenti, anche se la loro posizione non è reale ma è stata selezionata in modo da ottimizzare la procedura d'analisi permettendo di valutare le condizioni di stabilità lungo diverse direzioni. Al fine di mantenere i tempi di calcolo entro limiti ragionevoli, l'analisi è stata condotta all'interno di un dominio avente estensione 100x100x40 metri, posizionato in corrispondenza della porzione occidentale dell'ammasso quarzoso. La posizione del dominio di analisi è stata scelta in modo da includere la parte dell'ammasso intersecata dalle gallerie di coltivazione effettivamente presenti. L'analisi è stata effettuata sfruttando le potenzialità del software che permette di valutare i cinematismi di rottura di ogni blocco in contatto con le pareti della galleria classificando i blocchi in quattro categorie: 1) soggetti a crollo, 2) soggetti a scivolamento lungo un piano, 3) soggetti a scivolamento lungo l'intersezione di due piani e 4) stabili. I blocchi del primo tipo hanno Fattore di Sicurezza (FOS) pari a zero, quelli del secondo e del terzo tipo possono avere FOS maggiori o minori di uno, mentre a quelli del quarto tipo viene attribuito un FOS assunto pari a 100. I risultati dell'analisi sono stati espressi come percentuali dei blocchi totali, nonché come percentuale del volume totale dei blocchi, soggetti ad ogni tipo di cinematismo analizzato. L'analisi è stata effettuata utilizzando il criterio di Barton-Bandis. I valori dei parametri di ingresso sono sintetizzati in tabella 5.12.

Peso di volume	Angolo d'attito di base	Dilatanza	JRC	JCS
26 KN/mc	34°	0	frattura	frattura

Tabella 5.12: Parametri di resistenza utilizzati nell'analisi di stabilità

I valori del JRC e del JCS erano stati attribuiti alle singole fratture in fase di generazione e sono stati introdotti nell'analisi di stabilità leggendoli direttamente sulla frattura interessata dal calcolo di stabilità. L'angolo d'attrito di base del quarzo è stato assunto da dati bibliografici, mentre il peso di volume è stato ricavato dalle relazioni tecniche redatte a supporto dell'attività di

coltivazione del giacimento. I risultati presentati si riferiscono all'analisi effettuata senza considerare le pressioni idrauliche nelle fratture ed sono quindi rappresentativi di condizioni secche. In Figura 5.45 sono mostrati i blocchi rocciosi individuati dal software in contatto col contorno delle gallerie, differenziati in funzione del cinematicismo di rottura calcolato.

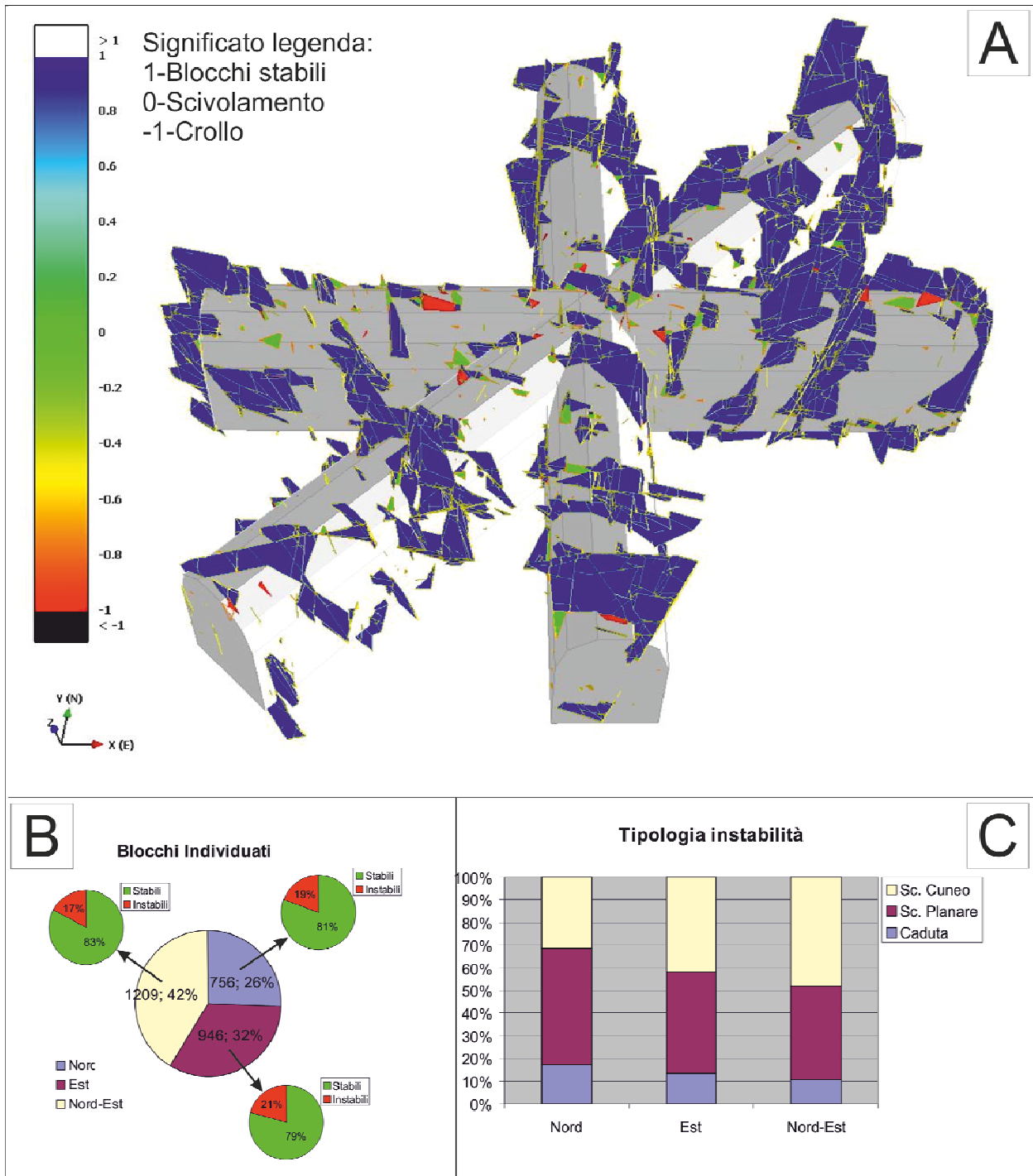


Figura 5.45:A) Blocchi rocciosi individuati all'intersezione del reticolo con le gallerie; B) Diagramma a torta del numero e della percentuale di blocchi per ognuno dei tunnel, suddivisi tra stabili e instabili. C) Suddivisione percentuale delle tipologie di instabilità individuate nei tre tunnel.

Dalla figura si nota chiaramente come la maggior parte dei blocchi generati sia stabile, con una percentuale sul numero totale dei blocchi pari all'81%. L'instabilità è principalmente rappresentata da cinematismi di scivolamento planare o a cuneo che rappresentano circa il 90 % dell'instabilità totale. L'instabilità per caduta libera interessa solamente circa il 13% del totale dei blocchi instabili. Analizzando l'entità dell'instabilità nelle tre direzioni in cui sono stati creati i tunnel si nota come nella direzione N45E sia stato individuato un numero di blocchi maggiore che nelle altre due direzioni, indice di una maggiore frammentazione della roccia, in conseguenza dei rapporti geometrici tra l'orientazione media delle famiglie di discontinuità e la direzione del tunnel. Lungo la direzione N45E risultano prevalenti i cinematismi di instabilità per scivolamento a cuneo, che costituiscono circa il 50% dell'instabilità globale e si nota nel complesso una riduzione dell'instabilità per caduta libera a favore degli altri due meccanismi di rottura investigati. Lungo le due direzioni Nord ed Est i risultati dell'analisi sono globalmente equivalenti sia per numero di blocchi che per i cinematismi individuati. Passando dalla direzione Nord alla Est si osserva comunque un piccolo aumento del numero di blocchi identificati e una riduzione dell'incidenza dei cinematismi per scivolamento planare a favore degli altri due meccanismi di rottura.

Dalla figura 5.45 appare comunque evidente come il volume dei blocchi stabili sia notevolmente maggiore, in media, del volume dei blocchi instabili. Analizzando le percentuali di instabilità considerando il volume dei blocchi al posto del loro numero sono stati ottenuti i risultati riassunti in Tabella 5.13:

Tunnel	Volume Blocchi (m ³)	Stabili		Instabili		Caduta		Scivolamento Planare		Scivolamento Cuneo	
		Volume (m ³)	%	Volume (m ³)	%	Volume (m ³)	%	Volume (m ³)	%	Volume (m ³)	%
Nord	1327	1315.4	0.991	22.6	1.7E-02	0.9	6.8E-04	7.3	5.5E-03	3.7	2.8E-03
Est	2530	2502.2	0.989	27.8	1.1E-02	8.2	3.2E-03	13.7	5.4E-03	5.9	2.3E-03
Nord-Est	1996	1972.6	0.988	23.1	1.2E-02	1.2	6.0E-04	13.3	6.7E-03	8.6	4.3E-03
TOTALE	5853	5790.2	0.989	73.5	1.3E-02	10.3	1.8E-03	34.3	5.9E-03	18.2	3.1E-03

Tabella 5.13: Volumi totali dei blocchi interessati dai diversi tipi di cinematismi analizzati

Si noti come i volumi totali in condizioni di instabilità, ossia con fattore di sicurezza calcolato minore o uguale a uno, siano all'incirca pari a 73 m³, pari all'1.3% del volume totale dei blocchi. Il massimo, medio, e la deviazione dei volumi dei blocchi per ogni cinematismo analizzato sono presentati in Tabella 5.14:

		Nord	Est	Nord-Est
Caduta	Volume max (m ³)	2.45E-01	4.82E+00	5.97E-01
	Volume medio (m ³)	3.52E-02	3.04E-01	5.45E-02
	Deviazione standard	6.04E-02	9.67E-01	1.27E-01
Scivolamento planare	Volume max (m ³)	1.04E+00	2.11E+00	6.66E+00
	Volume medio (m ³)	9.73E-02	1.56E-01	1.57E-01
	Deviazione standard	2.04E-01	3.85E-01	6.68E-01
Scivolamento cuneo	Volume max (m ³)	1.28E+00	1.01E+00	1.98E+00
	Volume medio (m ³)	8.01E-02	7.12E-02	8.65E-02
	Deviazione standard	2.12E-01	1.82E-01	2.08E-01
Blocchi stabili	Volume max (m ³)	2.15E+02	4.82E+02	1.73E+02
	Volume medio (m ³)	2.16E+00	3.35E+00	1.97E+00
	Deviazione standard	1.09E+01	2.22E+01	7.84E+00

Tabella 5.14: dimensioni massime, medie e deviazioni standard dei blocchi, suddivise in base alla tipologia di instabilità calcolata per il blocco e alla regione di definizione del blocco (Tunnel in direzione Nord, Est e Nord-Est).

I volumi medi dei blocchi instabili sono in media all'incirca pari a 0.1m³, con valori massimi di circa 6m³. I volumi dei blocchi stabili sono invece notevolmente maggiori, con valori medi di circa 2m³ e valori massimi di qualche centinaio di metri cubi. Ciò permette di chiarire la ragione dell'apparente incongruenza tra il numero dei blocchi instabili, pari a circa il 20% del totale, e la molto più ridotta importanza volumetrica dell'instabilità, con un volume instabile di poco superiore al 1% del totale.

Analizzando i risultati dell'analisi dal punto di vista del fattore di sicurezza associato ai blocchi è inoltre possibile individuare non solo i blocchi in condizioni di instabilità (descritti precedentemente) ma anche quelli che pur essendo stabili (FOS > 1), potrebbero risultare instabili a causa del variare delle condizioni al contorno ipotizzate, o a causa dell'incertezza connessa con la definizione della geometria del reticolo e delle proprietà meccaniche delle fratture coinvolte. In figura 5.46 e 5.47 è mostrato il fattore di sicurezza associato ai blocchi. La legenda è stata troncata per evidenziare i blocchi caratterizzati da fattori di sicurezza compresi tra 0 e 3 e quindi instabili (FOS<1) o potenzialmente instabilizzabili (FOS compreso tra 1 e 3). Complessivamente risultano presenti 156 blocchi con FOS compreso tra 1 e 3, suddivisi in 32 blocchi per il tunnel Nord, 49 blocchi per il tunnel Est e 75 blocchi per il tunnel Nord-Est. Il volume totale di questi blocchi risulta pari a 16.7 m³, pari ad un volume medio di 0.1 m³. La dimensione media dei blocchi con FOS compreso tra 1 e 3 risulta quindi del tutto comparabile con quella dei blocchi instabili. I risultati dell'analisi sono coerenti con le osservazioni effettuate in cava dove non si osservano problemi di instabilità tali da richiedere l'installazione di strutture di supporto in calotta o sui fianchi delle gallerie.

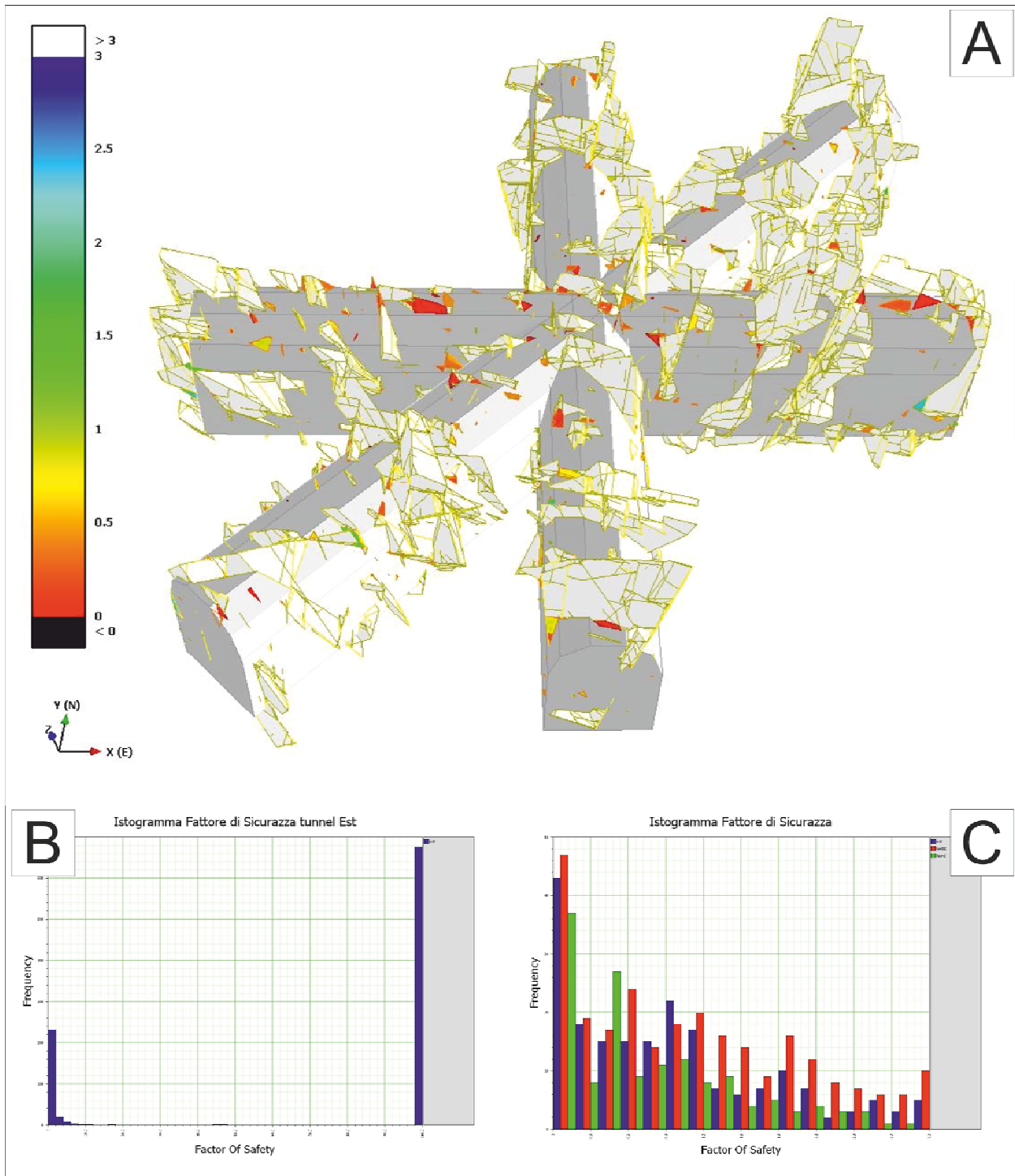


Figura 5.46: Fattore di sicurezza calcolato per i blocchi instabili. La legenda mostra i blocchi con fattore di sicurezza compreso tra 0 e 3.

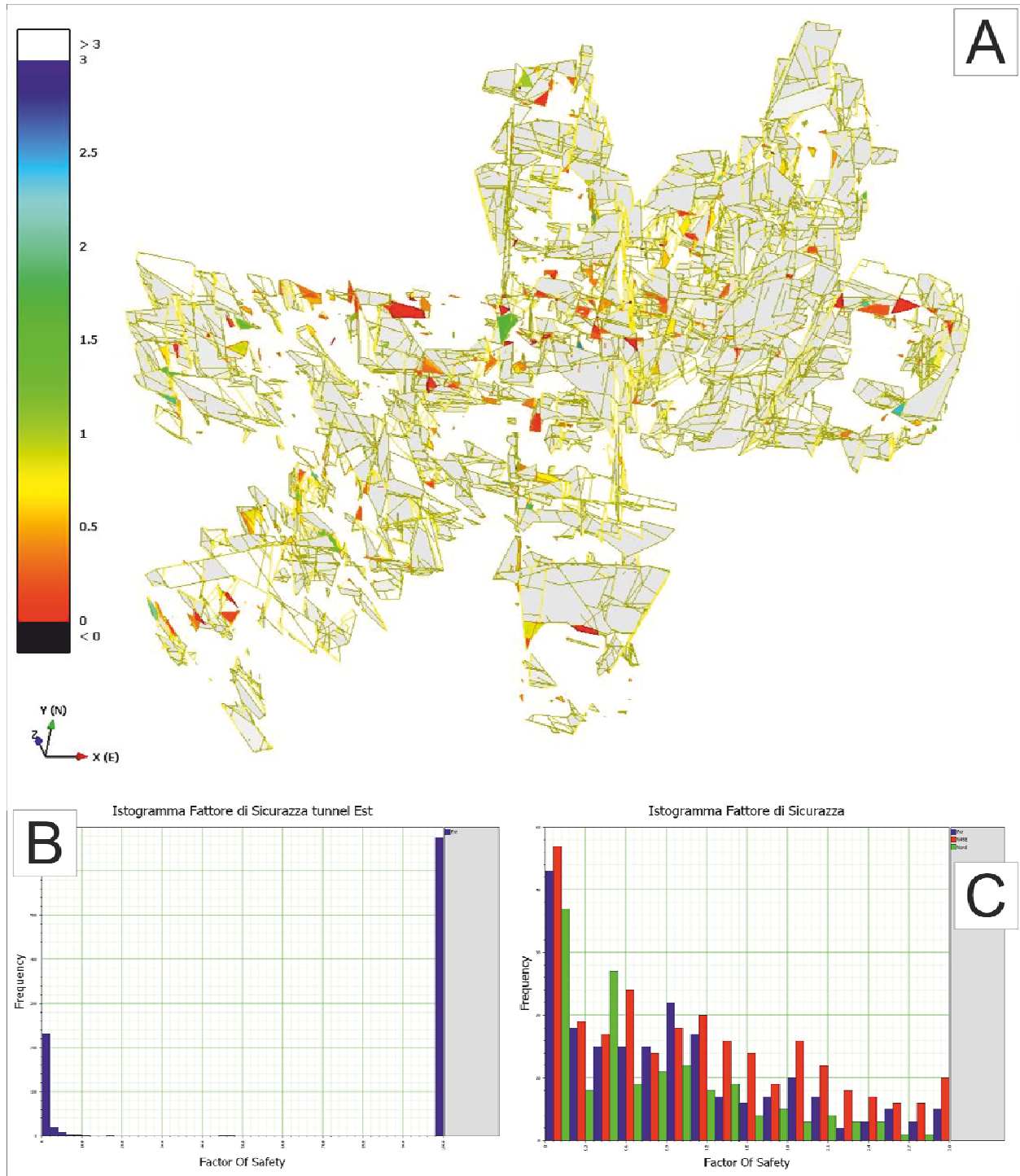


Figura 5.47: Fattore di sicurezza calcolato per i blocchi instabili. La figura mostra le stesse informazioni della precedente, senza la presenza dei volumi che rappresentano i tunnel.

6 Conclusioni

L'obiettivo principale che ci si proponeva di ottenere con lo studio realizzato in questa tesi di dottorato riguarda l'applicazione di tecniche e metodologie statistiche e stocastiche per la ricostruzione dell'assetto geometrico e delle caratteristiche idrogeologiche e geomeccaniche di un ammasso roccioso. Lo studio è stato condotto su un ammasso di quarzo lenticolare caratterizzato da un pattern di fratturazione molto fitto e piuttosto regolare, sito in località "Bosco del Sasso" nel comune di Sondalo (SO)

Il lavoro si è articolato in cinque fasi successive: la prima, di revisione bibliografica, ha consentito di acquisire le conoscenze preliminari sulla geologia dell'area e sullo stato di fratturazione dell'ammasso. Sulla base delle informazioni preliminari raccolte è stato definito l'approccio metodologico e procedurale al problema in oggetto e, dopo un'attenta revisione dei metodi disponibili, è stato affinato l'obiettivo del lavoro ed è stata pianificata la campagna di indagine.

La seconda fase, ha previsto una campagna geognostica finalizzata all'acquisizione dei dati geologico-strutturali e geomeccanici per la ricostruzione del reticolo di fratturazione dell'ammasso. L'indagine è stata effettuata sui fronti di coltivazione della vecchia cava a cielo aperto, ormai abbandonata, e all'interno delle gallerie di coltivazione realizzate per lo sfruttamento del giacimento. La metodologia di acquisizione dei dati si compone di due diverse strategie di campionamento, in funzione del livello di conoscenza che si intende ottenere nelle diverse aree, della tempistica richiesta e delle difficili condizioni ambientali in cui si è operato. Un primo livello conoscitivo ha comportato il rilevamento delle strutture ad elevata persistenza individuate ed accuratamente caratterizzate all'intersezione con le gallerie di coltivazione del giacimento. Il secondo livello conoscitivo ha comportato l'esecuzione di venti rilievi geomeccanici di dettaglio, eseguiti lungo finestre di osservazione estese qualche decina di m² e finalizzati ad indagare alla piccola scala le caratteristiche del pattern di fratturazione, in modo tale da raccogliere tutte quelle informazioni di dettaglio che vengono necessariamente trascurate nel "rilievo geologico continuo in sottterraneo". L'elaborazione dei dati raccolti ha permesso di stimare le proprietà meccanico-strutturali necessarie a valutare le caratteristiche di resistenza, deformabilità e comportamento idrogeologico degli ammassi. Sono state individuate e descritte 4 famiglie di discontinuità. Una quinta famiglia (set k5) a giacitura sub-orizzontale, spaziatura molto larga e quindi poco rappresentata negli affioramenti indagati, è stata individuata solamente in seguito, durante l'esecuzione di una seconda campagna geognostica effettuata per la

validazione dei risultati raggiunti dall'analisi geostatistica. Questa famiglia non è quindi stata inserita nella fase di simulazione geostatistica ma è stata introdotta solamente nei modelli stocastici di simulazione del reticolo eseguiti successivamente. L'applicazione dei sistemi di classificazione GSI, RMR e Q ha evidenziato una qualità da sufficiente a buona, senza mai raggiungere valori ottimali a causa dell'elevata fratturazione intrinseca al giacimento, risultato della storia geologica (5 fasi deformative) a cui l'unità di quarzo è stata sottoposta, e del disturbo indotto dalle operazioni di scavo effettuato con l'uso di esplosivo.

La parte più consistente del lavoro di raccolta dati è stata però riservata al rilevamento in continuo ed alla descrizione approfondita degli elementi strutturali principali visibili percorrendo la rete di cunicoli. Gli elementi caratterizzati (oltre 600) sono stati selezionati per la loro elevata persistenza e per le caratteristiche morfologiche, tali da renderli elementi principali lungo cui si concentra il flusso idrico. Particolare attenzione è stata posta nell'individuazione e caratterizzazione degli elementi tettonici che interessano l'area di cava. Sono stati individuati due fasci di faglie, uno con andamento circa NNO-SSE e l'altro con andamento circa NNE-SSO. L'assetto geometrico delle strutture principali è stato studiato lungo i tre livelli di gallerie, prolungando tridimensionalmente (con l'ausilio di software CAD) i piani a partire da un punto di misura arbitrariamente scelto e verificando successivamente la coerenza fra le posizioni calcolate graficamente e le localizzazioni delle strutture rilevate a quote diverse. L'analisi ha confermato l'ipotesi di planarità ed elevata persistenza per le faglie e per la maggior parte dei set di discontinuità.

La terza fase ha riguardato l'elaborazione e lo studio dei dati raccolti, suddivisi in due subset (fratture principali e secondarie) in funzione della loro persistenza e delle evidenze di terreno. Per ogni parametro sono stati ricavati i principali descrittori statistici ed individuate le funzioni di distribuzione di probabilità; le ipotesi formulate sono state di volta in volta verificate attraverso l'applicazione di appositi test statistici. Sono state analizzate: spaziatura, apertura, alterazione, riempimento e presenza d'acqua, considerando dapprima la totalità dei valori, e distinguendoli poi in funzione delle famiglie. La variabilità spaziale dei parametri rilevati è stata successivamente studiata utilizzando procedure geostatistiche che hanno permesso di individuare la struttura di correlazione spaziale dei parametri. In particolare sono stati costruiti i variogrammi sperimentali ed individuati i modelli di variogramma teorici che meglio li approssimano. L'applicazione di tecniche di interpolazione geostatistica (Kriging) ha quindi permesso di regionalizzare la distribuzione delle variabili in oggetto, stimando la variabile in punti non campionati.

I risultati hanno mostrato come le distribuzioni spaziali dei parametri alterazione, riempimento e presenza d'acqua risultino correlabili con la vicinanza alle faglie, nell'immediato intorno delle quali si osserva un netto peggioramento delle condizioni delle discontinuità. Le porzioni centrali dell'ammasso appaiono invece piuttosto omogenee. I risultati dell'analisi geostatistica sono stati presentati con l'ausilio di contour maps che permettono di visualizzare in maniera continua l'andamento delle variabili nell'area di studio. L'incertezza connessa con la stima locale è quindi stata valutata mediante costruzione della mappa della varianza del kriging. Per verificare la veridicità dei risultati derivati dall'analisi del parametro di orientazione delle discontinuità si sono confrontati i valori ottenuti dal kriging con un dataset di controllo appositamente campionato e non utilizzato nelle procedure di interpolazione. I risultati hanno mostrato una qualità della stima effettuata nel complesso discreta.

I dati rilevati secondo le modalità descritte in precedenza hanno fornito una notevole quantità di informazione sulle caratteristiche geometriche e meccaniche del reticolo di fratturazione.

La complessità dell'assetto strutturale e la variabilità insita nelle caratteristiche del sistema di fratture rendono comunque tecnicamente impossibile rilevare e quindi caratterizzare deterministicamente il reticolo nella sua globalità. Per ovviare all'incertezza geologica e strutturale connessa con la definizione delle caratteristiche delle fratture, la quarta e ultima fase di lavoro è stata incentrata sull'utilizzo di metodologie stocastiche per lo studio del reticolo, simulandone l'assetto a partire dai dati rilevati in affioramento. Utilizzando gli strumenti e le metodologie teoriche ampiamente descritte nel presente documento, è stato generato un reticolo di fratture di natura stocastica, che riproduce piuttosto fedelmente le caratteristiche dei quattro set di discontinuità caratterizzate in precedenza. La simulazione del reticolo è stata effettuata con l'ausilio del software FracMan, che fornisce una serie di strumenti numerici per modellizzare il reticolo di discontinuità, assistendo l'operatore in tutte le fasi del processo, dall'organizzazione e studio statistico dei dati rilevati in affioramento, alla definizione e generazione dei modelli fino allo studio del comportamento meccanico ed idrogeologico dell'ammasso roccioso.

La definizione delle caratteristiche geometriche del reticolo è stata effettuata seguendo le metodologie recentemente proposte dalla comunità scientifica internazionale. I parametri di orientazione delle famiglie sono stati attribuiti sulla base di un metodo capace di condizionare i dati simulati ai dati reali misurati in affioramento. La distribuzione delle lunghezze delle tracce delle fratture in affioramento è stata studiata con l'ausilio di metodologie statistiche che hanno permesso di riconoscere il tipo di distribuzione (esponenziale) e i parametri corrispondenti, successivamente introdotti nei modelli stocastici. La densità di fratturazione del reticolo è stata

simulata a partire dalle spaziatore misurate lungo i tunnel di coltivazione, dopo aver indagato la variabilità spaziale del parametro e suddiviso l'ammasso in porzioni caratterizzate da spaziatore omogenea. I parametri idrogeologici e geomeccanici delle discontinuità sono stati attribuiti su base esclusivamente stocastica, a partire dalle distribuzioni statistiche dei dati rilevati in affioramento. Il reticolo simulato è stato successivamente validato mediante confronto con il dataset appositamente acquisito per la validazione dei modelli realizzati. I risultati mostrano una simulazione assolutamente soddisfacente dei quattro set di fratture presenti.

Successivamente alla generazione del modello sono state eseguite delle simulazioni di flusso atte a validare i parametri idrogeologici delle fratture generate sulla base del confronto tra le venute d'acqua simulate e quelle osservate lungo il sistema di tunnel che interseca l'ammasso. La realizzazione dei modelli di flusso ha richiesto la valutazione della struttura fisica dell'acquifero finalizzata alla definizione del metodo concettuale più adatto per la sua simulazione. A scala regionale, infatti, la struttura fisica dell'acquifero può essere schematizzata con una permeabilità equivalente mentre, a scala locale, risulta prevalente il ruolo delle singole discontinuità e la soluzione del problema richiede un approccio di tipo discreto. La soluzione proposta, presenta un approccio combinato tra metodi a reti discrete e modelli equivalenti continui. Le fratture simulate sono quindi state suddivise in due categorie, a seconda della loro dimensione e trasmissività. Coerentemente con la scala del problema e seguendo le proposte suggerite in letteratura, le fratture più conduttive, con l'aggiunta delle faglie individuate nell'area e inserite nel modello in modo deterministico, sono state utilizzate per la simulazione del flusso secondo un modello discreto, mentre le fratture meno conduttive sono state convertite in un sistema equivalente continuo, rappresentato da una griglia regolare contenuta nel medesimo dominio spaziale delle fratture discrete. Per le celle della griglia sono quindi stati definiti i parametri idrogeologici equivalenti, ed è stata effettuata la simulazione di flusso, mediante un metodo agli elementi finiti. I risultati dell'analisi hanno fornito valori di portata affluente ai tunnel del tutto coerenti con i valori misurati, permettendo di validare le assunzioni alla base dei modelli.

L'ultima tipologia di analisi effettuata ha riguardato il calcolo della stabilità dei blocchi rocciosi isolati dall'intersezione tra le fratture che compongono il reticolo e la superficie topografica o il perimetro dei tunnel sotterranei che intersecano l'ammasso. L'analisi è stata effettuata lungo tre tunnel di dimensioni equivalenti a quelle dei tunnel reali e disposti nello spazio secondo le tre direzioni N-S, E-W e NE-SW. In corrispondenza dei tunnel e dei fronti di scavo sono stati analizzati, secondo una metodologia statistica, i volumi dei blocchi potenzialmente instabili, i cinematismi di collasso e le condizioni di stabilità, in funzione dei rapporti geometrici tra i

tunnel e le orientazioni delle famiglie di discontinuità componenti il reticolo. Anche in questo caso i risultati hanno mostrato un'ottima coerenza con le condizioni di stabilità realmente osservate in sito.

Lo studio effettuato ha permesso di ricostruire l'assetto strutturale dell'ammasso roccioso attraverso un processo di analisi statistica, geostatica e di simulazione stocastica. Le procedure utilizzate si rifanno a diversi approcci metodologici e concettuali proposti dalla ricerca scientifica nel campo e hanno mostrato una buona capacità di analisi e previsione delle caratteristiche del reticolo. Le metodologie geostatistiche, certamente di più semplice applicazione rispetto a quelle di simulazione stocastica, hanno evidenziato tuttavia numerosi limiti pratici, soprattutto in relazione alla forte variabilità locale dei parametri che rende in molti casi problematica l'interpretazione del variogramma sperimentale, spesso caratterizzato da una componente casuale (nugget) che rappresenta quasi la metà della varianza totale. Le metodologie di simulazione del reticolo discreto si sono invece mostrate molto più adatte a descrivere la naturale complessità del sistema e hanno permesso di ottenere i risultati migliori, pur con una notevole complessità e dispendiosità dell'analisi. La simulazione del reticolo discreto di fratture, comunque, non solo permette una completa caratterizzazione delle proprietà del sistema, ma costituisce anche la base per la realizzazione di modelli idrogeologici e di modelli geomeccanici per la realizzazione di analisi di stabilità che permettono di studiare il comportamento dell'ammasso in funzione degli specifici obiettivi richiesti.

La bontà dei risultati raggiunti in questo studio dipende certamente dalla notevole mole di informazioni raccolte durante la fase di indagine, giustificata sia dal carattere scientifico dello studio realizzato che dalla possibilità osservare in maniera continua l'ammasso in virtù della sua notevole esposizione superficiale e profonda, lungo la fitta rete di gallerie realizzate a scopo minerario. Sebbene un approccio di questo tipo potrebbe rivelarsi inapplicabile nella maggior parte dei casi reali, la procedura di implementazione dei modelli ha comunque mostrato come anche una dettagliata caratterizzazione del reticolo di fratture in un numero limitato di finestre d'osservazione (purché spazialmente correlabili) possa essere sufficiente ad acquisire le informazioni necessarie per la caratterizzazione delle proprietà statistiche dei parametri delle fratture e per la definizione delle leggi di distribuzione dei parametri a scala locale, estendendole poi all'ammasso applicando gli opportuni passaggi di scala e validando di volta in volta i risultati. Il software di simulazione utilizzato (FracMan) fornisce infatti una serie di metodologie per l'esecuzione di test di adattamento tra dati reali e dati simulati, permettendo la calibrazione

dei parametri introdotti mediante procedure di back analysis. Le metodologie applicate possono quindi essere di grande interesse in molteplici campi di applicazione, dagli studi di circolazione idrica, alla progettazione di interventi in sotterraneo alle analisi di stabilità dei versanti rocciosi.

Bibliografia

- Acuna J. A., Yortsos Y. C. (1995): "Application of fractal geometry to the study of networks of fractures and their pressure transient" *Water Resour. Res.*, **31** (3), pp. 527-540.
- Alboin C., Jaffre J., Joly P., Roberts J. Serres C. (2002): "A comparison of methods for calculating the matrix block source term in a double porosity model for contaminant transport". *Comput. Geosci.*, **6**, pp. 523-543.
- Aller J., Du Mouza J., Arnould M. (1996): "Measurement of the fragmentation efficiency of rock mass blasting and its mining applications". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **33**, pp. 125-140.
- Andersson J., Shapiro A. M., Bear J. (1984): "A stochastic model of a fractured rock conditioned by measured information" *Water Resour Res.*, **20** (1), pp. 79-88.
- Apuani T., Giani G.P., Merri A. (2009): "Geomechanical studies of an Alpine rock mass" in: *M. Diederichs and G. Grasselli (eds) – ROCKENG09: Proceedings of the 3rd CANUS Rock Mechanics Symposium, Toronto, May 2009. Abstract 4035*, pp. 1-8
- Andersson J., Dverstorp B. (1987): "Conditional simulations of fluid flow in three-dimensional networks of discrete fractures". *Water Resour Res.*, **23** (10), pp. 1876-1886.
- Artigiani E., Piovano F. (2008): "Ambito territoriale B5-ATE1: variante al progetto attuativo di coltivazione della cava "Bosco del Sasso"". Relazione 7603, Gennaio.
- Baecher G. B. (1983): "The behaviour of naturally fractured reservoirs". *Math Geology*, **15**, n°2, pp. 329-348.
- Baecher G. B., N. A. Lanney and H. H. Einstein (1977): "Statistical Description of Rock Properties and Sampling". *Proceedings of the 18th U.S. Symposium Rock Mechanics, American Institute of Mining Engineers*, 5C1-8.
- Bagde M. N., Raina A. K., Chakraborty A. K. and Jethwa J. L. (2002): "Rock mass characterization by fractal dimension" *Engineering Geology*, **63** (1-2), pp. 141-155
- Bai M., Elsworth D. (1994): "Modelling of subsidence and stress-dependent hydraulic conductivity for intact and fractured porous media". *Rock Mech. Rock Engng*; **27**, (4), pp. 209-234.
- Bai M., Elsworth D., Roegiers J.C. (1997): "Triple-porosity analysis of solute transport". *J. Contam. Hydro*, **28**, pp. 247-266.
- Bai M., Meng F., Elsworth D., Roegiers J. C. (1999): "Analysis of stress-dependent permeability in nonorthogonal flow and deformation fields". *Rock Mech. Rock Engng*; **32** (3), pp. 195-291.
- Bandis S., A.C. Lumsden and N.R. Barton (1981): "Experimental Studies of Scale Effects on the Shear Behaviour of Rock Joints". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, **18**, pp. 1-21.
- Bandis C.S., Lumsden A.C., Barton N.R. (1983): "Fundamentals of rock joint deformation". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, **20**, pp. 249-268.
- Bandis S.C., Barton N.R., Christianson M. (1985): "Application of a new numerical model of joint behaviour to rock mechanics problems". *Foundamentals of Rock Joints. Proceedings of the International Symposium on Foundamentals of Rock Joints, Bjorkliden, September 1985, Lulea Sweden: Centek*, pp. 345-356.

- 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. on Fundamentals of Rock joints*, Bjorkliden, September 1985, Lulea, Sweden: Centek, pp. 345-356.
- Baremlatt G. E., Zheltov I. P., Kochina I. N. (1960): "Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks". *Journal of Appl Math and Mech*, **25** (5), pp.1286-1303.
- Barla G. and Scavia C. (1987): "Characterization of rock mass by geostatistical analysis at the Masua Mine" *Proc. 6th International Congress on Rock Mechanics*, 2, pp. 777-786
- Barton N.R., Choubey V. (1977): "The shear strength of rock joints in theory and practice" *Rock Mechanics*, 10
- Barton N.R., Bandis S.C and Bakhtar K. (1985): "Strength, deformation and conductivity coupling of rock joints". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.*, **22**, pp. 121-140.
- Barton N. and S.C. Bandis (1990): "Review of Predictive Capabilities of JRC-JCS Model in Engineering Practice". *Proceedings, International Symposium on Rock Joints, Leon*, pp. 603-650.
- Bear J. (1972): *Dynamics of fluids in porous media*. Elsevier
- Bear J., Tsang C. F., de Marsily G. (1993): *Flow and contaminant transport in fractured rock*. Academic Press, Inc..
- Berkowitz B., Balberg I. (1993): "Percolation theory and its application to groundwater hydrology". *Water Resour Res*, 29 (4), pp. 775-794.
- Billiaux D., Chiles J. P., Hestir K, Long J. C. S. (1989): "Three-dimensional statistical modelling of a fractured rock mass. An example from the Fanay-Augeres mine". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* , 26 (3/4): pp. 281-299.
- Billiaux D. (1990): "Hidrogéologie des milieux fracturés. Géometrie, connectivité et comportement hydraulique" Document Bureau de Recherches Géologiques et Minières, 186.
- Bonsignore G., Ragni U. (1968): "Contributo alla conoscenza del cristallino dell'alta Valtellina e dell'alta Val Camonica". *Carta geologica d'Italia*, Foglio 19.
- Brace W. F. (1980): "Permeability of argillaceous and crystalline rocks". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **17**, pp. 241-251.
- Brent R.P. (1973): *Algorithms for Minimization without Derivatives*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Brown E.T. (ed) (1981): *Rock Characterization, Test and Monitoring*. Pergamonn Press, Oxford.
- Brown E.T., Hoek E. (1977): "Trends in Relationships between Measured In-Situ Stresses and Depth". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr*, **15**, pp. 211-215.
- Brown S. R., Scholz C. H. (1986): "Closure of rock joints". *Journal of Geoph Res*, B91, pp. 4939-4948.
- Brown S.R. (1987): "Fluid Flow Through Rock Joints, The Effect of Surface Roughness". *Journal of Geophysical Research*, **92**, pp. 1337-1347.
- Brown S.R. and C.H. Scholz (1986): "Closure of Rock Joints". *Journal of Geophysical Research*, 91, pp. 4939-4948.
- Brown S.R., Kranz R.L., Bonner B.P. (1986): "Correlation between the surface of natural rock joints". *Geophys. Res. Letters*, **13**, pp. 1430-1433.

- Burgess A. (1977): "Groundwater Movements Around a Repository – Regional Groundwater Flow Analysis". KBS 54:03 , 116 pp. Kaernbraenslesakerhet, Stockholm, Sweden.
- Burroughs P.A. (1981): "Fractal Dimensions of Landscapes And Other Environmental Data". *Nature*, **19**, pp. 240-242.
- Cacas M.C., Ledoux E., DeMarsily G., Tillie B., Barbreau A., Durand E., Feuga B., Peaudecerf P. (1990): "Modelling fracture flow with a stochastic discrete fracture network: calibration and validation 1. The flow model". *Water Resources Res.*, **26**, pp. 479-789.
- Carlsson A and Olsson T (1977a): "Storage in excavated rock caverns". *Proc. 1st Int. Symp. Rockstore '77*, Stockholm, 2, 301-7.
- Carlsson A and Olsson T (1977b): " Water Leakage in the Foresmark Tunnel, Upland, Sweden". *Sver. Geol. Unders*, C734, Stockholm.
- Charlaix E. (1986): "Percolation threshold in a random array of discs: a numerical simulation". *Journal of Phys*, **A19**, pp.1533-1536.
- Chaudhuri A., Sekhar M. (2005): "Stochastic finite element method for probabilistic analysis of flow and transport in a three dimensional heterogeneous porous formation". *Water Resour. Res.*, **41**, W09404.
- Chilles J. P. (1988): "Fractal and geostatistical methods for modelling of a fracture network". *Math Geol*; **20**, pp. 631-654.
- Ciotoli G., Finioia M. G. (2005): *Dalla statistica alla geostatistica, introduzione all'analisi dei dati geologici e ambientali*. Aracne, Roma.
- Conrad F., Jacquin C. (1973): "Representation of a two dimensional fracture network by a probabilistic model: application to calculation of the geometric magnitude of matrix blocks" *Rev IFT*, **28**, pp. 843-890.
- Davis J.C. (2002): *Statistics and data Analysis in Geology third edition*. Jhon Wiley & Sons, New York, pp. 638.
- De Dreuzy J. R, Davy P., Bour O. (2001): "Hydraulic properties of two-dimensional random fracture networks following a power law distribution: 1) effective connectivity". *Water Resour. Res.*, **37**(8), pp. 2065-2078.
- De Dreuzy J. R, Davy P., Bour O. (2001): "Hydraulic properties of two-dimensional random fracture networks following a power law distribution: 2) permeability of network based on lognormal distribution of apertures". *Water Resour. Res.*, **37** (8), pp. 2079-2095.
- Dershowitz W. S. (1984): Rock joints systems. PhD Thesis, MIT.
- Dershowitz W. S. and H. H. Einstein (1988): "Characterizing Rock Joint Geometry with Joint System Models". *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **21** (1), pp. 21-51.
- Dershowitz W.S., J. Geier K. Lee (1989): "Field Validation of Conceptual Models for Fracture Geometry". *Submitted to Rock Mechanics and Rock Engineering*.
- Dershowitz W.S., P. Wallmann, J.E. Geier and G. Lee (1991a): "Preliminary Discrete Fracture Network Modeling of Tracer Migration Experiments at the SCV Site". *Stripa Project Technical Report 91-23*, SKB, Stockholm.
- Dershowitz W.S., P. Wallmann and S. Kindred, (1991b): "Discrete Fracture Modeling for the Stripa Site Characterization and Validation Drift Inflow Predictions". *Stripa Project Technical Report 91-16*, SKB, Stockholm.

- Dershowitz W., K. Redus, P. Wallmann, P. LaPointe and C.L. Axelsson (1992): "The Implication of Fractal Dimension in Hydrology and Rock Mechanics". *SKB Technical Report TR92-17, SKB, Stockholm*.
- Dershowitz W. S., Miller I. (1995): "Dual porosity fracture flow and transport". *Geoph Research Letters*, **22** (11) pp.1441-1444.
- Dershowitz W. S., Lee G., Geier J., Foxford T., LaPointe P., Thomas A. (1998): "Fracman User Documentation". *Golder Associates*.
- Doe T.W. and J.D. Osnes (1985): "Interpretation of Well Test Geometry from Well Tests". *Proc. of the International Symposium on Fundamentals of Rock Joints, Bjorkliden, Sweden*.
- Doe T.J., Geier and J. Osnes (1989): "Estimation of Fracture Length and Conductivities Using Closely Spaced Well Tests". *Proceedings of the Third NEA/SKB Symposium on In Situ Experiments Associated with the Disposal of Radioactive Waste, Stockholm, September*, pp. 200-217.
- Doe T.W. and J.E. Geier: "Interpretation of Fracture System Geometry Using Well Test Data". *SKB Stripa Project Technical Report 90-xx, SKB, Stockholm*.
- Domenico P.A., Schwartz F.W. (1990): *Physical and Chemical Hydrogeology*. Jhon Wiley & Sons Inc., New York.
- Dverstorp B., Andersson J. (1989): "Application of the discrete fracture network concept with field data: possibilities of model calibration and validation". *Water Resour Res.* **25**, (3), pp. 540-550.
- Maillet E. (1905): *Essais d'hydraulique souterraine et fluviale*. Librairie Sci., A. Hermann, Paris.
- Efron B. (1982): "The Jackknife, the Bootstrap and other Resampling Plans". *SIAM Monograph* **38**, *Society of Industrial and Applied Mathematics*.
- Escuder Viruete J., Carbonell R., Jurado M.J. Martí D., Pérez-Estaún A. (2001): "Two-dimensional geostatistical modeling and prediction of the fracture system in the Albalá Granitic Pluton, SW Iberian Massif, Spain" *Journal of Structural Geology*, **23** (12), pp.
- Faybishenko B., Witherspoon P. A. (2000): "Dynamics of fluids in fractured rocks". *AGU geophysical monograph series*, 122.
- Fisher N., T. Lewis and B. Empleton (1987): "Statistics of Directional Data," *Cambridge University Press, Cambridge, U.K.*
- Gale J.E., Rouleau A. and Atkison L.C. (1985): "Hydraulic properties of fractures." *Proc. 17th Int. Congress of Int. Assoc. of Hydrogeologists, Tucson, Arizona*, **17**, 1-16
- Gale J.E. (1987): "Comparison of Coupled Fracture Deformation and Fluid Flow Models with Direct Measurements of Fracture Pore Structure and Stress-Flow Properties". *Proceedings of 23rd 28th U.S. Rock Mechanics Symposium, Tucson, Arizona, June 29-July 1*.
- Gangi A.F. (1978): "Variation of whole and fractured porous, rock permeability with confining pressure". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* **15**, pp. 249-257.
- Gattinoni P., Papini, M., Scesi L. (2001): "Geological risk in underground excavations". *World Tunnel Congress AITES-ITA 2001*, **1**, pp. 309-318.
- Gazzola D., Gosso G., Pulcrano E., Spalla M.I. (2000): "Eo-Alpine HP metamorphism in the Permian intrusive from the steep belt of the Central Alps (Languard-Campo Nappe and Tonale Series)". *Geodinamica Acta*, **13**(2-3), pp. 149-167.

- Gelhar L.W. (1987): "Applications of Stochastic Models to Solute Transport in Fractured Rocks". SKB TR 87-05.
- Gentier S., Billiaux D. (1989): "Caracterisation en laboratoire de l'espace fissural d'une fracture". *Proc. of the International Symp.on Rock at Great Depth*, Balkema.
- Ghosh A.(1990): "Role of Radial Cracks, Free Face and Natural Discontinuities of Fragmentation from Bench Blasting". PhD Thesis, University of Arizona.
- Gillespie P. A., Howard C. B., Walsh J. J., Watterson J. (1993): "Measurement and characterisation of spatial distributions of fractures". *Tectonophysics*, **226**, pp. 113-141.
- Gilmour H.M.P., D. Billiaux and J.C.S. Long (1986): "Models for Calculating Fluid Flow in Randomly Generated Three-Dimensional Networks of Disc-Shaped Fractures; Theory and Design of FMG3D, DISCEL and DIMES". Report LBL-19515 prepared for U.S. Department of Energy, Office for the Crystalline Repository Project by Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, California, USA.
- Goff J.A. (1990): "Comments on 'Fractal Mapping Of Digitized Images: Application To The Topography Of Arizona And Comparison With Synthetic Images' by J. Huang and D.L. Turcotte". *J. Geophys. Res.*, **95**(B4), 5159.
- Gueguen Y. and Dienes J. (1989): "Transport properties of rocks from statistics and percolation". *Int. Assoc. for Math. Geology*, **21**, 1-13.
- Heckman R.A., Towse D.F., Isherwood D. et al. (1979): "High Level Waste Repository Site Suitability Study". Status Report, NUREG/CR-**0578**.
- Hestenes M., Stiefel E. (1952): "Methods of Conjugate Gradients for Solving Linear Systems". *Journal of Research of the National Bureau of Standards*. **49** (6).
- Hoek E. and Bray J.W. (1981): *Rock slope engineering*. Ed. The Institute of Mining and Metallurgy.
- Hsieh P.A. (2002): "Some thoughts on modelling flow in fractured rocks". *Int. Groundwater Center Newsletter*. **20**.
- Huang J. and D.L. Turcotte (1989): "Fractal Mapping Of Digitized Images: Application To The Topography Of Arizona And Comparison With Synthetic Images". *J. Geophys. Res.*, **94** (b6), pp. 7491-7495.
- Hung C., Evans D. (1985): "A 3-dimensional computer model to simulate fluid flow and contaminant transport through a rock fracture system". NUREG/CR-**4042**, US Nuclear Regulatory Commission.
- Huyakorn P. S., Lester B. H., Faust C. R. (1983): "Finite element techniques for modelling groundwater flow in fractured aquifers". *Water Resour. Res.* **19** (4). pp. 1019-1035.
- Imaray S. (1955): "Flow of liquids trough cracker media". *Bull. of Water Res. Council, Israel* **5A** (1), 84.
- Indraratna B., Ranjith P. (2001): "Hydromechanical aspects and unsaturated flow in jointed rock". *A.A. Balkema Publishers*.
- ISRM (1981): *Suggested methods for rock characterization, testing and monitoring. ISRM suggested methods*. Ed E.T. Brown. Pergamonn Press.
- Ivanova V. M. (1991) : "Three dimensional stochastic modelling of rock fracture system". MSc Thesis, MIT.
- Ivanova V. M. (1998): "Geologic and stochastic modelling of fracture systems in rocks". Ph.D. Thesis, MIT, Cambridge.

- Yu Y.F. and Mostyn G.R. (1993): "Spatial correlation of rock joints" in: *Probabilistic methods in geotechnical engineering*, Balkema, Rotterdam pp. 241-255
- Kalenchuk K. S., Diederichs M. S., McKinnon S. (2006): "Characterizing block geometry in jointed rockmasses" *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, **43**, pp. 1212-1225
- Kazemi H. (1969): "Pressure transient analysis of naturally fractured reservoirs with uniform fracture distribution". *Soc. Pet. Eng. J.*, pp. 451-462.
- Kendorski F.S. and Mahtab M.A (1976): "Fracture patterns and anisotropy of San Manuel Quartz Monzanite". *Bull. Assoc. Engng. Geol.*, **13**, pp. 23-31.
- Kiraly L., Mathey B., Tripet J.P. (1971): "Fissuration et orientation des cavités souterraines: région de la Grotte de Milandre (Jura Tabulaire)". *Bull. Soc. Neuchâteloise Sc. Nat.*, **94**, pp. 99-114.
- Koikea K., Ichikawa Y. (2006): "Spatial correlation structures of fracture systems for deriving a scaling law and modeling fracture distributions", *Computers & Geosciences*, **32**, pp. 1079-1095
- Konzuk J. S., Kueper B. H. (2004): "Evaluation of cubic law based models describing single-phase flow through a rough walled fracture". *Water Resour. Res.*, **40**, W02404.
- La Pointe (1988): "A method to characterize fracture density and connectivity through fractal geometry". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, **25** (6), pp. 421-42.
- La Pointe, P.R et al. (1993): "Stochastic Estimation of Fracture Size Through Simulated Sampling". *Int. J. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **30** (7). pp. 1611-1617.
- La Point (April 2002): "Derivation of parent fracture population statistics from trace length measurements of fractal fracture populations". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **39** (3), pp. 381-388.
- Leckenby R. J., Sanderson D. J., Lonergan L.: "Estimating flow heterogeneity in natural fracture systems" *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, **148**, pp. 116-129
- Lee C. H. and Farmer I.W.(1990a): "Estimation of conducting aperture, fracture porosity and fracture permeability of rock masses". *Proc. 31st US Symp. on Rock. Mech.*, pp. 355-62.
- Lee C. H. and Farmer I.W.(1990b): "A simple method of estimating rock mass porosity and permeability". *Int. J. Mining and Geological Engineering*, **8**, pp. 83-92.
- Lee C.H., Farmer I. (1993): "Fluid flow in discontinuous rocks". *Chapman & Hall. London*.
- Liu E., Hudson J.A., Pointer T. (2000): "Equivalent medium representation of fractured rock". *Journal of Geophysical Research*, **105** (B2), pp. 2981-3000.
- Long J. C. S., Remer J. S., Wilson C. R., Witherspoon P. A (1982): "Porous media equivalent for network of discontinuous fractures". *Water Resour. Res.*, **18** (3), pp. 645-658.
- Long J. C. S. (1983): "A model for steady fluid flow in random three dimensional networks of disk shaped fractures". *Water Resour. Res.*, **18** (3), pp. 645-658.
- Long J. C. S., Witherspoon P.A. (1985): "The relationship of the degree of interconnectivity to permeability in fracture networks". *Journal of Geoph Res*, **90** (B4), pp. 3087-3097.
- Long J. C. S., Billaux D. ; (1987): "From field data to fracture network modelling: an example incorporating spatial structure" *Water Resour Res*, **23** (8), pp. 1201-1216.

- Long J. C. S., D. Billaux, K. Hestir and J. Chiles (1987): "Some Geostatistical Tools for Incorporating Spatial Structure in Fracture Network Modeling". *Proceedings of the Sixth International Congress on Rock Mechanics*, pp. 171-176.
- Long J. C. S., Hestir K (1990): "Permeability of random two-dimensional fracture networks". *Journal of Geoph Res.* **95** (B13), pp. 219-256.
- Louis C. (1967): "Étude des écoulements d'eau dans les roches fissurées et de leur influence sur la stabilité des massifs rocheux". *Bull. de la Direction des Etudes et Recherches, Serie A Nucleaire, Hydraulique, Termique*, **3**, pp. 5-132.
- Louis C.A. (1969): "A study of Groundwater Flow in Jointed Rock and Its Influence on the Stability of Rock Masses". *Rock Mechanics Research Report No. 10*, Imperial College, London.
- Louis C. A. (1974): "Rock hydraulics, in Rock Mechanics (ed. L. Muller)". *Springer Verlag, Vienna*, pp. 299-382.
- Maini Y.N.T., Noorishad J. and Sharp J. (1972): "Theoretical and field considerations on the determination of in situ hydraulic parameters in fractured rock". *Proc. Symp. on Percolation Through Fissured Rock, Int. Soc. for Rock Mech. and Int. Assoc. of Eng. Geology*.
- Mandelbrot B.B. (1985): "Self-Affine Fractals and Fractal Dimension". *Physica Scripta*, **32**, pp. 257-260.
- Manev G. and Avramova-Tacheva E. (1970): "On the valuation of strenght and resistance condition of the rocks in natural rock massif". *Proc. 2nd Cong. Int. Soc. Rock Mech. Belgrade*, Paper 1-10. pp. 59-64.
- Mardia K. V. (1972): "Statistics of Directional Data, Academic Press". *New York, NY*.
- Matheson G. D. (1988): "The collection and use of field discontinuity data in rock slope design", *Quarterly Journal of Engineering Geology*, **22**.
- Mavaro D.; Premoli M.A. (1998): "Istanza di ampliamento della cava di quarzite in sotterraneo sita in località Bosco del Sasso, in comune di Sondalo ai sensi degli artt. 12-14 della L.R. 14/98". Relazione Novembre.
- Mavaro D., Premoli M.A. (1998): "Istanza di ampliamento della cava di quarzite in sotterraneo sita in località Bosco del Sasso, in comune di Sondalo ai sensi degli artt. 12-14 della L.R. 14/98". Relazione tecnico-progettuale ed elementi di geologia, Dicembre.
- Mavaro D., Premoli M.A. (2004): "Progetto Attuativo delle opere necessarie al recupero ambientale". Relazione tecnica, Settembre.
- Mavaro D., Premoli M.A. (2004): "Relazione tecnica riguardante il progetto di coltivazione". Settembre.
- Meijerink J. A., Van der Vorst H. A. (1977): "An Iterative Solution Method for Linear Systems of Which the Coefficient Matrix is a Symmetric M-Matrix". *Mathematics of Computations*, **31** (137), pp.148-162.
- Meyer T., Einstein H. H. (2002): "Geologic stochastic modeling and connectivity assessment of fracture systems in the Boston Area", *Rock Mech. Rock Eng.*, **35** (1), pp. 23-44.
- Miller I. (1990): "MAFIC Version Beta 1.2 Matrix/Fracture Interaction Code with Solute Transport -- User Documentation". Golder Associates Inc. report prepared for Battelle Memorial Institute, Office of Waste Technology Development, Willowbrook, Illinois, USA.
- Mojtabai N., Cetintas A., Farmer I. W. and Savely J. (1989): "In-place and excavated block size distributions". *Proc. 30th US Symp. Rock Mechanics, West Virginia University*, pp.537-544.

- Montazer P., Chitombo G., King R. and Ubber W. (1982): "Spatial distribution of permeability around CSM.ONWI Room, Edgar Mine, Idaho Springs, Colorado". *Proc. 23rd Symp. on Rock Mechanics, University of California, Berkeley*, pp. 47-56.
- Mourzenko V. V., Thovert J. F., Adler P. M. (1996): "Geometry of simulated fracture". *Phys. Rev.*, E53, pp. 5606-5626.
- Moutsopoulos K.N., Konstantinidis A.A., Meladiotis I.D., Tzimopoulos C.D., Aifantis E.C. (2001): "Hydraulic and contaminant transport in multiple porosity media". *Transport Porous Media*, **42**, pp.265-292.
- Neuzil C.E. and Tracy J.V. (1981): "Flow through fractures" *Water Resources Res.*, **17**, pp.191-199
- Oda M. (1985): "Permeability tensor for discontinuous rock masses". *Géotechnique*, **35**, pp.483-95.
- Oda M. (1986): "An equivalent continuum model for coupled stress and fluid flow analysis in jointed rock masses." *Water Resources Res.*, **22**, pp. 1845-56.
- ONWI, 1978;
- Oron A. P., Berkowitz B (1998): "Flow in rock fractures: the local cubic law assumption re-examined". *Water Resour. Res.*, **34** (11), pp. 2811-2825.
- Pahl P.J. (1981): "Estimating the mean length of discontinuity trace". *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, **18**, pp. 221-228.
- Palmstrom, A., (1982): "The volumetric joint count – A useful and simple measure of the degree of rock mass jointing." *Proc. 4th Conf. Int. Assoc. Eng. Geol.*, vol 5, New Delhi, pp. 221-228.
- Painter S., Cvetkovic V. (2005): "Upscaling discrete network simulations: an alternative to continuum transport models". *Water Resour Res.*, **41**, W02002.
- Park H.J., T, West T. R., Woo I. (2005): "Probabilistic analysis of rock slope stability and random properties of discontinuity parameters, Interstate Highway 40, Western North Carolina, USA" *Engineering Geology*, **79**, pp. 230– 250
- Parney, R., Cladouhos, T., La Pointe, P., Dershowitz, W., Curran, B., (2000). Fracture- and production-data integration with discrete-fracture-network models. *J. Pet. Technol.*, **52** (12), pp. 60–61.
- Piggot A.R. and D. Elsworth (1990): "Laboratory Studies of Transport Within a Single Rock Fracture". *Rock Joints: Proceedings of the International Symposium on Rock Joints, Loen, Norway, June 4-6*.
- Potenza R. (1970): "Gabbro di Sondalo". *Formazioni geologiche fascicolo IV*.
- Potenza B., Carimati R., Potenza R, Testa B. (1985): "Considerazioni cronologiche sul filone trachitico di Sondalo". *Atti della Società Italiana di Scienze Naturali e del Museo Civico di Storia Naturale de Milano*. **126** (3-4), pp. 141-144.
- Potenza B., Carimati R., Potenza R. (1991): "Siliceous marbles and calcsilicate rocks in the "Gneiss del M. Tonale" Formation between M. Varadega and Passo di Guspessa (Valtellina, Lombardy)". *Atti della Società Italiana di Scienze Naturali e del Museo Civico di Storia Naturale de Milano*. **132** (18), pp. 229-240.
- Poulton M. M., Mojtabai N. and Farmer I. W. (1990): "Scale invariant behavior of massive and fragmented rock". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* **14**, 35-45.

Priest S.D., Hudson J.A. (1976): "Discontinuity spacing in rock". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **13**, pp. 135-148.

Priest S.D. (1993): *Discontinuity analysis for rock engineering*. Chapman & Hall, London.

Rabinovitch A., Bahat D., Melamed Z. (1999): "A note on joint spacing". *Rock Mech. Rock Eng.*, **32**, pp. 71-75.

Rafiee A. and Vinches M. (2008): "Application of geostatistical characteristics of rock mass fracture system in 3D model generation". *International Journal of Rock Mechanics & Mining Science*, **45**, pp. 644-652,

Rasmussen T.C. (1988): "Fluid flow and solute transport through three-dimensional networks of variably saturated discrete fractures". Ph.D. Dissertation, Department of Hydrology and Water Resources, University of Arizona.

Raven, K.G. and Gale, J.E. (1976): "Evaluation of structural and groundwater conditions in underground mines and excavations : subsurface containment of solid radioactive wastes". *Geol. Survey of Canada , Progress Report EMR/GSC_RW*.

Rouleau A. and Gale J. E. (1985): "Statistical characterization of the fracture system in the Strypa Granite, Sweden". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **22**, pp. 353-67.

Rowe R.K., Booker J.R. (1990): "Contaminant migration in a regular two or three dimensional fractured network: reactive contaminants". *International Journal of numerical and analytical Methods in Geomechanics*, **14**, pp. 401-425.

Ryan T.M. (1987): "A Laboratory Assesment of Flow Characteristics and Permeability of Fractures in Rock". *MS Thesis, University of Arizona, Tucson*.

Ryan T.M., Farmer I.W and Kimbrell A. F (1987): "Laboratory determination of fracture permeability". *Proc. 28th US Symp on Rock Mechanics, Tucson Arizona*, pp. 595-600.

Scesi L., Gattinoni P.(2007): *La circolazione idrica negli ammassi rocciosi*. Casa Editrice Ambrosiana, Milano.

Scott J. H., Lee F.T., Carroll R.D. and Robinson C.S. (1968): "The constructions parameters in the Straight Creek Tunnel pilote bore". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, **5**, pp. 1-30.

Selroos J.O., Walker D.D., Strom A., Gylling B., Follin S.(2002): "Comparison of alternative modeling approaches for groundwater flow in fractured rock". *Journal of Hydrology*, **257**, pp. 174-188

Shante V.K.S. and Kirkpatrick S. (1971): "Introduction to percolation theory". *Adv. Phys.*, **20**, pp. 325-57.

Siegel (1956);

Singhal B. B. S., Gupta R. P. (1999): "Applied hydrogeology of fractured rocks". *Kluwer Academic Press*.

Sitharam T. G., Sridevi J., Shimizu N. (2001): "Practical equivalent continuum characterization of jointed rock masses". *Int J Rock Mech Min Sci Geomech Abstr*, **38** (3), pp. 437-448.

Snow D. T. (1968a): "Rock fracture spacings , openings and porosities". *J. Soil Mech. Found. Div., ASCE*, **94** (SM1), pp. 73-91.

Snow D. T. (1968b): "Hydraulic characteristics of fractured metamorphic rocks of the front range and implications to the Rocky Mountain Arsenal Well". *Col. Sch. Mines Quart.*, **63**, pp. 167-99.

- Snow D. T. (1968c): "Fracture deformation and changes of permeability and storage upon changes of fluid pressure". *Col. Sch. Mines Quart.*, **63**, pp. 201-44.
- Snow D. T. (1969): "Anisotropic permeability of fractured media". *Water Resour Res*, **5** (6), pp. 1273-1289.
- Snow D.T. (1970): "The frequency and apertures of fractured rock". *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, n. 7.
- Spalla M I, Zucali M, Di Paola S, Gosso G. (2000): "A critical assessment of the tectono thermal memory of rocks and definition of tectono-metamorphic units; evidence from fabric and degree of metamorphic transformations". *Geological Society Special Publications*. **243**, pp 227-247.
- Spalla M.I., Lardeaux J.M., Dal Piaz G.V., Gosso G., Messiga B. (1996): "Tectonic significance of Alpine eclogites". *Journal of Geodynamics*. **21** (3), pp. 257-285.
- Spalla M.I., Zucali M., Salvi F., Gosso G., Gazzola D. (2004): "Tectono-metamorphic map of the Languard-Campo; Serie del Tonale nappes between upper Val Camonica and Valtellina; Central Italian Alps, Austroalpine domain". *Memorie di Scienze Geologiche*. **55**; pp. 105-118.
- Spalla M.I., Marotta M.A. (2007) : "P-T evolutions vs. numerical modelling: a key to unravel the paleozoic to early-Mesozoic tectonic evolution of the Alpine area". *Periodico di mineralogia*.
- Stratford R.G., A.W. Herbert and C.P. Jackson (1990): "A Parameter Study of the Influence of Aperture Variation on Fracture Flow and the Consequences in a Fracture Network". *Rock Joints: Proceedings of the International Symposium on Rock Joints*, Loen, Norway, June 4-6, pp. 413-422.
- Suidicky E.A. (1990): "The Laplace transform Galerkin technique for efficient time-continuous solution of solute transport in double porosity media". *Geoderma*, **46**, pp. 209-232.
- Swan G. (1983): "Determination of stiffness and other joint properties from roughness measurements." *Rock Mechanics and Rock Engineering*, **18**, pp. 19-38
- Tran N. H. (2007): "Fracture orientation characterization: Minimizing statistical modelling errors" *Computational Statistics & Data Analysis*, **51**, pp. 3187 – 3196
- Tribuzio R., Thirlwall M.F. (1987): "Age and petrogenesis of the gabbroic rocks of the Sondalo pluton (Central Alps, Northern Italy)". *Abstract of "3rd Workshop on Alpine Geological Studies"*, **4**, pp 134-135.
- Tribuzio R., Thirlwall M.F., Messiga B. (1999): "Petrology, mineral and isotope geochemistry of the Sondalo gabbroic complex (Central Alps, northern Italy); implications for the origin of post-Variscan magmatism". *Contributions to Mineralogy and Petrology*. **136** (1-2), pp 48-62.
- Tsang Y.W. and P.A. Witherspoon (1984): "The Dependence of Fracture Mechanical and Flow Properties on Fracture Roughness and Sample Size". *Journal of Geophysical Research*, **88** (B3), pp 2359-2367.
- Turcotte D.L. (1986): "Fractals and Fragmentation". *J. Geophys. Res.*, **92**, 1921-6.
- Veneziano D. (1978): "Probabilistic model of joints in rocks". Unpublished manuscript, MIT, Cambridge.
- Veneziano (1979): "Probabilistic Model of Joints in Fractured Rock". Technical Report, Department of Civil Engineering, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- Villaescusa E. (1993): "Statistical modelling of rock jointing" in Li&Lo, *Probabilistic methods in geotechnical Engineering*, Balkema, Rotterdam.

- Viruete J.E., Carbonell R., Jurado M.J., Martí D., Pérez-Estaun A. (2001): "Two-dimensional geostatistical modeling and prediction of the fracture system in the Albala Granitic Pluton, SW Iberian Massif, Spain" *Journal of Structural Geology*, **23** pp. 2011-2023
- Walsh J.B. (1981): "Effects of pore pressure and confining pressure on fracture permeability". *Int. J. Rock. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, **18**, pp. 429-435.
- Walsh J.B e Brace (1984): "The effects of pressure on porosity and the transport properties of rock". *J. Geophys. Res.*, **80**, pp. 9425-9431.
- Wang J.S.Y. and T.N. Narasimhan (1988): "Fractal and Statistical Characterization of Rough Fracture". *Symposium Proceedings of International Conference on Fluid Flow in Fractured Rocks, Georgia State University, Atlanta, Georgia, May 15-18*, pp. 220-228.
- Wang J.S.Y., T.N. Narasimhan and C.H. Scholz (1988): "Aperture Correlation of a Fractal Fracture". *Journal of Geophysical Research*, **93**, pp. 2216-2224.
- Wang M., Kulatilake P. H. S. W., Um J., Narvaiz J.(2002): "Estimation of REV size and three-dimensional hydraulic conductivity tensor for a fractured rock mass through a single well packer test and discrete fracture fluid flow modeling", *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, **39** (7), pp. 887-904
- Warren J. E., Root P. J. (1963): "The behaviour of naturally fractured reservoirs". *Soc of Petrol. engrs*, **3**, pp. 245-255.
- Wilson C. R. and Witherspoon P.A. (1970): "An Investigation of Laminar Flow in Fractured Porous Rock". May, University of California, department of Civil Engineering, Berkeley, CA. Quoted in Ziegler, T. W., 1976.
- Witherspoon P. A., Wang J. S. Y., Iway K., Gale J. E. (1980): "Validity of cubic law for fluid flow in a deformable rock fracture". *Water Resour Res*, **16** (6), pp. 1016-1024.