



UNIVERSITA' DI ROMA SAPIENZA

FACOLTA' DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E NATURALI

DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE DELLA TERRA

XXIII CICLO

Approcci equivalenti continui

nella costruzione di modelli geologico-tecnici

di versanti naturali in roccia

Docente guida:

Prof. Alberto Prestininzi

Codocenti guida:

Prof.ssa Francesca Bozzano

Dott. Salvatore Martino

Dottorando:

Dott. Alfredo Montagna

Matr. 692764

ANNO ACCADEMICO 2010 - 2011

INDICE

1. TEMI E OBIETTIVI DELLA RICERCA	4
2. L'AREA DI STUDIO.....	14
2.1. INQUADRAMENTO GEOLOGICO-STRUTTURALE.....	14
2.2 RILEVAMENTO GEOLOGICO DI DETTAGLIO.....	19
2.2.1 Substrato cristallino-metamorfico	19
2.2.2 Sabbie Plio-pleistoceniche	25
2.2.3 Depositi marini terrazzati	27
2.2.4 Depositi di raccordo, antichi e recenti	30
2.2.5 Depositi alluvionali e depositi di piana costiera	31
2.2.6 Depositi eluvio-colluviali	32
2.2.7 Corpi di frana.....	32
2.3 ASSETTO GEOLOGICO-STRUTTURALE DI DETTAGLIO.....	33
2.4 MODELLO GEOLOGICO E CARATTERI MORFOLOGICI DELLE FRANE PRESE IN ESAME.....	36
2.4.1 La frana sismoindotta del Monte Pacì.....	37
2.4.2 La frana Feliciusu.....	43
2.4.3 La frana Santa Trada.....	47
3. CARATTERIZZAZIONE FISICA E MECCANICA DELLA MATRICE ROCCIOSA.....	54
3.1 LE PROVE DI LABORATORIO	55
3.1.1 Caratterizzazione fisica.....	55
3.1.2 Prove di compressione uniassiale (UCS).....	56
3.1.3 Prove di trazione indiretta (<i>brazilian test</i>)	59
3.1.4 Prove ultrasoniche	61
3.1.5 Prove di compressione triassiale	63
3.1.6 Discussione dei dati ottenuti dalle prove di laboratorio.....	70
3.2 <i>POINT LOAD TEST</i>	75
4. I RILIEVI GEOMECCANICI IN SITO	78
4.1 I RILIEVI GEOMECCANICI IN AFFIORAMENTO	78
4.1.1 Le schede geomeccaniche per gli affioramenti.....	79
4.1.2 Correlazione tra J_v e I_b	90
4.1.3 Sintesi dei dati dei rilievi in superficie e confronto con i metodi tradizionali	94

4.2	I RILIEVI GEOMECCANICI SU FRONTI DI SCAVO IN GALLERIA	102
4.2.1	Le schede geomeccaniche per i fronti di scavo in galleria.....	102
4.2.2	Confronto tra le diverse metodologie di rilievo utilizzate	111
5.	LA CLASSIFICAZIONE DEGLI AMMASSI ROCCIOSI	119
5.1	L'INDICE SINTETICO DI DISCONTINUITA'	120
5.2	IL CRITERIO DI ROTTURA DI HOEK & BROWN: UN APPROCCIO EQUIVALENTE CONTINUO PER DEFINIRE I PARAMETRI DI RESISTENZA.....	131
5.3	LA DEFORMABILITA' DEGLI AMMASSI ROCCIOSI FRATTURATI: L'APPROCCIO EQUIVALENTE CONTINUO DI SRIDEVI & SITHARAM	136
6.	I MODELLI GEOLOGICO-TECNICI.....	147
6.1	IL MODELLO GEOLOGICO-TECNICO DELLA FRANA PACI'	150
6.2	IL MODELLO GEOLOGICO-TECNICO DELLA FRANA FELICIUSU	152
6.3	IL MODELLO GEOLOGICO-TECNICO DELLA FRANA SANTA TRADA	154
7.	APPLICAZIONE DEI MODELLI GEOLOGICO-TECNICI ALLE ANALISI DI STABILITA' DEI VERSANTI.....	156
7.1	METODO NUMERICO ALLE DIFFERENZE FINITE: IL CODICE DI CALCOLO FLAC	156
7.2	ANALISI DI STABILITA' ALL'EQUILIBRIO LIMITE GLOBALE: METODO DI FELLENIOUS	157
7.3	MODELLAZIONE NUMERICA DELLA FRANA DEL MONTE PACI'	162
7.4	ANALISI DI STABILITA' DELLA FRANA FELICIUSU.....	168
7.5	MODELLAZIONE NUMERICA DELLA FRANA SANTA TRADA	171
8.	CONCLUSIONI	177
	BIBLIOGRAFIA	179

ELENCO APPENDICI

APPENDICE 1 – POINT LOAD TEST

**APPENDICE 2 – SCHEDE GEOMECCANICHE DI SINTESI DEI 144 RILIEVI SU
AFFIORAMENTI IN SUPERFICIE**

**APPENDICE 3 – SCHEDE GEOMECCANICHE DI SINTESI DEI 27 RILIEVI SU FRONTI
DI SCAVO IN GALLERIA**

**APPENDICE 4 – DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DI RESISTENZA DI AMMASSO:
CRITERIO DI ROTTURA DI HOEK & BROWN**

APPENDICE 5 – ANALISI DI STABILITA' DELLA FRANA FELICIUSU: METODO DI FELLENIUS – TABELLE DI CALCOLO

ELENCO ALLEGATI

ALLEGATO 1 – CARTA GEOLOGICA

TAVOLA 1.1 – CARTA GEOLOGICA – ZONA A

TAVOLA 1.2 – CARTA GEOLOGICA – ZONA B

ALLEGATO 2 – CARTE GEOLOGICHE

TAVOLA 2.1 – CARTA GEOLOGICA CON ELEMENTI GEOMORFOLOGICI DELL'AREA DI FRANA DEL MONTE PACI'

TAVOLA 2.2 – CARTA GEOLOGICA CON ELEMENTI GEOMORFOLOGICI DELL'AREA DI FRANA FELICIUSU

TAVOLA 2.3 – CARTA GEOLOGICA CON ELEMENTI GEOMORFOLOGICI DELL'AREA DI FRANA SANTA TRADA

ALLEGATO 3 – CARTE GEOMECCANICHE E GEOLOGICO-TECNICHE

TAVOLA 3.1 – CARTA GEOMECCANICA E GEOLOGICO-TECNICA DELL'AREA DI FRANA DEL MONTE PACI'

TAVOLA 3.2 – CARTA GEOMECCANICA E GEOLOGICO-TECNICA DELL'AREA DI FRANA FELICIUSU

TAVOLA 3.3 – CARTA GEOMECCANICA E GEOLOGICO-TECNICA DELL'AREA DI FRANA SANTA TRADA

1. TEMI E OBIETTIVI DELLA RICERCA

In un lavoro di ricerca della durata di tre anni, e anche più, si corre il rischio, a causa ad esempio di sopraggiunte conoscenze che in questo arco temporale si acquisiscono, di perdere di vista l'obiettivo iniziale del progetto, o di doverlo inevitabilmente ricalibrare alla luce dell'evoluzione dello stesso. Per tale motivo, ritengo opportuno, prima di addentrarmi negli specifici dettagli delle varie attività svolte, dedicare alcune pagine al tema centrale del mio dottorato di ricerca e al perché ho deciso di affrontarlo secondo determinati aspetti e ponendo maggiore attenzione su specifiche tematiche, tralasciando, inevitabilmente, l'approfondimento di altre.

La misurazione di una proprietà fisica di un determinato sistema è inevitabilmente accompagnata da una incertezza o errore sul valore misurato. Tali errori, che possono essere di diversi tipi (ad esempio sistematici o accidentali), possono essere in genere stimati, soprattutto in presenza di un grande numero di dati sperimentali a disposizione. Quindi, ogni volta che si effettua una misura si introducono diversi tipi di errore, ed il valore misurato non può che essere incerto. Questa elementare regola, valida per qualsiasi fenomeno fisico e per qualsiasi sistema si voglia studiare, assume carattere preponderante nello studio degli ammassi rocciosi e della loro fratturazione, principale oggetto di studio di questa ricerca.

Nell'approcciare per la prima volta un rilievo geomeccanico su un affioramento roccioso fratturato, ho avuto, sin da subito, l'impressione di trovarmi di fronte ad un sistema naturale estremamente complesso ed articolato, in cui, la soggettività di ogni singolo operatore assume una notevole importanza. In pratica, ho pensato che se dieci diversi operatori avessero condotto un rilievo sullo stesso affioramento, le misure ottenute sarebbero state tutte diverse tra loro. E' stata probabilmente questa oggettiva difficoltà e soggettività nell'approccio allo studio degli ammassi rocciosi fratturati ad affascinarmi e farmi decidere di investire questi anni di ricerca su questa specifica tematica.

Nel corso di questi anni questa mia iniziale sensazione, circa le difficoltà nella descrizione di un ammasso roccioso, è stata da un lato confermata e dall'altro è in parte venuta meno a seguito sia della lettura della letteratura scientifica a riguardo, sia, soprattutto dalle dirette esperienze sul campo che in questi anni ho accumulato. Per cercare di spiegare al meglio quanto detto, credo si debba partire dal concetto di ammasso roccioso e da come questo sistema fisico sia stato trattato e studiato al fine di descriverne al meglio le caratteristiche.

Un ammasso roccioso è usualmente costituito da blocchi di materiale roccioso separati da giunti o da discontinuità che ne interrompono la continuità fisica. Il suo comportamento fisico e meccanico dipende, quindi, sia dalle proprietà del materiale roccioso intatto, sia dalle caratteristiche delle

discontinuità. In più, spesso, anche quando il materiale roccioso è isotropo, le discontinuità possono introdurre nell'ammasso una struttura orientata, facendone derivare, quindi, una anisotropia del comportamento meccanico dell'ammasso. Da ciò si evince che le discontinuità, intese come elementi piani che individuano e separano blocchi rocciosi, sono responsabili della variabilità delle proprietà e dei comportamenti degli ammassi rocciosi, costituendo il fattore che maggiormente può influenzarne il comportamento sia meccanico che idraulico (Scesi & Papini, 1995). Essendo, quindi, il ruolo svolto dalle discontinuità notevole in un vasto campo di interessi geologico-tecnici, idrogeologici e ingegneristici, di conseguenza, il loro studio è sempre stato una delle esigenze più sentite soprattutto dai progettisti che ne richiedono una descrizione di maggior dettaglio quantitativo al fine di effettuare approfondite modellazioni numeriche.

Quando si esegue un rilievo geomeccanico ci si trova davanti un ammasso roccioso che racchiude in sé tutta la storia geologica della formazione cui appartiene e da cui derivano le sue attuali caratteristiche geotecniche. Diversi sono infatti i fattori che possono determinare tali caratteristiche, come di seguito elencati:

- fattori genetici, che ne determinano la costituzione petrografica;
- fattori diagenetici, che possono modificare il legame tra i minerali o i granuli costituenti l'ammasso (come, ad esempio, la cementazione);
- fattori tettonici, che sono responsabili della maggior parte delle discontinuità presenti nella roccia;
- le condizioni di alterazione, sia esogena (*weathering*), che endogena (*alteration*), che possono modificare profondamente le caratteristiche di qualità dell'ammasso roccioso;
- fattori antropici, quali ad esempio il disturbo causato da un taglio stradale o da attività estrattive.

A questi fattori, che si riferiscono agli ammassi rocciosi "in posto", se ne può aggiungere uno relativo all'eventuale coinvolgimento di una formazione rocciosa in un evento gravitativo, che costituisce una ulteriore causa di fratturazione dell'ammasso.

Come è noto, ed anche facilmente intuibile, le maggiori difficoltà nella descrizione di un ammasso roccioso risiedono nello studio delle discontinuità che lo caratterizzano, mentre la determinazione delle proprietà della roccia intatta sono più facilmente determinabili. Nelle pagine successive di questa tesi sarà illustrato come attraverso delle specifiche indagini di laboratorio, appositamente eseguite, sia stato possibile determinare tali caratteristiche.

Per quanto riguarda la definizione delle caratteristiche delle discontinuità presenti in un ammasso roccioso, non si può non accennare alle norme ISRM (2007). Queste norme costituiscono le linee

guida per ogni rilievo geomeccanico standard e si basano sulla determinazione di alcune proprietà della fratturazione di seguito elencate:

- Orientazione;
- Sistematicità (numero di set di discontinuità);
- Spaziatura;
- Estensione;
- Rugosità;
- Apertura;
- Riempimento;
- Resistenza delle pareti;
- Stato idrico;
- Dimensione rappresentativa dei blocchi.

In questa sede ritengo superfluo soffermarmi più di tanto sulle singole voci che l'ISRM propone. Faccio solo alcune osservazioni utili ad inquadrare meglio la tematica e le convinzioni che mi hanno portato ad affrontarla in una determinata maniera. Innanzitutto si può notare come il numero dei parametri utili a descrivere la fratturazione di un ammasso sia piuttosto elevato, anche se alcune voci sono tra loro intrinsecamente collegate. Questo da una parte ci conferma come il sistema da studiare sia estremamente complesso, ma ci invita anche a dover fare una scelta tra tutte queste voci in funzione sia della loro relativa importanza, sia degli specifici obiettivi di chi voglia cimentarsi con lo studio degli ammassi rocciosi. In questo la letteratura che ha caratterizzato gli ultimi decenni ha evidenziato come sia necessario prendere in considerazione, di volta in volta, i parametri che più sono legati al fenomeno fisico che si vuole descrivere. Ad esempio, coloro i quali si sono cimentati nello studio degli ammassi rocciosi al fine di definirne la proprietà meccaniche hanno preso in maggiore considerazione caratteristiche come la spaziatura tra le discontinuità, la resistenza delle pareti, la rugosità o la dimensione tipica dei blocchi, mentre chi si è occupato degli ammassi rocciosi con un occhio di riguardo ad esempio verso la permeabilità (all'acqua o ai gas) degli stessi ha posto in primo piano caratteristiche quali il riempimento delle fratture, stato idrico, apertura e continuità tra di esse.

Una prima distinzione tra le caratteristiche delle discontinuità precedentemente elencate riguarda quelle che si riferiscono ad ogni singola discontinuità presente in un ammasso roccioso (orientazione, apertura, riempimento, estensione, rugosità, resistenza delle pareti), e quelle che si riferiscono al rapporto tra le varie discontinuità, come ad esempio la spaziatura e la sistematicità, oppure allo stato di fratturazione complessivo dell'ammasso preso in considerazione come la

dimensione rappresentativa dei blocchi. Se si vuole studiare il comportamento di un ammasso roccioso, ad esempio alla scala dell'affioramento, è necessario prendere in considerazione volumi tali da comprendere un numero significativo di discontinuità in esso presenti. Ciò presuppone che questo numero sia tanto più elevato quanto maggiore è la "densità" dei giunti presenti. In molti casi, quindi, per descrivere un piccolo volume di materiale roccioso è necessario ottenere una enorme quantità di dati, siccome ad ognuna delle discontinuità incontrate si dovrebbero associare almeno sei differenti proprietà. E' facile comprendere come, nel caso si volesse analizzare un volume di roccia in sito alla scala perlomeno del versante, ciò risulterebbe alquanto difficoltoso se non impossibile da realizzare. Da ciò ne consegue che, per meglio descrivere il comportamento degli ammassi rocciosi presenti in sito, è meglio affidarsi a quei parametri in grado di descrivere il grado di fratturazione degli stessi nel loro complesso. Tra questi, oltre alla già citata dimensione rappresentativa dei blocchi, occorre ricordare il numero di discontinuità per unità di volume di un ammasso, e l'indice RQD (*Rock Quality Designation Index*). Quest'ultimo, ricavabile preferenzialmente dalle carote dei sondaggi, definito come la somma in percentuale di carote intatte la cui lunghezza sia almeno di 0,1 m, scalata rispetto alla lunghezza totale, è, senza dubbio, uno dei più noti e utilizzati sistemi di classificazione degli ammassi rocciosi. Il suo valore, espresso in percentuale, fornisce una valida indicazione circa la qualità dell'ammasso roccioso che può essere così classificato da scadente ad ottimo (Deere, 1964; Deere & Miller, 1966). In più, occorre ricordare che il valore di RQD può essere ricavato, in assenza di dati di sondaggio, direttamente dal numero di discontinuità per unità di volume (J_v) attraverso la formula di Palmström (1982), oppure dalla spaziatura media dei sistemi di discontinuità riconosciuti nell'ammasso attraverso la relazione di Priest & Hudson (1976). Questo per dire come tutti questi tre parametri che descrivono la densità della fratturazione dell'ammasso roccioso siano intrinsecamente legati tra loro. Si vedrà in seguito come anche in questo lavoro di ricerca queste relazioni tra i più importanti parametri descrittivi di un ammasso roccioso abbiano avuto un peso molto importante nelle scelte che sono state fatte e nei risultati cui si è giunti.

Questi tre parametri, la dimensione rappresentativa dei blocchi (d'ora in poi denominato Indice dei blocchi, I_b , espresso in cm), il numero di discontinuità su unità di volume (J_v) e l'indice RQD, costituiscono una parte fondamentale nei principali sistemi di classificazione degli ammassi rocciosi fratturati noti in letteratura. Tra queste quelle più importanti ed utilizzate sono certamente quella di Bieniawski (1973 e successive modifiche), di Wickham et alii (1972) e di Barton et alii (1974). Ognuna di esse fornisce un valore numerico (rispettivamente RMR, RSR e Q) derivato dalla somma di indici parziali stimati attraverso la valutazione qualitativa o quantitativa dei parametri e delle condizioni viste in precedenza. In più, nella classificazione di Bieniawski è presente un ulteriore

indice, definito *Basic RMR* (BRMR), da cui è possibile ricavare, attraverso una semplice relazione il parametro G.S.I. (Geological Strength Index) (Hoek, 1994). Questa grandezza è collegata ai fattori m , a ed s dell'ammasso roccioso intatto, necessari per la definizione del criterio di rottura di Hoek e Brown (Hoek et alii, 2002) che consente di ricavare i valori di angolo di attrito e di coesione per un ammasso roccioso fratturato. Questi sistemi classificativi vengono tuttora ampiamente utilizzati in quanto consentono di standardizzare la raccolta e la presentazione dei parametri significativi e danno la possibilità di fornire una base comune per trasferire le esperienze acquisite da progettisti diversi in siti diversi. Essi forniscono in pratica un giudizio complessivo della "qualità" dell'ammasso roccioso fratturato.

In letteratura sono presenti altri sistemi classificativi che si propongono di descrivere, in maniera quanto più possibile oggettiva le proprietà degli ammassi rocciosi fratturati alla scala dei versanti. Tra questi è opportuno citare in questa sede quello proposto da Hudson & Harrison (1992). Questo approccio, definito RES (*Rock Engineering Systems*) (Hudson, 1992), si propone di definire una classificazione oggettiva degli ammassi rocciosi direttamente collegata alle analisi di stabilità di versante, nonché adatta ad indicare la presenza di aree critiche sugli stessi versanti. Questa metodologia prevede una serie di passaggi a partire dalla scelta dei parametri ritenuti rilevanti per il problema, per poi condurre le analisi delle relazioni binarie tra i singoli parametri, la scelta dei pesi da attribuire alle diverse interazioni, l'assegnazione di un punteggio alle differenti classi di parametri e, infine, il calcolo dell'indice di instabilità degli ammassi rocciosi. La metodologia RES è stata utilizzata anche in Italia (Mazzoccola & Hudson, 1996) per studiare l'area della Valchiavenna (SO), nelle Alpi Centrali. A conclusione del loro lavoro, gli autori sostengono che è necessario tenere in considerazione tutti i parametri disponibili ai fini dell'applicazione del metodo RES, per poter prevedere il potenziale di instabilità nel sito analizzato. Nel caso specifico sono stati presi in considerazione ben 19 parametri relativi ai più svariati fattori che possono le condizioni di sito: dati geologico-strutturali, informazioni climatiche (piogge, cicli gelo-disgelo), instabilità pregresse, *weathering*, proprietà della roccia intatta e delle singole discontinuità, condizioni idrauliche, morfologia e orientazione dei versanti e altro. Evidentemente non per tutte queste proprietà è stato possibile estrapolare un dato prettamente quantitativo, dovendo ricorrere, anche in questo caso, all'attribuzione di punteggi.

Proprio la distinzione tra dati, e di conseguenza risultati, qualitativi rispetto a dati quantitativi riguardanti le caratteristiche di fratturazione degli ammassi rocciosi è stata un altro elemento discriminante nelle scelte che sono state fatte in questo lavoro di ricerca. Infatti, un obiettivo è stato quello di individuare e, quindi, di utilizzare esclusivamente parametri quantitativi, determinabili

direttamente in sito e tramite semplici relazioni matematiche note in letteratura. Ad esempio è difficile determinare la resistenza “media” delle discontinuità presenti in un ammasso roccioso laddove esse presentino del materiale di riempimento, in quanto esso può essere rappresentato da diverse tipologie di materiale (apportato dall'esterno, derivante dalla disgregazione meccanica o chimica delle pareti, oppure essere materiale di cementazione), così come ci possono essere delle fratture prive di materiale di riempimento. Se quindi è possibile determinare le caratteristiche di una singola superficie di discontinuità presente in un ammasso, nel trasporre tale informazione ad un intero volume di roccia, in cui è presente un elevato numero di fratture, vengono certamente meno i criteri di rigosità necessari a definire un parametro accettabile sotto il profilo numerico. Al contrario, se ad esempio prendiamo in considerazione un parametro quale la spaziatura delle discontinuità, piuttosto che la loro sistematicità, evidentemente sarà possibile stimare il loro valore in rapporto ad un qualsivoglia volume di roccia, seguendo rigorosi criteri sia matematici che statistici.

In definitiva, in questo progetto di ricerca è stata privilegiata la determinazione di quei parametri che descrivessero non una caratteristica della singola discontinuità, ma dell'ammasso roccioso, le cui misure potessero andare a costituire un *data base* vasto e ragionevolmente trattabile secondo criteri statistici e geostatistici e, infine, che avessero la possibilità di essere misurati in maniera “semplice” e diretta in sito. Questo ultimo concetto è, a mio parere, molto importante, soprattutto in relazione all'eventuale integrazione tra dati geomeccanici acquisiti in tempi diversi e da differenti operatori. Infatti, la determinazione dei dati geomeccanici in sito è, inevitabilmente, influenzata dalla sensibilità dell'operatore che esegue il rilievo, che, come è ovvio, è notevolmente più variabile rispetto a quella di un qualsiasi strumento utilizzato per ottenere dati di diversa natura. Al fine di minimizzare la soggettività del singolo operatore è quindi risultato importante scegliere parametri per quanto possibile di “facile determinazione”.

Quanto detto finora è utile a comprendere le scelte che sono state compiute in fase di acquisizione dei dati (esecuzione dei singoli rilievi geomeccanici). Queste scelte sono state comunque influenzate anche da quello che è stato il principale obiettivo di questo lavoro di ricerca.

L'obiettivo è quello di costruire dei modelli geologico-tecnici di versanti naturali in roccia, utilizzando i principali parametri descrittivi circa la fratturazione degli ammassi rocciosi, in accordo con quanto precedentemente esposto. E' stato dunque necessario eseguire quanti più possibili rilievi geomeccanici puntuali, pur essendo evidentemente vincolati alla effettiva disponibilità di idonei affioramenti in campagna.

Con la raccolta di numerosi dati sperimentali in sito è stato possibile costruire un database georiferito dei parametri geomeccanici, e definire una loro accurata analisi basata su criteri essenzialmente statistici. Questi due fondamentali passaggi hanno consentito la realizzazione di uno dei punti fondamentali di questo lavoro di ricerca, ossia la definizione di un indice che sintetizzasse, in un solo numero, le principali caratteristiche di fratturazione degli ammassi rocciosi analizzati. Nel giungere alla definizione di tale indice ci si è basati sia su criteri prettamente statistici, sia su considerazioni di natura geologica che ovviamente non potevano essere tralasciate. Infine, tramite elaborazioni geostatistiche e di analisi spaziale dei dati, le informazioni puntuali sullo stato di fratturazione dell'ammasso, contenute come abbiamo visto nell'indice di sintesi, sono state trasferite alle diverse porzioni di territorio analizzate, al fine di definire i modelli geologico-tecnici, in cui i versanti studiati sono stati suddivisi in aree in cui l'ammasso roccioso presenta differenti gradi di fratturazione. Poiché uno degli scopi di questa ricerca è stato quello di attribuire dei parametri quantitativi non solo al grado di fratturazione ma al sistema ammasso roccioso nel suo complesso, sono stati utilizzati metodi sperimentali ben noti in letteratura al fine di definire le caratteristiche di resistenza e deformabilità degli ammassi. In particolare, per definire i parametri di deformabilità degli ammassi rocciosi variamente fratturati e distinti nei modelli geologico-tecnici proposti, ci si è serviti di metodi sperimentali che si basano su approcci equivalenti continui che, attraverso l'utilizzo di relazioni empiriche che prendono in considerazione sia le proprietà geomeccaniche della matrice rocciosa che quelle delle discontinuità, consentono di attribuire all'ammasso roccioso fratturato parametri di deformabilità propri di un mezzo continuo. In letteratura sono state proposte diverse varianti relative a questi approcci equivalenti continui, che verranno maggiormente approfondite nello specifico capitolo di questa tesi. Occorre qui anticipare che in questo lavoro è stato deciso di prendere in considerazione quello proposto da Sridevi & Sitharam (2000), e successivamente aggiornato fino a questi ultimi anni, in quanto è stato riconosciuto, come si vedrà meglio in seguito, come il più completo e più adatto a recepire i risultati dei rilievi geomeccanici effettuati in questa tesi. Allo stesso modo, per quanto riguarda la caratterizzazione in termini di resistenza è stato utilizzato quello che ad oggi viene ancora considerato il più importante criterio di rottura per gli ammassi rocciosi fratturati, ossia quello proposto da Hoek & Brown (1980), e successive modifiche. Di fatto si è utilizzato quanto proposto da Hoek et alii (2002).

Infine, la validazione dei modelli geologico-tecnici proposti è stata condotta attraverso analisi di stabilità condotte su alcuni dei movimenti gravitativi più rappresentativi nel territorio esaminato.

Quanto detto negli ultimi paragrafi può essere sintetizzato schematicamente attraverso i seguenti punti, che meglio delineano il percorso logico e metodologico seguito in questo lavoro di ricerca, ed in particolare sulla caratterizzazione degli ammassi rocciosi fratturati:

- definizione delle metodologie di rilievo geomeccanico da effettuare in sito;
- esecuzione dei rilievi geomeccanici;
- creazione di un *geo-database* comprensivo di tutti i dati acquisiti;
- analisi statistica dei parametri ritenuti fondamentali nella descrizione delle proprietà degli ammassi rocciosi fratturati;
- definizione di un indice sintetico relativo al grado di fratturazione dell'ammasso;
- attribuzione, tramite metodi presenti in letteratura, dei parametri di resistenza e deformabilità equivalenti alle diverse classi di fratturazione degli ammassi rocciosi individuate;
- definizione di modelli geologico-tecnici dei versanti studiati sulla base dell'indice sintetico;
- validazione dei modelli geologico-tecnici.

Finora abbiamo posto l'attenzione su quello che possiamo definire l'asse portante del lavoro svolto in questi anni, ma, come si è accennato nelle prime righe della tesi, questo lavoro è stato anche caratterizzato da altri e diversi percorsi metodologici volti a meglio definire lo stato di fratturazione degli ammassi rocciosi e, di conseguenza, le loro proprietà geomeccaniche. Tra questi il più significativo è stato quello che ha riguardato i rilievi geomeccanici effettuati sui fronti di scavo in galleria.

Uno degli obiettivi di questo progetto di ricerca, quando nei primi tempi è stato pensato e sviluppato, era quello di quantificare la variazione del grado di fratturazione degli ammassi rocciosi al variare della profondità all'interno di un versante. Questo obiettivo era stato proposto in quanto, grazie allo scavo di alcune gallerie stradali nell'area di studio, è stato possibile, in questi anni, accedere ad alcuni fronti lasciati temporaneamente liberi da consolidamenti. Date queste condizioni, dunque, sono stati eseguiti numerosi rilievi sui fronti di scavo e si è tentato di mettere in relazione i parametri geomeccanici ricavati con quelli derivanti dai rilievi su affioramento.

In più, sui fronti di scavo in galleria, i rilievi sono stati eseguiti sia secondo le modalità standard, sia attraverso l'utilizzo di dispositivi laser che hanno consentito di effettuare analisi anche da alcuni metri di distanza rispetto al fronte dell'ammasso, date le scarse condizioni di sicurezza riscontrate in prossimità del fronte stesso. Sono state altresì condotte delle analisi volte a definire, in prima approssimazione, le eventuali discordanze evidenziate tra i risultati ottenuti coi diversi metodi di rilievo. Anche se in questa occasione l'esecuzione di tali rilievi non ha consentito di giungere a

risultati concreti per la definizione dei modelli geologico-tecnici dei versanti presi in esame, si ritiene comunque che i processi metodologici messi a punto possano costituire un ottimo spunto e base di partenza per futuri tentativi. La volontà di inserire uno specifico paragrafo dedicato a questi temi testimonia appunto una personale fiducia sulle potenzialità della strada intrapresa.

Al fine di rendere più semplice una “lettura” dei parametri geomeccanici acquisiti in campagna, sono stati determinati gli indici relativi ad alcuni sistemi di classificazione noti in letteratura e cui si è fatto precedentemente cenno. In questo modo è stato possibile avere una più immediata idea circa le condizioni di fratturazione degli ammassi rocciosi studiati.

Nella definizione dei parametri di resistenza e deformabilità degli ammassi rocciosi fratturati, tutti i metodi presenti in letteratura e utilizzati in questo lavoro, sono concordi nell’affermare che è necessario “fondere” le proprietà della matrice rocciosa (roccia intatta), con quelle relative alla fratturazione dell’ammasso. Per tale motivo sono state effettuate accurate analisi di laboratorio volte a definire i parametri di resistenza e deformabilità della matrice rocciosa, e per tale motivo condotte su campioni centimetrici di roccia privi di fratture. Queste prove, condotte presso il Laboratorio Geotecnico della Provincia Autonoma di Trento, sono state da me direttamente seguite. Inoltre, è stato eseguito un elevato numero di prove di punzonamento (*point load test*), sempre su campioni di roccia intatta, direttamente in sito, sfruttando il deposito temporaneo dello smarino proveniente dalle diverse gallerie in fase di scavo.

Per poter condurre uno studio sugli ammassi rocciosi fratturati, sulle loro caratteristiche, sulle proprietà che maggiormente ne influenzano il comportamento, è stato necessario, ovviamente, avere a disposizione un’area piuttosto ampia caratterizzata dalla presenza di formazioni rocciose in affioramento. Questa area è stata individuata nel settore più meridionale della costa tirrenica calabrese, e più specificatamente tra i centri abitati di Palmi (RC) a nord e Villa San Giovanni (RC) a sud, per una estensione areale di circa 60 km². Essa è infatti caratterizzata dalla estesa presenza del basamento cristallino-metamorfico, che affiora sulla quasi totalità dei versanti del territorio. Una parte importante del lavoro di questi anni è stata dedicata alla realizzazione di una cartografia geologica di tutta quest’area in scala 1:10.000, ponendo particolare attenzione ai rapporti tra il basamento cristallino-metamorfico con i termini sedimentari di ben più recente deposizione.

Accanto al rilevamento geologico, è stato condotto anche un rilevamento geomorfologico, alla stessa scala, in cui l’attenzione principale è stata posta sulle forme, i processi e i depositi gravitativi, che si possono mettere in relazione anche con lo studio della fratturazione degli ammassi rocciosi. Pertanto si è giunti ad una cartografia di inventario delle frane, con elementi geomorfologici, scaturita da un accurato rilevamento di campagna integrato con l’analisi delle foto aeree a

disposizione. Da questa analisi dei processi gravitativi esistenti sul territorio rilevato, sono stati individuati i versanti, interessati dai più significativi fenomeni franosi, di cui, in seguito, sono stati definiti i modelli geologico-tecnici secondo il procedimento, basato sul grado di fratturazione degli ammassi rocciosi, presentato in questa tesi. In questa sede si è deciso di non presentare la cartografia geomorfologica, ma di soffermarci direttamente sui tre casi di studio prescelti:

1. la frana del Monte Pacì;
2. la frana Feliciusu;
3. la frana Santa Trada.

Il rilevamento, geologico e geomorfologico, ha quindi rappresentato la base indispensabile per tutti i successivi stadi del progetto di ricerca, e, pertanto, è necessario presentarne i risultati prima di intraprendere il discorso prettamente inerente allo studio degli ammassi rocciosi fratturati.

2. L'AREA DI STUDIO

L'area oggetto della presente tesi di dottorato è ubicata nel settore più meridionale della costa tirrenica calabrese, a nord di Reggio Calabria, e comprende i territori comunali di Villa San Giovanni, Scilla, Bagnara Calabra, Sant'Eufemia d'Aspromonte e Seminara, come mostrato in Fig. 2.1.

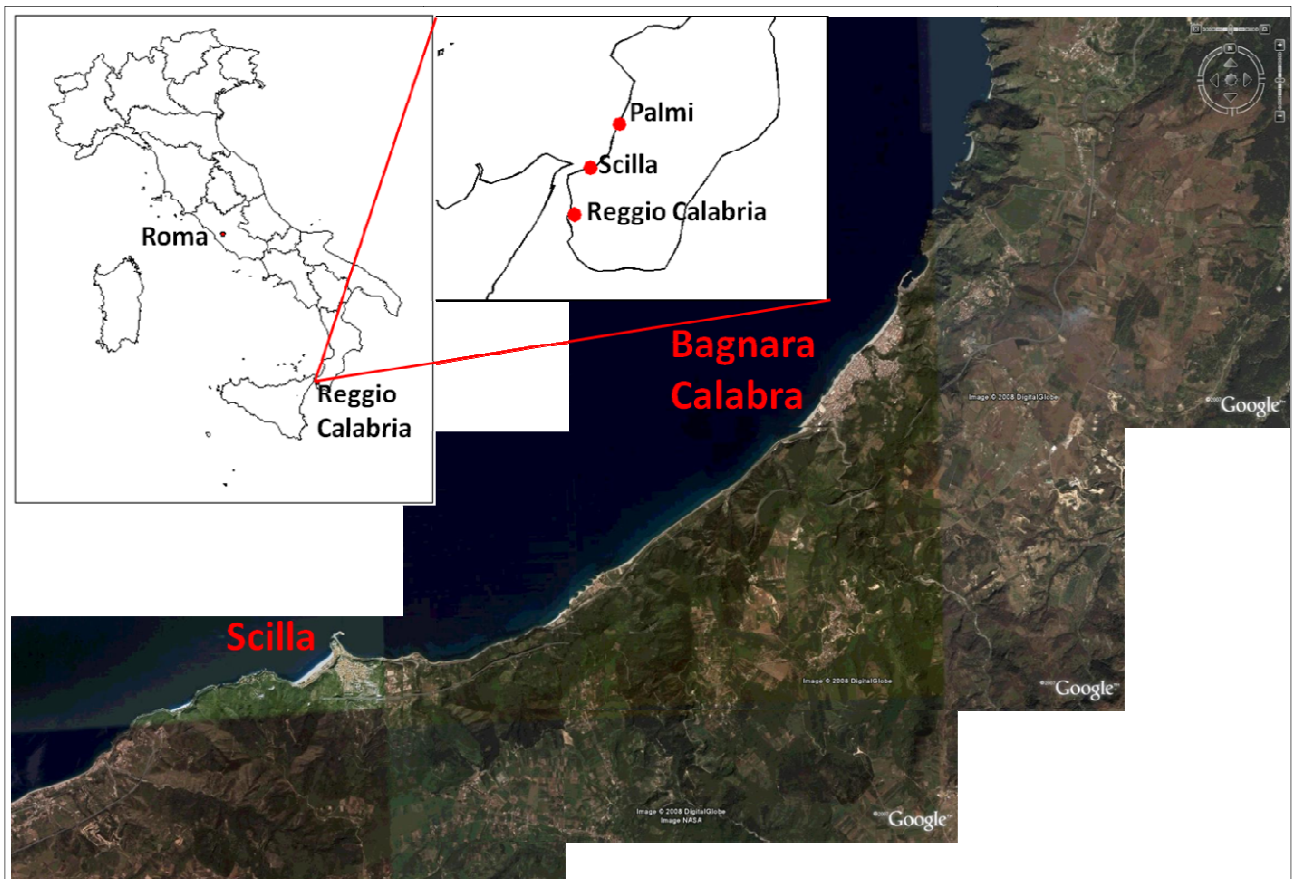


Fig. 2.1 – Ubicazione dell'area in esame (immagini tratte da Google Earth).

2.1. INQUADRAMENTO GEOLOGICO-STRUTTURALE

L'area in esame è collocata sulla terminazione meridionale dell'Arco Calabro – Peloritano, segmento della Catena Appenninico – Maghrebide originatasi attraverso il succedersi di fasi tettoniche deformative a partire dall'Oligocene superiore e fino all'attuale. Essa ricade nella porzione denominata Catena Kabilo – Calabride, costituita da unità cristalline, strutturalmente delimitata a nord dalla linea di Sangineto (Calabria settentrionale) e sud, in Sicilia, dalla linea di Taormina. La Catena Kabilo – Calabride è stata interpretata nel complesso come un frammento di unità alpine costituito da rocce di età da pre-mesozoica fino a cretacico-paleogenica, sovrascorso sulla Catena Appenninico – Maghrebide (Fig 2.2).

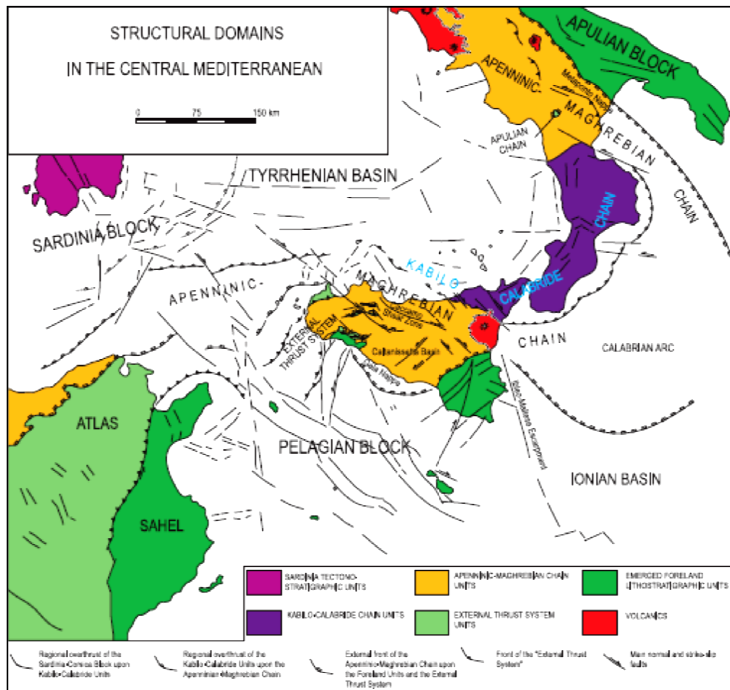


Fig. 2.2 – Domini strutturali principali del Mediterraneo centrale (Guarnieri et alii, 2004).

Ai movimenti trascorrenti avvenuti durante la fase compressiva del Pliocene medio sarebbero succeduti movimenti normali legati alle fasi distensive pleistoceniche. In particolare, la segmentazione del settore calabrese avviene ad opera di altri importanti sistemi di faglie divisibili in due gruppi:

paralleli alle direttrici strutturali della catena e trasversali, che interrompono la continuità della catena. La disposizione di tali strutture nei confronti dei settori da esse limitati permette di individuare, nell’Arco Calabro, un assetto geometrico costituito da blocchi con evoluzione neotettonica differenziata (Fig. 2.3).

In questo quadro, sia il bacino del Mesima sia quello di Reggio Calabria rappresentano depressioni strutturali allungate all’incirca in direzione NE-SW caratterizzate da successioni deposizionali marine di età dal Miocene superiore fino al Pleistocene (Guarnieri, 2006). Le due fosse risultano separate da una zona di alto strutturale relativo, con affioramento di basamento cristallino, che si estende da Bagnara Calabra, a nord, fino all’altezza di Santa Trada (Ghisetti, 1979) a costituire la parte sud-occidentale dell’Aspromonte. Questo settore è meglio noto come *Horst* di Campo Piale, e rappresenta l’area su cui si è concentrato il lavoro di questa tesi.

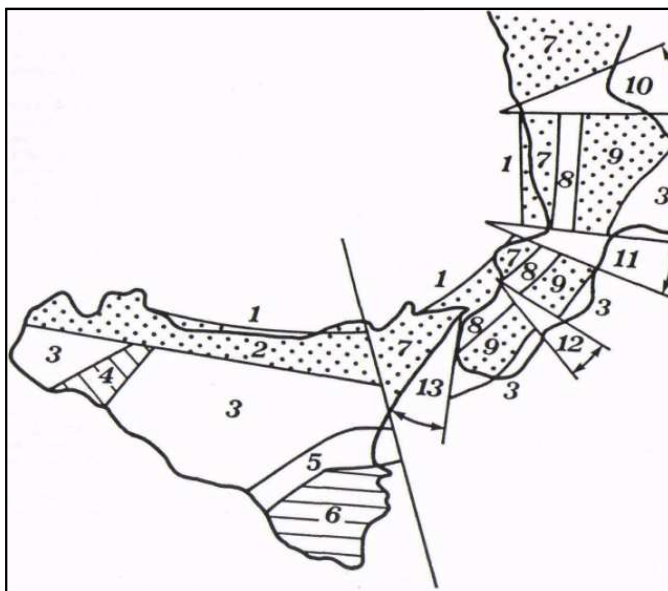


Fig. 2.3 – La segmentazione a blocchi dell’Arco Calabro. 1) bacini peri-tirrenici di Paola, Gioia Tauro e Cefalù; 2) monti Nebrodi e Madonie; 3) bacini peri-ionici e di Caltanissetta; 4) monti Sicani; 5) fossa Catania-Gela; 6) monti Iblei; 7) “catena costiera calabrese” e monti Peloritani; 8) fosse dell’Alto Crati e del Mesima; 9) Sila, Serre, Aspromonte; 10) fossa del Basso Crati-Sibari; 11) fossa di Catanzaro; 12) fossa di Siderno; 13) fossa di Messina (Ghisetti, 1979).

L'evoluzione tettonica regionale calabra è stata definita attraverso la successione di differenti fasi tettoniche e, dal Miocene al Pliocene si è caratterizzata per un campo di stress di tipo prevalentemente compressivo. La successiva evoluzione dell'Arco Calabro, posteriore cioè alla fase compressiva infra-medio-pliocenica, è invece dominata da meccanismi tensionali che inducono sollevamenti differenziali. Dal Pleistocene medio si è registrato, dunque, un generale sollevamento regionale riconoscibile lungo la fascia costiera tirrenica per circa 200 Km, e attualmente l'Arco Calabro (Miyachi et alii, 1994) è caratterizzato da una tettonica estensionale attiva. I sollevamenti differenziali, che hanno portato all'attuale strutturazione ad *horst* e *graben*, sono stati quantificati da diversi autori lungo la costa tirrenica che da Capo Vaticano si estende fino alla parte più meridionale dello Stretto di Messina (Miyachi et alii, 1994; Dumas et alii, 2005). Ciò è stato possibile sulla base degli studi dei terrazzi marini presenti nell'area in esame, e su correlazioni di tipo geomorfologico, biostratigrafico e di datazione isotopica dei diversi ordini di terrazzo individuati nell'area. Il tasso di sollevamento, per tutta la regione investigata, si è visto essere variabile sia nello spazio che nel tempo, con valori oscillanti tra gli 0,5 e gli 1,5 mm/anno, con punte di 1,8 mm/anno nei pressi di Monte Poro – Capo Vaticano. La Fig. 2.4 rappresenta uno stralcio della carta dei terrazzi marini di Miyachi et alii (1994), relativa al tratto Reggio Calabria – Palmi, in cui gli autori individuano dodici ordini di terrazzo numerati dal più antico (1350 m s.l.m., circa 1200 ka) al più recente. Nel rilevamento condotto per questo lavoro è stato seguito lo stesso ordine, come si vedrà nel successivo paragrafo.

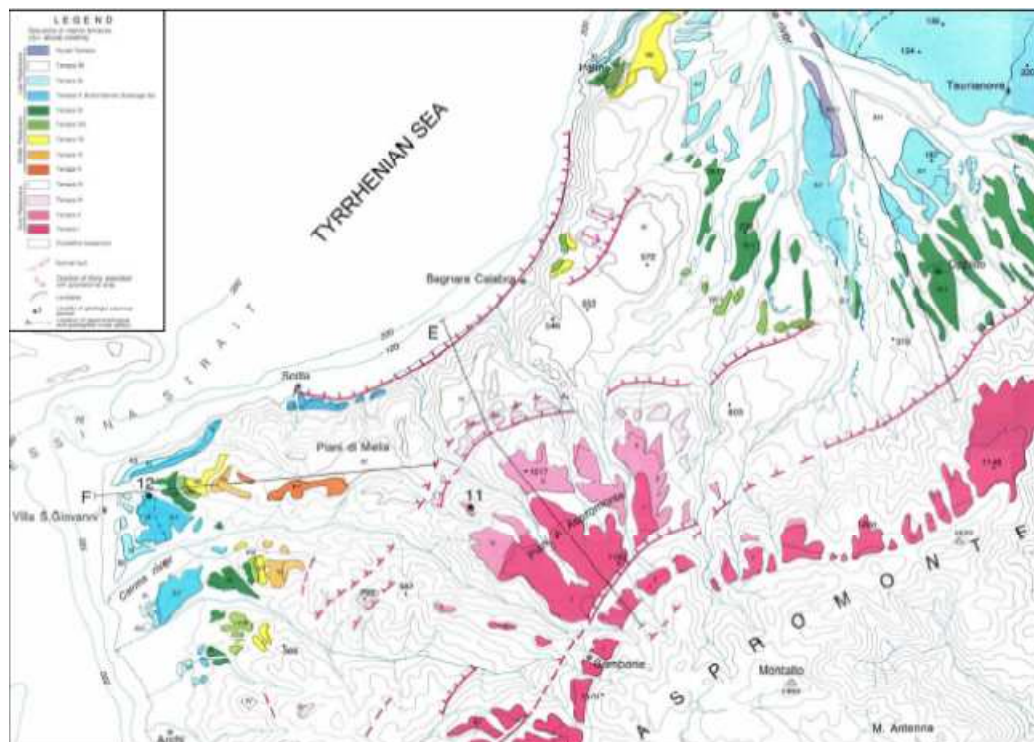


Fig. 2.4 – Terrazzi marini riconosciuti nell'area di studio (Miyachi et alii, 1994).

Anche l'horst di Campo Piale ha subito movimenti differenziali rispetto alle aree limitrofe, con velocità di sollevamento tra le più elevate di tutta l'area (Ghisetti, 1980). Esso risulta delimitato, rispetto ai bacini limitrofi da faglie di tipo normale, come le faglie Campo Piale - Mortille e Milanese - Matiniti che ne interrompono la continuità rispetto al *graben* dello Stretto, mentre le faglie denominate Calanna - Acqua Calda - Sant'Angelo e Solano - Sinopoli - Cosoleto definiscono la terminazione verso sud del bacino longitudinale del Mesima (Ghisetti, 1981) (Fig. 2.5). A questa tipologia di tettonica sono stati associati i principali terremoti che storicamente hanno colpito l'area.

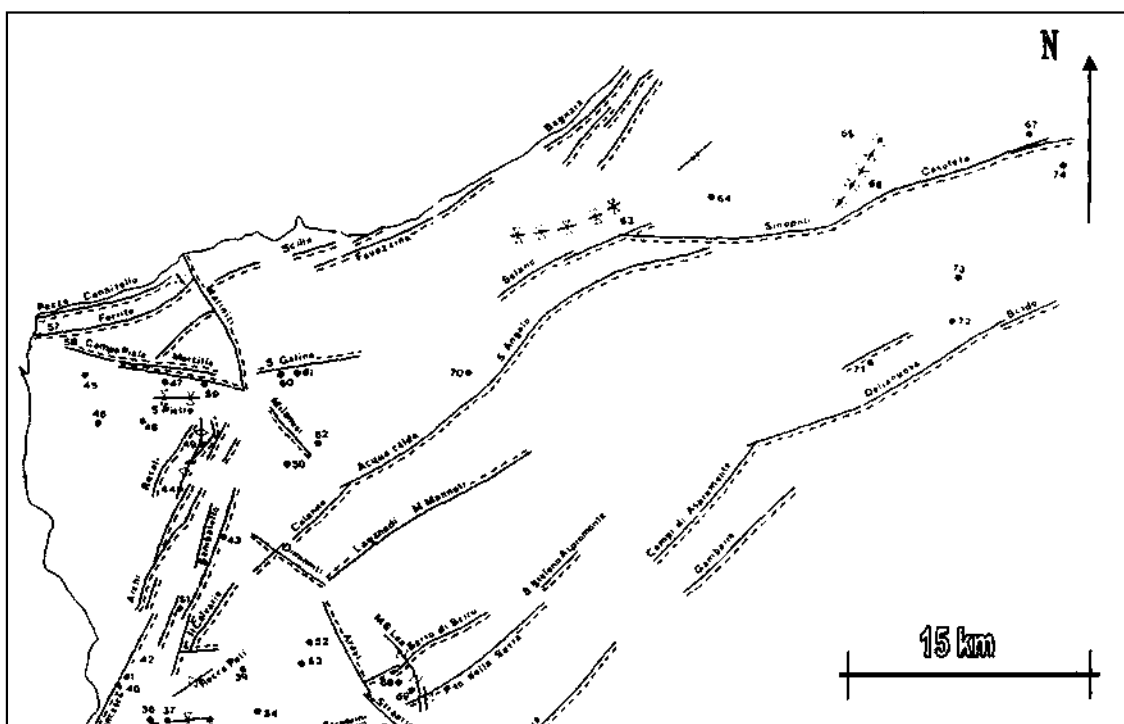


Fig. 2.5 – Principali strutture riconosciute nell'area di studio (Ghisetti, 1981). I trattini indicano i blocchi sollevati.

Il più rilevante tra gli elementi tettonici presenti nella specifica area di rilevamento è comunque rappresentato dalla cosiddetta faglia di Scilla, la cui estensione e continuità sono state ampiamente dibattute in letteratura negli ultimi decenni come testimonia la Fig. 2.6 (Ferranti et alii, 2007). Gli stessi autori, in uno specifico lavoro dedicato all'attività olocenica della faglia di Scilla (Ferranti et alii, 2008), individuano più nel dettaglio i segmenti in cui essa può essere suddivisa, settentrionale, centrale ed occidentale, rispettivamente tra Palmi e Bagnara Calabria, tra Bagnara e Scilla e tra questa e Cannitello, vicino Villa San Giovanni (Fig. 2.7). Secondo questo studio, la sua lunghezza totale risulta pari a circa 30 km.

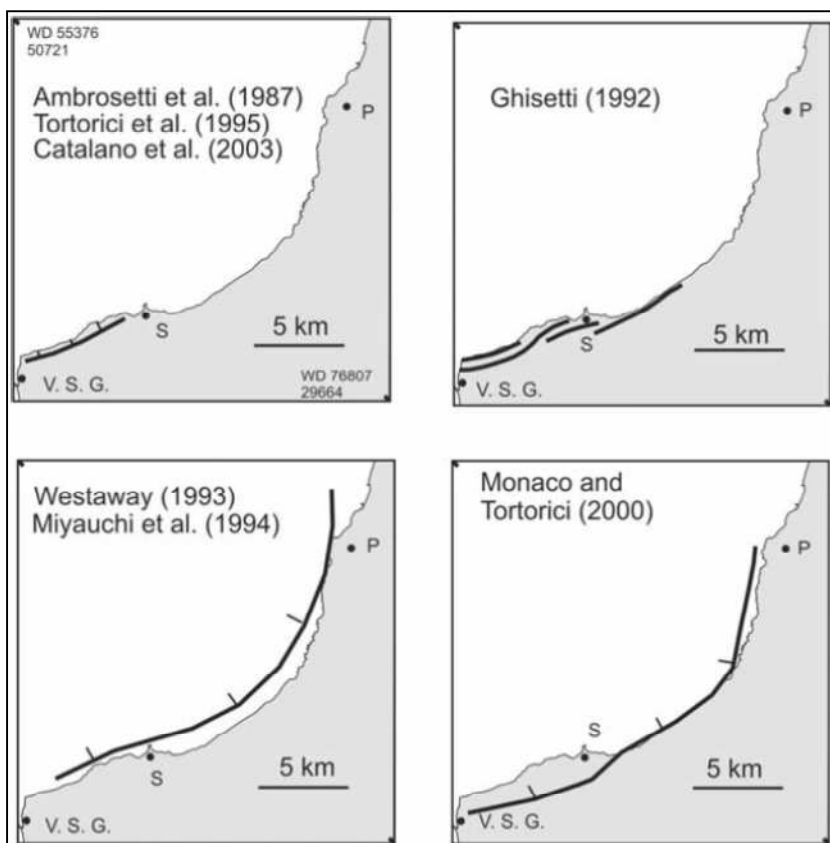


Fig. 2.6 – *Differenti modelli proposti in letteratura per la localizzazione e la lunghezza della faglia di Scilla (Ferranti et alii, 2007).*

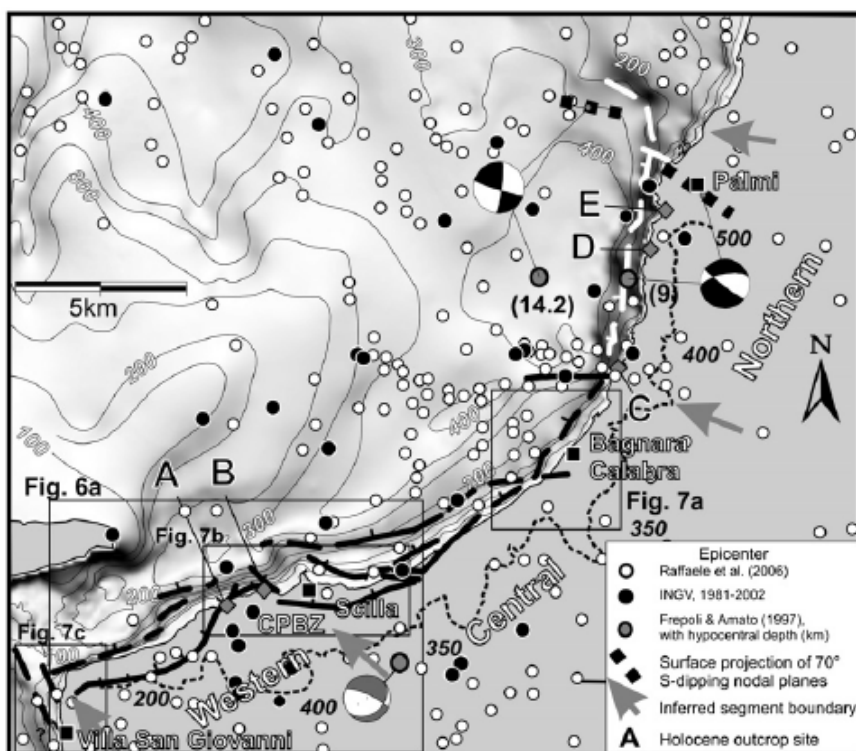


Fig. 2.7 – *Mappa strutturale della faglia di Scilla, mostrante le tracce e i limiti dei segmenti individuati (Ferranti et alii, 2008).*

2.2 RILEVAMENTO GEOLOGICO DI DETTAGLIO

Il territorio su cui è stato condotto il rilevamento geologico nel corso del presente lavoro, ha una estensione areale pari a circa 70 km², interessando i territori comunali, da sud verso nord, di Villa San Giovanni, Scilla, Bagnara Calabria, Sant'Eufemia D'Aspromonte e Seminara, tutti facenti parte della Provincia di Reggio Calabria. Il rilevamento ha consentito di produrre una cartografia geologica piuttosto dettagliata sintetizzata nell'Allegato 1, in cui sono riportate le carte geologiche in scala 1:10.000.

Su gran parte del territorio rilevato è stata riscontrata la presenza del basamento cristallino-metamorfico paleozoico, su cui sono state condotte le analisi geomeccaniche alla base dei modelli geologico-tecnici proposti in questa tesi. Questo basamento è stato a sua volta suddiviso in funzione delle caratteristiche petrografiche e tessiturali tra rocce metamorfiche (prevalentemente gneiss) e rocce intrusive (plutoniti a composizione prevalentemente granodioritica). Ulteriori suddivisioni, riportate in carta, si riferiscono a situazioni particolari riscontrate localmente e descritte nel successivo paragrafo.

Le altre formazioni individuate in campagna si riferiscono alla successione sedimentaria che si è deposta in alcuni settori dell'*Horst* di Campo Piale dal Pliocene all'Attuale. Questa comprende sia i termini di origine marina, come le Sabbie Plio-Pleistoceniche e i depositi marini terrazzati del Pleistocene, sia i depositi continentali olocenici. Da evidenziare come tutti i termini sedimentari poggino in disconformità rispetto al sottostante basamento ercinico.

2.2.1 Substrato cristallino-metamorfico

La presenza di questo basamento roccioso è continua in tutto il territorio, e la quasi totalità dei versanti presenti è costituita da questa formazione. Nelle carte dell'Allegato 1 si nota come essa rappresenti circa il 50% del territorio rilevato, con un'area di affioramenti pari a 30 km². In quest'area il basamento è costituito per più dell'80% da paragneiss che lateralmente tendono a passare a micascisti biotitici attraversando petrofacies intermedie. In generale questa formazione presenta al suo interno profonde differenze sia da un punto di vista tessitoriale che di stato di fratturazione come si avrà modo di apprezzare dai risultati dei rilievi geomeccanici eseguiti. Spesso tali differenze corrispondono a marcate variazioni cromatiche degli affioramenti. In più, grazie alla possibilità di esaminare gli spezzoni di carota di alcuni sondaggi che hanno attraversato tale formazione, e di visionare alcuni fronti di scavo in galleria, si è potuto apprezzare come le caratteristiche di questi gneiss siano fortemente influenzate dal grado di alterazione. Inoltre, come è stato evidenziato anche dalle prove di laboratorio e dai point load test eseguiti in sito, queste rocce

presentano un elevato grado di anisotropia. Le foto a e b di Fig. 2.8 mettono in evidenza la marcata diversità tra l'aspetto dell'ammasso roccioso gneissico in affioramento rispetto agli spezzoni di carota prelevati in profondità.



Fig. 2.8 – (A) Carote di gneiss, prelevate a circa 50 m di profondità, mediamente fratturate, ma scarsamente alterate. (B) Gneiss in affioramento, nell'area dove è stato eseguito lo stesso sondaggio, fortemente alterati.

La colorazione rossastra degli gneiss, apprezzabile in Fig. 2.8B, è una chiara testimonianza di come spesso il basamento cristallino-metamorfico sia fortemente caratterizzato da processi di *weathering* nella parte più superficiale. Questi processi, che caratterizzano con diversi gradi di intensità gran parte dei rilievi calabresi (Calcaterra & Parise, 2010), in questa specifica area rivestono una importanza particolare nella fascia costiera che collega Scilla con Bagnara Calabria, caratterizzata da pareti rocciose, fortemente alterate, alte diverse decine di metri. Murphy (1995) invoca il *weathering* come una delle cause predisponenti dei movimenti gravitativi in questo settore, con particolare riferimento a quelli avvenuti a seguito del terremoto di Reggio e Messina del 1908.

Il rilevamento di dettaglio condotto su tutta l'area ha messo in evidenza come i processi di *weathering* siano più apprezzabili in corrispondenza del plutone tardo ercinico di Villa San Giovanni. Questo è evidentemente correlabile con le diverse caratteristiche chimico-fisiche tra le rocce granitoidi e gli gneiss, che pur non essendone certamente esclusi, risultano comunque meno interessati da processi di disgregazione chimica.

In alcune specifiche aree sono state individuate delle specifiche particolarità all'interno della formazione degli gneiss, e sono state quindi riportate nella cartografia geologica.

Ad esempio, una situazione molto particolare è rappresentata dalla Rocca di Scilla. Questa, infatti, sorge su un corpo di gneiss migmatitico, separato dal terrazzo marino di Scilla da una sella morfologica. Il processo migmatitico, ascrivibile all'orogenesi ercinica come tutto il cristallino dell'Aspromonte e dei Peloritani, secondo dati mineralogici e strutturali, si sarebbe svolto in

condizione di medio-alto grado con inizio di fusione anatettica (Messina & Ioppolo, 1983). Questa loro genesi porta, al loro interno, ad una marcata differenziazione mineralogica, con conseguente distinzione tra leucosoma (plagioclasio albitico, quarzo) e melanosoma (minerali femici, biotite, anortosite), come è ben visibile nella foto di Fig. 2.9.



Fig. 2.9 – Foto del complesso migmatitico su cui sorge lo storico castello di Scilla.

Un altro carattere distintivo all'interno del complesso metamorfico è rappresentato dalla presenza, in alcuni settori, di matrice calcitica all'interno delle fratture dell'ammasso roccioso. La presenza di questa matrice carbonatica in formazioni di tutt'altra natura mineralogica come gli gneiss, viene associata a processi indotti da terremoti, e pertanto tali depositi vengono detti sismiti (*seismites*) (Montenat et alii, 1991, 2007). La vasta classificazione proposta da Montenat et alii (2007), individua varie tipologie di sismiti. In particolare, nell'area in esame gli stessi autori evidenziano la presenza di dicchi sedimentari, generalmente costituiti da sedimenti carbonatici. Questi dicchi sedimentari vengono a loro volta suddivisi in due diversi gruppi:

- i “dicchi intrusivi”, formati dall'intrusione di materiale derivante da sorgenti più profonde che viene spinto verso l'alto sotto pressioni anomale;
- i “dicchi nettuniani”, formati dall'introduzione di materiale dall'alto, sia sotto pressione che da semplice riempimento di fratture/fessure preesistenti.

Entrambe le categorie di dicchi sono presenti nei processi sismo-indotti e sono comunemente associate a zone di faglia attiva di grandi dimensioni, dove l'attività sismica è associata a blocchi estensionali. Infatti tali dicchi sono usati come indicatori di paleo stress in zone di *sinrift*.

I dicchi nettuniani sono correlati alla formazione di fratture aperte, dovute a cause molteplici: scivolamento associato a distensione, detensionamento di scarpate, fessure associate alla risalita

diapirica, sovraccarico, ecc.; queste possono rimanere fratture aperte per un tempo lungo. Le numerose fessure aperte sul suolo che si formano durante i terremoti e successivamente riempite di sedimenti, non sono molto differenti dai dicchi che si formano in condizioni asismiche, in assenza di un contesto generale. I dicchi nettuniani causano, inoltre, una diffusione a grande scala di acqua e materiale sabbioso fine, che penetra in profondità i pori e i vuoti del basamento. Tali fluidi possono essere soggetti a sovrappressioni quando si verifica uno shock sismico in una zona di faglia, risalendo verso l'alto e formando dei dicchi per iniezione.

I dicchi di iniezione sono tipici esempi di strutture generate da acque in sovrappressione e non devono essere confusi con i dicchi nettuniani. La dinamica di iniezione risulta dalla combinazione di fenomeni di fluidificazione e idrofratturazione (Lowe & LoPiccolo, 1974). Due fenomeni possono essere distinti: i) la formazione di una rete di fratture in roccia, dovuta a differenti tipi di tensioni (fratture ereditate di varia origine, fratture tettoniche, idrofratturazione, ecc.); ii) riempimento di fratture da sedimenti soffici in sovrappressione (acqua e fango fluidificati) che penetrano profondamente nelle zone di faglia. Questi due fenomeni possono essere simultanei o successivi, e ricorrenti. Le fessure riempite e chiuse possono essere riaperte e di nuovo riempite; dunque possono registrarsi diversi episodi di iniezione. Tali dicchi mostrano le tipiche strutture a piatto e colonna, e altre caratteristiche correlate alla fuga di fluidi. Questo fenomeno è stato studiato nelle scarpate di faglia attiva dello stretto di Messina (Vachard et alii, 1987; Montenat et alii, 1991).

La Fig. 2.10 riporta uno schema esemplificativo degli stadi di formazione dei dicchi sedimentari, sia nettuniani che intrusivi.

Sulla base di queste considerazioni, il riconoscimento di questi depositi in sito ha costituito un importante elemento diagnostico nella definizione dell'assetto tettonico dell'area investigata. La presenza di riempimento calcitico all'interno delle fratture del substrato metamorfico è stata riscontrata, in particolar modo, nel tratto compreso tra il centro abitato di Scilla e il vallone Santa Trada, in direzione di Villa San Giovanni. Più nel dettaglio, diversi affioramenti di gneiss immerso in matrice calcitica sono stati riconosciuti in corrispondenza dell'area di frana del Monte Pacì, poco a sud di Scilla. Questa frana, di cui si hanno numerose testimonianze storiche, è avvenuta nella notte tra il 5 e il 6 febbraio del 1783 in seguito a due dei più significativi eventi sismici del Terremoto delle Calabrie, ed ha generato l'onda di tsunami che, abbattutasi sulla spiaggia della Marina Grande di Scilla ha causato la morte di oltre 1500 persone. La presenza di tali affioramenti ha consentito quindi di definire, in questo specifico settore, un quadro dettagliato delle principali faglie che hanno interessato il substrato metamorfico, più di quanto non sia stato possibile fare in altre aree dove questa informazione non è stata riscontrata. La Fig. 2.11 mostra le foto relative a due

affioramenti in cui sono stati individuati questi dicchi sedimentari, rispettivamente classificati come dicchi nettuniani (foto A) e dicchi iniettati (foto B).

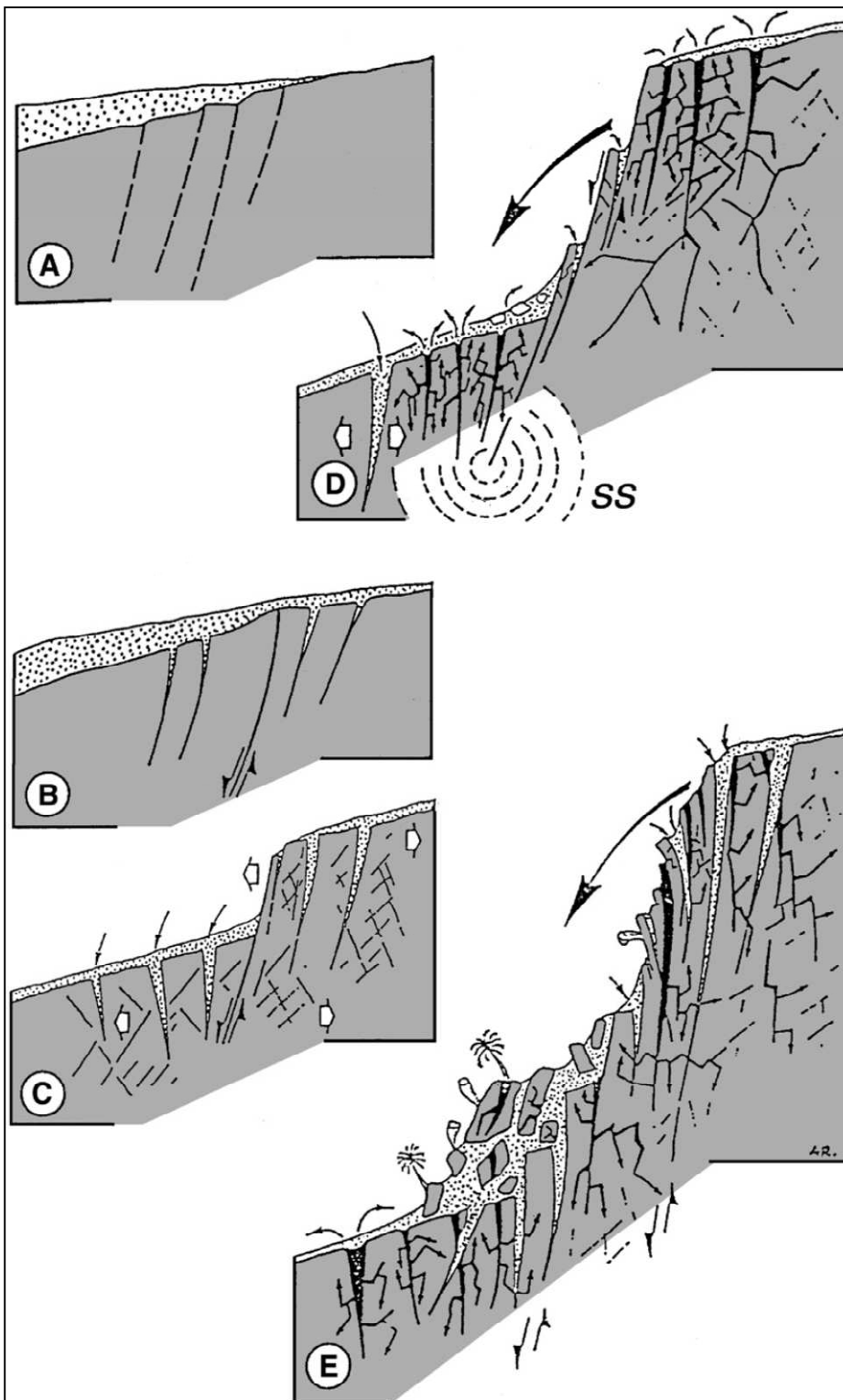


Fig. 2.10– *Illustrazione schematica dei dicchi sedimentari in relazione alla presenza di faglie attive. A, B e C: formazione dei dicchi nettuniani; D ed E: formazione ed evoluzione dei dicchi iniettati in relazione ad eventi sismici (Montenat et alii, 1991).*

Un affioramento riferibile ai dicchi nettuniani è stato rilevato nei pressi del porto di Bagnara Calabra. Anche in questo caso, pur trattandosi di un ammasso roccioso particolarmente fratturato, la

cementazione dovuta alla matrice carbonatica ha consentito la formazione di una parete sub verticale alta alcune decine di metri.

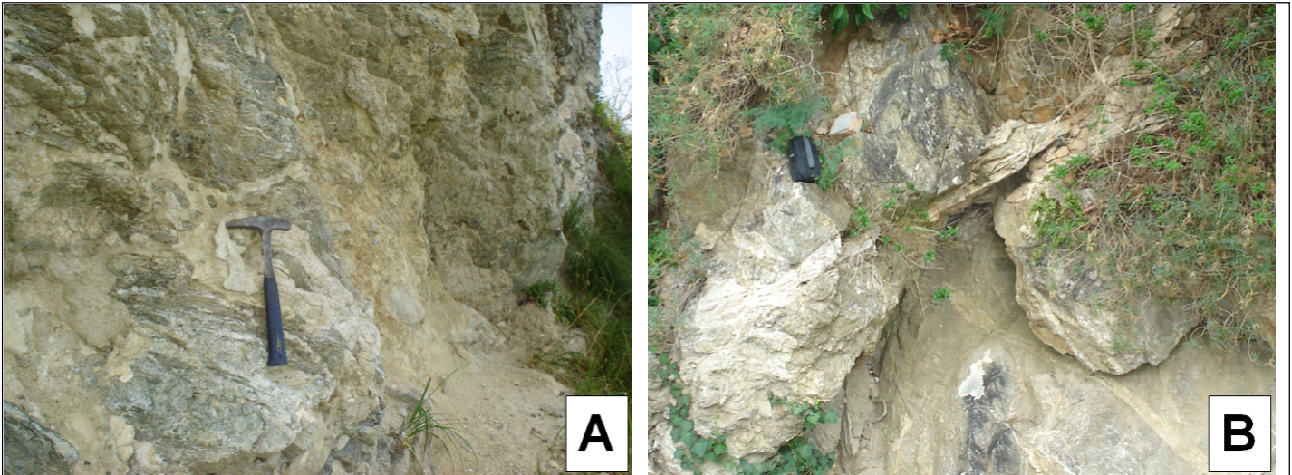


Fig. 2.11 – (A) Affioramento di gneiss in matrice calcitica microcristallina, in corrispondenza della corona di frana del Monte Paci, individuato come dicco nettuniano. (B) Affioramento di gneiss con matrice calcitica, in prossimità del fianco destro della stessa frana, classificato come dicco iniettato.

Il basamento ercinico è costituito, oltre che dai termini metamorfici come gli gneiss, anche da rocce cristalline granitoidi, che costituiscono il plutone tardo-ercinico di Villa San Giovanni (Messina & Ioppolo, 1983). Queste rocce cristalline sono state infatti individuate nel settore più meridionale dell'area rilevata, e sono costituite da leucogranodioriti a due niche e graniti-monzograniti. A differenza delle rocce metamorfiche, queste risultano meccanicamente isotrope, venendo a mancare del tutto la foliazione. All'interno dei termini granitoidi è stato localmente riscontrato un sensibile grado di alterazione idrotermale che conferisce alla roccia un aspetto brecciato, a luoghi con colorazione biancastra e farinosa al tatto. Tali caratteristiche si osservano, in particolare, lungo una fascia a direzione N-NE/S-SW, in corrispondenza delle testate del Vallone Piria. Tale fascia può essere, quindi, associata ad un'ampia zona cataclastica. La Fig. 2.12 mostra due affioramenti del complesso cristallino, sia dove esso si presenta debolmente fratturato, sia dove esso assume l'aspetto di cataclasite.

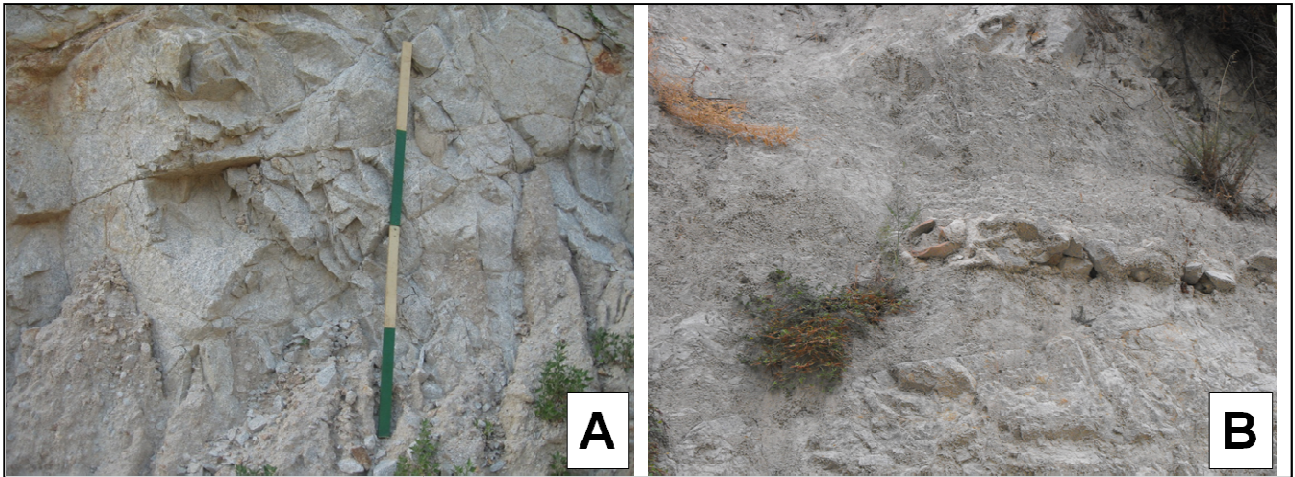


Fig. 2.12 – (A) *Affioramento di rocce granitoidi mediamente fratturate, su cui è possibile eseguire un rilievo sia geomeccanico che strutturale.* (B) *Affioramento di rocce granitoidi completamente cataclasato e privo di alcuna riconoscibile struttura.*

2.2.2 Sabbie Plio-pleistoceniche

Questa formazione è costituita da sabbie addensate ed arenarie debolmente cementate con occasionali intercalazioni conglomeratiche, di colore bruno giallastro o chiaro. Tali depositi giacciono in discordanza sul sottostante basamento ercinico, presentano una potenza variabile da alcune decine di metri a circa 100 m ed una giacitura generalmente suborizzontale con pendenza comunque inferiori a 15° (Bonavina et alii, 2005). E' da rimarcare, inoltre, che questa formazione presenta livelli, da decimetrici a metrici, fortemente fossiliferi, con abbondante presenza di bivalvi.

Al contatto con il basamento ercinico è presente un livello conglomeratico, in matrice sabbiosa, caratterizzato dalla presenza di grossi blocchi, fino ad un metro di diametro, di natura cristallino-metamorfica. Questi sono ben arrotondati e mal classati, testimoniano la fase trasgressiva e si può ragionevolmente sostenere che la loro età di messa in posto sia compresa tra il Miocene ed il Pliocene. Le foto in Fig. 2.13 mostrano, rispettivamente, l'appoggio in trasgressione delle sabbie sul basamento attraverso il sopracitato livello conglomeratico (A) e un esteso affioramento delle stesse (B). Per le loro caratteristiche granulometriche e di generalmente scarsa cementazione queste sabbie vengono spesso cavate e impiegate come materiale inerte. La stessa foto evidenzia come esse siano in grado di formare alcuni metri di fronte subverticale.

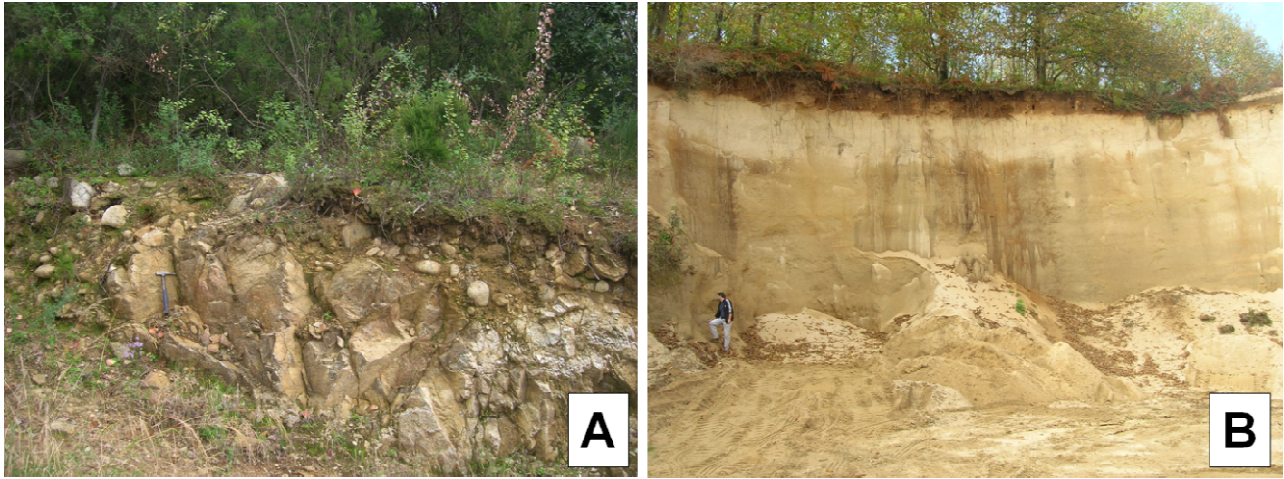


Fig. 2.13 – (A) Affioramento di rocce gneiss su cui poggia il livello conglomeratico, testimonianza della trasgressione (sinistra idrografica del torrente Sfalassà). (B) Sabbie Plio-Pleistoceniche in area di cava presso Solano (RC).

Questa formazione delle sabbie è presente solo in uno specifico settore dell'area rilevata, e precisamente quello in corrispondenza dei due maggiori bacini idrografici, e quindi delle due più importanti fiumare, presenti tra gli abitati di Scilla e Bagnara Calabria, ossia il torrente Favazzina ed il torrente Sfalassà (cfr. Allegato 1). I maggiori spessori si rinvennero lungo il corso del torrente Favazzina ed in particolare in sinistra idrografica in corrispondenza della zona denominata Passo di Tremusa, anche famosa per le sue grotte. La presenza di tali grotte, in realtà di origine antropica e comunque poco estese, è da ricollegarsi con la presenza, in questo specifico settore di livelli plurimetri, all'interno delle sabbie, di calcareniti grigiastre fortemente cementate che costituiscono ovviamente orizzonti molto più competenti all'interno di questa formazione, come si può anche constatare dalla foto di Fig. 2.14. Ad ogni modo, la presenza delle sabbie solo nel suddetto settore può essere ricondotta alla sua paleo-morfologia, ipotizzando che esso possa essere stato un basso strutturale (un *graben*) nel quale si è creato lo spazio di accomodamento per la sedimentazione di tali depositi. Né dal rilevamento condotto in sito, né dall'analisi delle foto aeree, cui si farà cenno nei successivi paragrafi, è stato possibile determinare alcun elemento tettonico riconducibile alla delimitazione di questo basso strutturale verso Scilla a SW e verso Bagnara a NE, mentre altri ne sono stati riconosciuti che interessano tale formazione ed il suo appoggio sopra il substrato cristallino-metamorfico. La presenza di questi elementi, generalmente orientati NE-SW, ha consentito l'accomodamento dei notevoli spessori di sabbie e ne ha guidato la geometria deposizionale. Infatti, la presenza delle sabbie si interrompe bruscamente verso monte proprio in corrispondenza di alcuni di questi elementi, che, come si può vedere anche dalla Carta geologica allegata, hanno avuto la loro importanza anche nella definizione dei vari ordini di terrazzi marini presenti nell'area. Inoltre, questi elementi tettonici hanno fatto sì che le sabbie risultino tiltate verso

Sud (verso monte), e che dunque i loro spessori si estinguano verso mare. Ciò risulta ancora più evidente considerando che, lungo i versanti che si affacciano sul Mar Tirreno, praticamente non si rileva la presenza di questa formazione.



Fig. 2.14 – *Versante in sinistra idrografica del torrente Favazzina interamente interessato dalla presenza della formazione delle Sabbie Plio-Pleistoceniche. Si nota, circa a metà versante, la presenza di livelli più competenti riferibili ai termini calcarenitici descritti nel testo.*

2.2.3 Depositi marini terrazzati

La letteratura, come si è già evidenziato, presenta diverse gerarchizzazioni delle superfici riferibili a terrazzamenti di origine marina del Pleistocene. Pur risultando più dettagliata ed aggiornata la suddivisione nei diversi ordini proposta da Dumas et alii (2005), in questo lavoro si è preferito fare riferimento alla numerazione adottata da Miyauchi et alii (1994), in quanto sicuramente più completa e riferibile ad un contesto in scala regionale.

Attualmente questi depositi si ritrovano a differenti quote a partire dai 1100 m s.l.m.. In corrispondenza dell'area in esame sono presenti solo alcuni dei dodici ordini individuati da Miyauchi et alii (1994) (I, II, III, IV, VII e X), ma facendo riferimento allo specifico settore cui si riferisce la cartografia geologica dell'Allegato 1, si possono individuare solo gli ultimi tre, più sporadici lembi difficilmente attribuibili ad un determinato ordine in assenza di dettagliate indagini biostratigrafiche o cronostatigrafiche. Per tale motivo, partendo dai dati bibliografici, i vari ordini

di terrazzo sono stati individuati ed attribuiti principalmente in funzione delle quote cui questi depositi sono stati cartografati.

Anche i depositi di terrazzo marino giacciono in discordanza sopra i termini cristallino-metamorfici del basamento ercinico, e, così come avviene per le sabbie Plio-Pleistoceniche, questo limite stratigrafico è contrassegnato da un livello conglomeratico avente uno spessore non superiore al metro (Fig. 2.15). I depositi sono generalmente costituiti da ghiaie e sabbie bruno rossastre, con giacitura orizzontale o debolmente inclinata verso mare (massimo 5-10° di pendenza). Pur essendo in discordanza rispetto, non solo al basamento, ma anche ai depositi sabbiosi Plio-Pleistocenici, la distinzione tra queste due principali formazioni sedimentarie presenti nell'area di studio è risultata in alcuni casi piuttosto delicata e complessa. Per definire al meglio tale diversità, è stato deciso di campionare i sedimenti appartenenti a queste due formazioni e di eseguire delle prove di laboratorio per la determinazione dei parametri fisici e della granulometria. I risultati di queste analisi sono riportati nel Capitolo 3 della presente tesi.

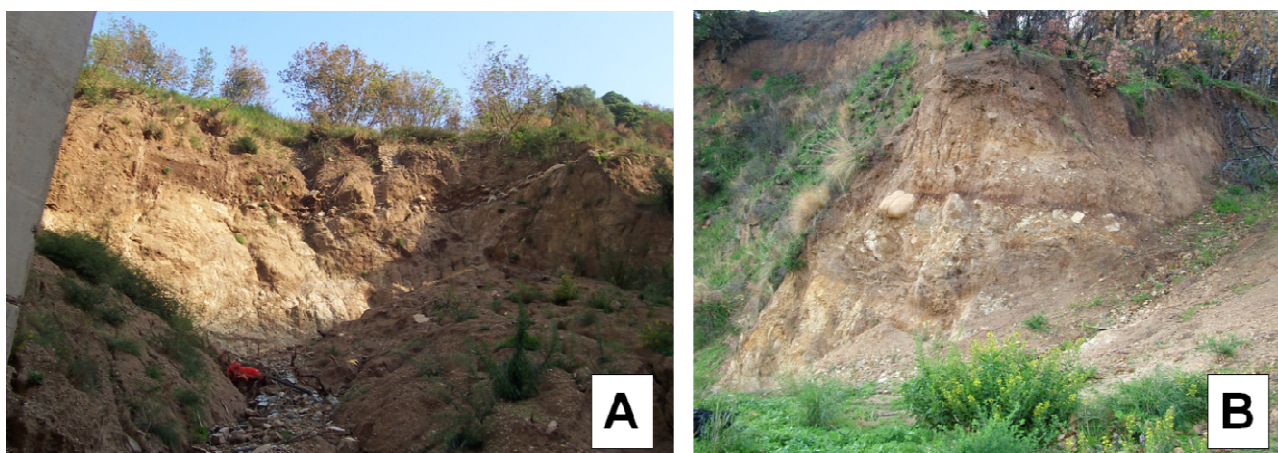


Fig. 2.15 – (A) Affioramento del livello conglomeratico alla base del deposito di terrazzo marino pleistocenico (X ordine), in trasgressione sul sottostante basamento metamorfico (vallone Uliveto, nei pressi di Scilla). (B) Analoga situazione stratigrafica in corrispondenza del fianco sinistro delle frana Costaviola in sinistra idrografica del vallone Condoleo (tra Scilla e Favazzina).

Il terrazzo appartenente al IV ordine è, senza dubbio, quello più esteso e meglio conservato, rappresentando circa 20 km² sul totale di 70 presentati nell'Allegato 1. Esso si sviluppa ad una quota di circa 500 m s.l.m., ed è suddiviso in tre grandi lembi interrotti solo dalla presenza del torrente Sfalassà e del torrente Favazzina. Questi lembi, da NE a SW, sono stati denominati: piani di Case Vermeni (nei pressi di Sant'Eufemia d'Aspromonte), piani di Tagli-Runci-Solano e piani di Melia-Monte Bova. All'interno di queste superfici terrazzate si sono conservate morfologie relitte generatesi prima del sollevamento. Tali morfologie, modellate da un lungo periodo di erosione sub-aerea, comprendono numerose paleovalli fluviali. Il fatto che non siano stati ancora del tutto

cancellati gli antichi tratti morfologici prova che i processi morfogenetici, oltre ad essere molto recenti, hanno agito con estrema rapidità e possono essere correlati alla documentata attività neotettonica dell'intera area (Antonioli et alii, 2006).

Il VII ordine di terrazzo, avente un'età compresa tra i 300 e i 400 Ka, si ritrova principalmente nella porzione più meridionale dell'area rilevata, in particolare nel tratto tra il Pilone Santa Trada e Villa San Giovanni. Esso si sviluppa tra i 320 e i 360 m s.l.m. e la sua continuità è interrotta dalla presenza del Vallone Santa Trada che costituisce il più importante bacino idrografico a sud di Scilla (Fig. 2.16). La terminazione di questo terrazzo verso mare è stata associata alla presenza della Faglia di Scilla, di cui abbiamo già accennato. In particolare Ferranti et alii (2007) collocano tale faglia in corrispondenza della scarpata che collega i depositi marini del VII ordine (circa 120 m s.l.m.) ai successivi depositi marini appartenenti al X ordine (circa 120 m s.l.m.) (Fig. 2.17).



Fig. 2.16 – Superficie terrazzata appartenente al VII ordine di terrazzo marino in destra idrografica del torrente Santa Trada. Più in alto si riconosce il rilievo del Monta Bova nei pressi del quale si sviluppa parte del terrazzo appartenente al IV ordine.



Fig. 2.17 – (a) Vista della faglia di Scilla nel tratto tra Santa Trada e Cannitello, la cui scarpata di faglia è contrassegnata dalle linee tratteggiate in corrispondenza delle faccette triangolari. (b) Dettaglio di una fascia cataclastica associata alla faglia nel basamento cristallino-metamorfico (da Ferranti et alii, 2007).

Spostandoci dalla scarpata di faglia verso la linea di costa, sono stati riconosciuti in letteratura, e riscontrati anche nel rilevamento di campagna, oltre a quelli del X, anche i depositi di terrazzo appartenenti all'XI e al XII ordine. Volendo comunque fare riferimento a tutta l'area rilevata, senza dubbio tra questi ultimi è il X ordine quello che maggiormente influenza l'attuale assetto geologico e geomorfologico della stessa. Come si può vedere anche dall'Allegato 1, i depositi attribuibili al X ordine, ubicati tra gli 80 e i 120 m s.l.m., coprono un'area piuttosto estesa che si sviluppa da est ad ovest di Scilla. Lo stesso centro abitato sorge in parte (quartiere San Giorgio) sopra uno dei lembi del X ordine (Fig. 2.18). In totale i depositi appartenenti a tale ordine hanno un'estensione di circa 12 km² nell'area rilevata. Anche la scarpata che delimita a monte il X ordine, in corrispondenza di Scilla, viene associata alla presenza della faglia di Scilla (Ferranti et alii, 2008), e, in particolare al suo segmento centrale. In questo caso, però, tale scarpata non raccorda il X ordine col VII, bensì direttamente col IV, salvo sporadici e ridotti lembi di terrazzo, difficilmente attribuibili ad uno specifico ordine, che risultano appesi sulla stessa.



Fig. 2.18 – Il centro abitato di Scilla sorge sulla superficie terrazzata di origine marina appartenente al X ordine (circa 125 Ka) (Miyauchi et alii, 1994).

Nel settore compreso tra Favazzina, Bagnara Calabria e Palmi, oltre all'onnipresente IV ordine, si riscontra la presenza solo di piccoli lembi di terrazzo, di modesta estensione. Occorre solo rimarcare la presenza di lembi associabili al VII ordine che interrompono la continuità dei versanti a monte di Bagnara.

2.2.4 Depositi di raccordo, antichi e recenti

Con questa particolare dicitura sono stati individuati e classificati quei depositi quaternari che letteralmente “raccordano” le superfici terrazzate dei terrazzi marini con i sovrastanti versanti piuttosto acclivi. Essi sono stati interpretati come depositi di paleo-versante, dovuti principalmente

a fenomeni gravitativi sia continentali che marini. Le loro principali caratteristiche sono, infatti, la mancanza di continuità laterale, e la notevole distinzione sia strutturale che tessiturale rispetto ai sottostanti depositi marini. In generale, questi depositi si presentano caotici, non stratificati, con clasti, di natura cristallino-metamorfica, spigolosi e con dimensioni da centimetriche a decimetriche. Da ciò ne consegue che evidentemente essi hanno subito un trasporto molto breve. Da un punto di vista litotecnico essi sono generalmente grano-sostenuti, con una matrice sabbiosa di color rosso-bruno. Ciò garantisce la capacità di tali depositi di mantenere pareti sub-verticali per altezze superiori ai 10 metri (Fig. 2.19). La presenza di tali depositi è stata individuata principalmente sopra i depositi appartenenti al X ordine di terrazzo marino, sia nella zona di Santa Trada, sia nella zona di Scilla. In quantità minore essi sono presenti anche sopra i depositi del VII ordine individuati a monte di Bagnara.

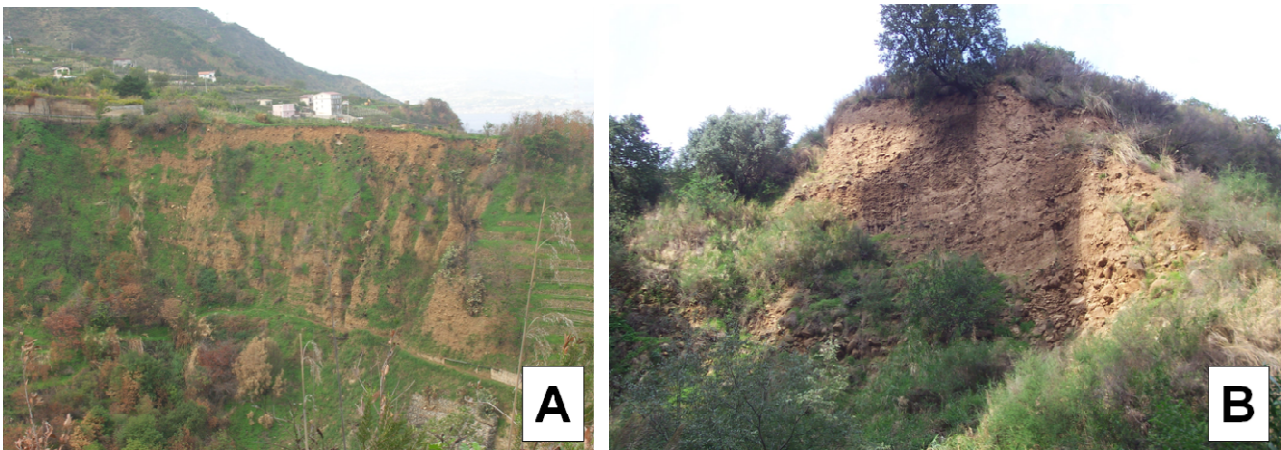


Fig. 2.19 – (A) I depositi di raccordo in sinistra idrografica del torrente Uliveto, nei pressi di Scilla. (B) Altro affioramento dei depositi di raccordo in sinistra idrografica del torrente Scirò, sempre nei pressi di Scilla. In entrambi i casi l'incisione fluviale è causa dei numerosi eventi gravitativi che caratterizzano tali versanti.

2.2.5 Depositi alluvionali e depositi di piana costiera

Per quanto riguarda le alluvioni si tratta di depositi prevalentemente grossolani olocenici di fondo alveo. Le particolari caratteristiche morfologiche dell'area di studio, e la presenza di soli tre corsi d'acqua di una certa importanza, sono causa della modesta estensione di questi depositi. Infatti, nella maggior parte dei casi, i torrenti presentano tratti in cui è prevalente la componente erosiva degli stessi rispetto a quella deposizionale, incidendo quasi esclusivamente il substrato cristallino-metamorfico.

I depositi di spiaggia, non distinti in cartografia dalle alluvioni, sono costituiti principalmente da terre granulari sciolte. Le caratteristiche morfologiche di questo tratto costiero hanno impedito una distribuzione continua di tali depositi. In particolare la loro distribuzione è funzione della presenza

dei bacini idrografici principali, che garantiscono un continuo e cospicuo apporto di sedimenti. Non a caso i depositi di spiaggia più estesi si riscontrano in corrispondenza degli sbocchi a mare del torrente Santa Trada, del torrente Favazzina e del torrente Sfalassà (Fig. 2.20). In altre zone sono presenti, invece, delle *pocket beach*, comprese tra due tratti di falesia e della lunghezza di poche decine o centinaia di metri. Tra queste occorre ricordare la Marina Grande di Scilla e la Marina di San Gregorio. Entrambe queste spiagge ricevono comunque un'alimentazione da parte di due torrenti di modesta capacità come il torrente Livorno e il San Gregorio.

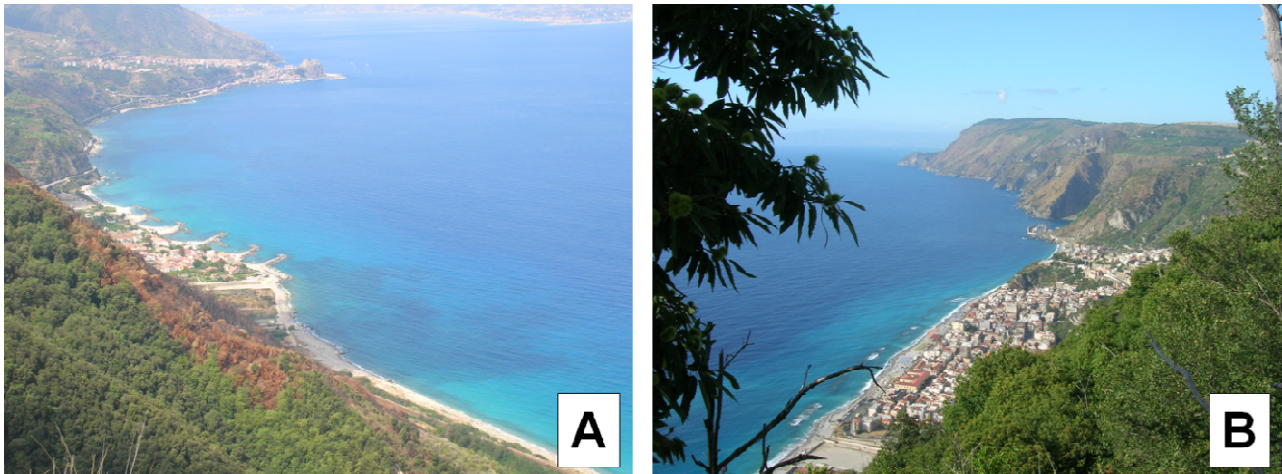


Fig. 2.20 – (A) Depositi di spiaggia in corrispondenza della foce del torrente Favazzina, dove sorge l'omonimo centro abitato. In lontananza Scilla e l'imbocco dello Stretto di Messina. (B) Depositi di spiaggia in corrispondenza della foce del torrente Sfalassà. Anche in questo caso la presenza dei depositi di spiaggia coincide, non a caso, con uno dei maggiori centri abitati dell'area: Bagnara Calabra. Sullo sfondo il tratto a costa alta tra Bagnara e Palmi, anch'esso caratterizzato dalla presenza di due *pocket beach*: Cala Iancuia e Marina Leone.

2.2.6 Depositi eluvio-colluviali

Depositi olocenici derivanti dalla degradazione meteorica dei litotipi affioranti. E' importante rimarcare la loro presenza soprattutto in corrispondenza delle paleovalli fluviali che caratterizzano ampi settori all'interno dei terrazzi marini di IV ordine. In questi casi lo spessore di questi depositi, che generalmente é compreso entro il metro, può raggiungere i diversi metri. Da un punto di vista granulometrico si caratterizza per una composizione prevalentemente sabbioso-limosa e solo subordinatamente argillosa.

2.2.7 Corpi di frana

Nella cartografia geologica (Allegato 1) non sono stati differenziati in funzione dei differenti processi gravitativi che li hanno generati. In generale si tratta di accumuli detritici derivanti da fenomeni di crollo e ribaltamento in roccia, e di depositi di frana per scorrimento traslativo o roto-traslativo.

2.3 ASSETTO GEOLOGICO-STRUTTURALE DI DETTAGLIO

Come già discusso, l'area in esame rappresenta, nel suo complesso, un alto strutturale rispetto agli adiacenti bacini sedimentari. Per tale motivo la presenza di successioni sedimentarie risulta piuttosto limitata, a favore di estesi affioramenti del basamento cristallino-metamorfico. Se questo da un lato ha rappresentato un indubbio vantaggio nella ricerca di affioramenti idonei all'esecuzione dei rilievi geomeccanici, dall'altro è stato causa di una evidente difficoltà nella ricostruzione strutturale dell'area. Infatti, la mancanza, in molti settori di vincoli stratigrafici nella definizione e collocazione in carta dei principali elementi tettonici. In questo paragrafo si intende principalmente evidenziare i principali criteri seguiti nella definizione di tali elementi, attraverso alcuni specifici esempi. Questi criteri fanno riferimento sia al rilevamento di campagna condotto nell'area, sia ad una analisi fotointerpretativa, sia all'analisi ed al confronto con la bibliografia inerente.

Il rilevamento geologico ha consentito di individuare gli elementi tettonici principalmente laddove essi effettivamente dislocano successioni sedimentarie quali ad esempio le sabbie Plio-Pleistoceniche. Ciò è stato riscontrato sia nel bacino idrografico del torrente Favazzina, sia in quello del torrente Sfalassà. Questi elementi tettonici, come si può vedere dalla cartografia geologica, dislocano, in vari punti, le sabbie, e, di conseguenza, la loro superficie di appoggio sopra il basamento metamorfico. L'andamento di questi elementi è principalmente NE-SW, immergendo verso mare. Al di fuori delle valli dei due torrenti è difficile determinare la prosecuzione laterale di questi elementi, anche per la mancanza di chiari indizi morfologici a causa della presenza delle superfici terrazzate appartenenti al IV ordine.

Laddove, invece, non erano presenti i depositi sedimentari, si è fatto riferimento alla presenza di indicatori di elementi disgiuntivi quali le faglie, come, ad esempio fasce cataclastiche e brecce. In particolare, di notevole aiuto sono state le "sismite" di cui si è ampiamente discusso precedentemente e che hanno consentito di ricostruire l'assetto strutturale soprattutto nel settore del Monte Pacì ad ovest di Scilla.

La Fig. 2.21 mostra due foto relative a due diverse fasce cataclastiche cui sono stati due importanti lineamenti tettonici riportati nella cartografia geologica. La foto A mostra un piano associato ad un elemento tettonico nei pressi di Melia, immergente verso NW, mentre la foto B mostra un altro piano, in corrispondenza di Punta Pacì, associato alla faglia di Scilla (Ferranti et alii, 2008).

In altri casi, invece, l'esistenza di un lineamento tettonico è stata ipotizzata per la presenza di un deposito di accrescimento di faglia, come nel caso di Fig. 2.22. Nella foto si evidenzia la presenza del deposito sabbioso di colore bruno-rossastro.

Altre volte la presenza di elementi tettonici è stata riscontrata da affioramenti in cui il substrato metamorfico si ritrova lateralmente interrotto da un piano perfettamente verticale su cui si sono poggiati i depositi di terrazzo marino, come mostra la Fig. 2. 23.

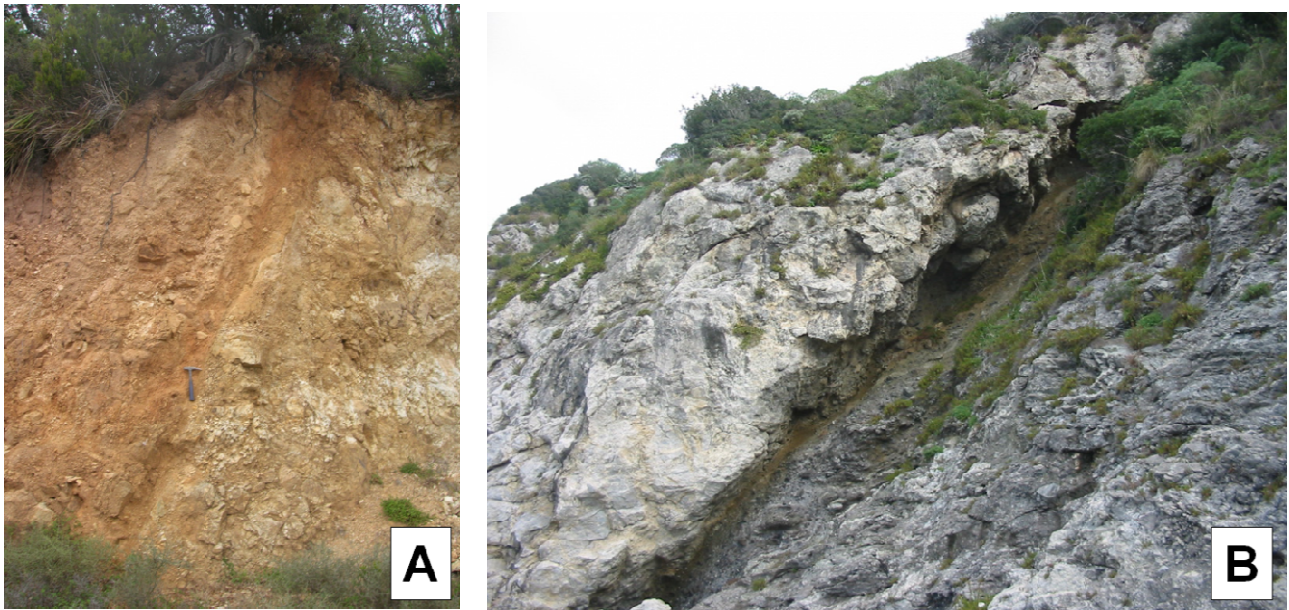


Fig. 2.21 – (A) Fascia cataclastica all'interno del basamento metamorfico associata ad una faglia immergente verso NW. (B) Fascia cataclastica associata alla presenza della faglia di Scilla in prossimità di Punta Paci.



Fig. 2.22 – Deposito sabbioso interpretato come di accrescimento di faglia (perimetrato in giallo). Tutto il resto dell'affioramento è costituito dal basamento metamorfico.



Fig. 2.23 – *Ammasso roccioso riferibile al substrato metamorfico (a sinistra), interrotto da un piano perfettamente verticale su cui poggiano i depositi di terrazzo marino (località Catoi).*

Queste evidenze geologiche sono state ovviamente rapportate con la presenza di forme morfologiche anch'esse indicatrici dell'esistenza di elementi tettonici. Evidentemente queste forme sono state riconosciute anche nel corso del rilevamento di campagna, ma, in questa sede si ritiene più opportuno soffermarsi sull'analisi condotta tramite l'utilizzo delle fotografie aeree, che hanno consentito di interpretare tali forme ad una scala maggiore e più appropriata. Questo studio è stato condotto con la collaborazione della Prof.ssa Maria Cristina Salvatore e del Dott. Nicola Bellissimo. Il dettaglio dei risultati dell'analisi delle foto aeree è stato riportato nella tesi già discussa da parte di quest'ultimo. Qui vengono solo brevemente riportati i principali criteri seguiti e i principali risultati ottenuti, in relazione all'individuazione dei lineamenti tettonici.

L'indagine, che ha riguardato un'area superiore rispetto a quella presentata nell'Allegato 1, è stata eseguita utilizzando fotografie aeree ad alta quota, in scala nominale 1:70.000, con una elevata risoluzione a terra (anche mezzo metro nelle migliori condizioni di contrasto), i cui fotogrammi fanno parte del "Volo Italia 1988-89" che copre l'intero territorio nazionale.

Dall'analisi fotointerpretativa sono state individuate le lineazioni (o allineamenti), definite come una disposizione lineare allungata, spesso non ampia, di varie caratteristiche topografiche, tonali e geologiche (Drury, 1987). Queste caratteristiche si suddividono in elementi puntuali (sorgenti, cime, selle, ecc.), lineari (alvei fluviali, orli di scarpata e di falesia, crinali, trincee, ecc.), oppure areali (crateri, doline, frane, valli, ecc.). Di fatto queste lineazioni rappresentano un indizio di lineamenti tettonici.

Le lineazioni individuate dall'analisi delle foto aeree sono state 47, più o meno estese. Alcune di queste ricadono, o proseguono, all'esterno dell'area oggetto di questa tesi. Ma, al di là delle specifiche caratteristiche delle singole lineazioni, quello che preme in questa sede sottolineare è la buona corrispondenza tra l'andamento di alcune di esse e gli indizi geologici di presenza di faglie riscontrate in campagna. Se è vero infatti che l'esistenza di una lineazione non è direttamente associabile alla presenza di un elemento tettonico, la sovrapposizione di questa con più indizi

geologici, come ad esempio quelli precedentemente descritti, rende questa possibilità quantomeno più probabile. Da ciò ne è conseguita la possibilità di effettuare una gerarchizzazione delle lineazioni individuate dalla fotointerpretazione. In pratica, in funzione del numero e della “qualità” degli elementi, sia geologici che morfologici, presenti lungo una lineazione sono state individuate:

- I. le faglie certe;
- II. le faglie presunte;
- III. le lineazioni s.s..

Quindi, se ad una faglia certa corrispondono più elementi morfologici e più evidenze geologiche di sito, in una lineazione s.s. sono stati individuati solo pochi elementi morfologici senza alcuna corrispondenza con la geologia.

Nella carta geologica (Allegato 1) sono state riportate solo le faglie certe e quelle presunte, nonché quelle individuate esclusivamente dal rilevamento di campagna.

In linea generale, questa analisi ha consentito di individuare due principali sistemi di faglie, uno parallelo ed uno perpendicolare alla linea di costa, rispettivamente con direzione NE-SW ed immersione NW, e con direzione NNW-SSE ed immersione variabile. Queste considerazioni sono del tutto coerenti con la strutturazione di questo settore dell’Arco Calabro presente in letteratura. Inoltre, in una visione d’insieme, si può evidenziare come, generalmente, i lineamenti tettonici paralleli alla costa presentino una maggiore continuità quindi una maggiore lunghezza, in accordo con la geometria dell’*horst* di Campo Piale, mentre quelli trasversali alla costa, per lo stesso motivo, presentino una lunghezza inferiore. In più, quelli paralleli alla linea di costa rivestono anche una importanza a scala regionale, trovandosi tra queste la faglia di Scilla e, seppur poco fuori l’area rilevata, la faglia di Cittanova, o meglio la sua continuazione verso SW. Se quest’ultima è unanimemente considerata responsabile di uno degli eventi sismici del “Terremoto delle Calabrie” (1783), sulla capacità di generare terremoti della prima sussistono tuttora profonde differenze all’interno della comunità scientifica. Prescindendo però dalle capacità sismogenetiche, ovviamente non oggetto di questa tesi, non si può non considerare questo elemento come di gran lunga quello che maggiormente influenza tutte le caratteristiche geologiche e geomorfologiche dell’intero tratto costiero che da Villa San Giovanni (Cannitello) si sviluppa fino a Palmi (Monte Sant’Elia).

2.4 MODELLO GEOLOGICO E CARATTERI MORFOLOGICI DELLE FRANE PRESE IN ESAME

Accanto al rilevamento geologico, come già accennato, è stata svolta un’analisi volta ad individuare e classificare i movimenti gravitativi presenti nel territorio in esame. Questo studio è stato condotto sia tramite il rilevamento di campagna che l’analisi fotointerpretativa. La fusione delle informazioni

desunte da queste due distinte analisi ha consentito di definire piuttosto dettagliatamente il quadro dei dissesti presenti nell'area. Per una completa visione dei risultati, e della relativa cartografia, ottenuti da questa analisi si rimanda alla tesi di laurea del Dott. Bellissimo, mentre in questa sede, anche per meglio focalizzare temi ed obiettivi del lavoro, si è deciso di descrivere esclusivamente le tre frane che rappresentano i casi campioni su cui sono stati testati i modelli geologico-tecnici definiti attraverso l'analisi geomeccanica. Queste frane, tra loro diverse per tipologia, estensione areale, volumetria, modalità d'innescò, cinematismo e altro, sono, ovviamente, accomunate dal fatto di interessare, quasi esclusivamente, il substrato gneissico. Le diverse Tavole dell'Allegato 2 illustrano sia il modello geologico che gli elementi morfologici caratterizzanti i versanti interessati dai movimenti gravitativi, per un'areale significativo al di fuori della frana stessa. Nella stessa cartografia vengono riportati i punti di rilievo geomeccanico, utilizzati per definire i modelli geologico-tecnici che verranno discussi nei successivi capitoli. L'ubicazione di tutti i punti di rilievo geomeccanico è stata riportata nella cartografia geologica (Allegato 1). In più, le differenti sezioni geologiche presentate, sia trasversali che longitudinali alle frane stesse, consentono una completa definizione dei modelli geologici proposti, e costituiscono il migliore strumento per la costruzione dei modelli geologico-tecnici, come dettagliatamente spiegato nei successivi capitoli.

2.4.1 La frana sismoindotta del Monte Pacì

La frana del Monte Pacì (o Campallà secondo una differente toponomastica) rappresenta senza dubbio il fenomeno gravitativo di maggiore rilevanza all'interno del territorio studiato, sia per le caratteristiche fisiche e geometriche, sia per gli effetti catastrofici che ha generato. Inoltre, la particolarità di alcuni elementi geologici che contraddistinguono l'area, la possibilità di effettuare uno studio di dettaglio delle caratteristiche geomeccaniche degli ammassi rocciosi presenti in affioramento, la tipologia e i meccanismi di innescò della frana hanno reso lo studio della stessa particolarmente interessante dal punto di vista prettamente scientifico. I risultati di questo studio sono stati presentati in un articolo pubblicato sulla rivista *Geomorphology* avente come titolo: "*Earthquake triggering of landslides in highly jointed rock masses: Reconstruction of the 1783 Scilla rock avalanche (Italy)*" (Bozzano F., Lenti L., Martino S., Montagna A., Paciello A., 2011). Nel corso delle attività del presente dottorato sono stati condotti tutti i rilevamenti di sito nonché i rilievi geomeccanici da cui sono stati prodotti i modelli geologici e geologico-tecnici utilizzati per la successiva modellazione numerica e la *back-analysis*. In questo capitolo ci soffermiamo comunque sul modello geologico.

Infine, è fondamentale rimarcare come, oltre l'interesse e la peculiarità scientifica, lo studio della frana del Monte Pacì è stato impreziosito dal reperimento di numerose testimonianze storiche

relative nello specifico a questa frana, e più in generale al “Terremoto delle Calabrie” del 1783. Queste testimonianze, alcune delle quali si possono considerare come le prime “scientifiche” relative ad un evento sismico, ci hanno consentito di definire con esattezza la collocazione temporale dell’innescò della frana all’interno della sequenza sismica del Terremoto delle Calabrie. In particolare, la frana del Monte Pacì è avvenuta intorno alle 1:45 della notte tra il 5 ed il 6 febbraio 1783, circa 30 minuti dopo la seconda grande scossa della sequenza sismica sopra citata (la prima avvenne intorno alle 12:45 del 5 febbraio, quindi poche ore prima) (Sarconi, 1784; De Lorenzo, 1877; Minasi 1970, 1971). Mentre il primo evento sismico (5 febbraio) è stato attribuito alla presenza della Faglia di Cittanova, nella Piana di Gioia Tauro (Jacques et alii, 2001; Galli & Bosi, 2002), il secondo è stato correlato alla presenza della già ampiamente discussa Faglia di Scilla (Ferranti et alii, 2008). Se Minasi (1785) ci ha lasciato due incisioni rappresentanti il versante del Monte Pacì visto dalla rocca di Scilla prima e dopo la frana, lo stesso Minasi e altri autori (Vivenzio, 1778; Grimaldi, 1784; Sarconi, 1784) ci hanno testimoniato che la frana ha generato un violento *tsunami* che ha interessato circa 40 km di costa calabrese. In particolare, nella spiaggia della Marina Grande di Scilla si è abbattuta un’onda alta circa 16 m causando la morte di oltre 1500 persone che si erano lì accampate in seguito ai danneggiamenti subiti dalle abitazioni per la prima scossa di terremoto. Queste testimonianze storiche sono state ultimamente confermate da alcuni lavori scientifici che hanno messo in evidenza come un evento gravitativo come quello occorso sul Monte Pacì sia in grado di generare un’onda di tsunami con le caratteristiche precedentemente descritte (Graziani et alii, 2006; Gerardi et alii, 2008; Mazzanti & Bozzano, 2011). Avendo avuto la sua terminazione in mare, con conseguente deposito di parte del detrito di frana in ambiente marino, per una più completa analisi di tutto il fenomeno gravitativo è stata condotta una campagna di indagini finalizzata alla ricostruzione della batimetria al largo della costa di Scilla nell’ambito del Progetto PRIN “Integrazione di tecniche innovative di esplorazione geologica e geofisica a terra e a mare per lo studio dei processi di instabilità gravitativa costiera” (Coordinatore scientifico: Prof. F. L. Chiocci). Nell’Allegato 2.1, relativo alla cartografia geologica (con i principali elementi morfologici relativi alla frana del 1783) e quindi al modello geologico dell’area, vengono quindi riportate le isobate dell’area *off-shore*. La ricostruzione morfologica di quest’area ha consentito di individuare la presenza di parte del detrito di frana circa 2 km al largo della costa. Questo detrito, dall’analisi delle forme marine sembra essere costituito principalmente da grossi blocchi di roccia (fino a 200.000 m³) inglobati in una matrice più fine (Bosman et alii, 2006; Mazzanti, 2008; Mazzanti & Bozzano, 2011).

Concentrandoci sul modello geologico dell'area di frana, proposto nell'Allegato 2.1, scaturito da un dettagliato rilevamento di campagna condotto in questi anni, non si può non partire dal particolare assetto tettonico che caratterizza l'intera area del Monte Paci. Come già evidenziato nel paragrafo dedicato alla cartografia geologica dell'intera area di studio, proprio il settore del Monte Paci è stato quello in cui è stato possibile entrare più nel dettaglio circa la risoluzione degli elementi tettonici presenti. In questa area, come si può notare nell'Allegato 2.1, sono stati individuati lineamenti tettonici sia perpendicolari che paralleli alla linea di costa, che, come abbiamo visto più a grande scala, influenzano tutto l'assetto geologico di questo tratto di costa tirrenica meridionale della Calabria. Tra gli elementi tettonici aventi una direzione circa parallela alla linea di costa sicuramente il più importante, anche in relazione alla frana del 1783, è quello intersecante il fianco sinistro della stessa. In corrispondenza di quest'ultimo, infatti, si riconosce un piano immergente a N50W con un'inclinazione di circa 50° (Fig. 2.24). Questo piano, che presenta tra l'altro una bassa rugosità, potrebbe aver rappresentato un importante svincolo cinematico nel momento di attivazione della frana stessa. La presenza di un piano così ben individuabile, insieme a quella di numerosi affioramenti di ammassi rocciosi da intensamente fratturati a cataclasati (dato come vedremo confermato quantitativamente dai numerosi rilievi geomeccanici effettuati nell'area), ha consentito di individuare un'ampia fascia di intensa fratturazione lungo tutto il settore sinistro della frana. Questa fascia è ben individuabile sia nella cartografia dell'Allegato 2.1, sia nella sezione trasversale alla frana stessa (A-A'). Nella stessa sezione si può notare come il settore destro dell'area di frana sia caratterizzato, invece, da gneiss da debolmente a mediamente fratturati.



Fig. 2.24 – Fianco sinistro della frana del Monte Paci, caratterizzato da piani immergenti a N50W di 50° interpretati come evidenza della presenza di una faglia circa perpendicolare alla linea di costa.

Delle faglie invece circa parallele alla linea di costa ne abbiamo in parte già parlato nel paragrafo relativo all'assetto geologico generale. Giova qui ricordare come la corona di frana si sia impostata

lungo uno dei piani di faglia individuati, caratterizzato dalla presenza delle brecce in matrice calcitica. Attualmente la corona di frana presenta un'altezza di circa 25 m in prossimità del fianco sinistro, mentre essa si riduce spostandoci su quello destro (poco più di 10 m). Immediatamente a monte della corona di frana sono presenti numerose trincee probabilmente dovute al rilascio tensionale verificatosi in seguito all'evento del 1783. Elementi morfologici e geologici hanno consentito di individuare sei differenti faglie con direzione circa parallela alla linea di costa, immergenti verso la stessa e sub-verticali. Tra queste le più importanti sono quelle in prossimità della costa stessa, essendo responsabili della presenza di un'altra importante fascia di intensa fratturazione come evidenziato nella sezione cinematica (T-M). Proprio in corrispondenza di Punta Pacì alcuni autori ritengono si possa individuare la faglia di Scilla (Ferranti et alii, 2008).

E' importante sottolineare come i principali elementi morfologici relativi alla frana in questione si siano conservati molto bene e consentono di definire questo evento gravitativo anche dettagliatamente. In definitiva, la frana del monte Pacì può essere considerato un evento complesso (Cruden & Varnes, 1996), caratterizzato da un iniziale scorrimento lungo i piani controllati strutturalmente, e successivamente evoluto in una vera e propria *rock-avalanche* (Bozzano et alii, 2011). Le Figg. 2.25 e 2.26 ci consentono di meglio apprezzare questi elementi, con una vista dell'area di svuotamento rispettivamente da mare e dalla corona di frana.

L'area interessata dall'evento franoso ha una superficie di circa $2 \times 10^5 \text{ m}^2$, una lunghezza, misurata dalla sommità della scarpata principale fino a mare, di 725 m, coprendo un dislivello complessivo di 425 m. La pendenza media del versante su cui si è innescata la frana è, quindi, di 30° . Il fronte della scarpata principale misura circa 150 m, ma, in alcuni punti la larghezza della zona di frana raggiunge i 325 m. Dalla ricostruzione dell'assetto geomorfologico del versante prima dell'evento franoso (Allegato 2.1), si può vedere che lo spessore di roccia interessato dalla frana, raggiunge, all'incirca a metà versante, gli 80 m. Partendo da questi dati, e soprattutto dalle sezioni geologiche "pre-frana", si è cercato di valutare il volume di roccia coinvolta dalla frana stessa. Questo volume è risultato di circa 5,5-6 milioni di metri cubi.

Il materiale di accumulo è presente lungo tutta l'area interessata dalla frana, avendo comunque spessori variabili. Un valore dello spessore del detrito di frana è stato ricavato dai dati di un sondaggio (SP1) realizzato nell'ambito del già citato PRIN, e da me seguito. Esso è stato terebrato fino ad una profondità di 30 m, ed ha consentito di individuare la base del detrito di frana ad una profondità di 20-21 m dal p.c., laddove la presenza di materiale gneissico risultava continua fino a fondo foro. Nella parte più superficiale del sondaggio stesso è stata individuata un'alternanza di

spezzoni di roccia (soprattutto breccie in matrice calcitica) e di matrice più fine (sabbioso-limosa). Questa stratigrafia è in accordo con quanto visibile in affioramento, laddove il detrito di frana è spesso costituito da blocchi plurimetrici di breccie di gneiss in matrice calcitica immersi in una matrice sabbioso-limosa.

In particolare, questi campi di blocchi si trovano ai piedi della scarpata principale, fino ad una quota di 335 m s.l.m., nella zona subito a monte ed a valle della sede autostradale, sul fianco destro a diverse quote, e, soprattutto, in prossimità della costa. I blocchi presenti alla base della scarpata principale (Fig. 2.27), così come molti blocchi sul fianco destro, poggiano sopra al detrito sabbioso-limoso, e, quindi, si possono interpretare come materiale di crolli successivi alla frana del 1783. Gli altri blocchi, invece, sono inglobati all'interno del materiale sabbioso-limoso, per cui si ritiene che siano stati coinvolti nell'evento principale. Il campo di blocchi più importante ed esteso, è quello presente lungo la costa (Fig. 2.28). Qui sono presenti blocchi di roccia di diversi metri cubi di volume. La matrice sabbioso-limosa è stata in molti punti asportata dall'azione marina. Il tratto di costa coinvolto dall'evento franoso è lungo circa 250-260 m. Il volume del materiale detritico, presente nell'area di frana, è pari a circa un milione di metri cubi, un valore molto basso rispetto a quello del materiale coinvolto nella frana. Si può quindi affermare che gran parte del materiale franato la notte fra il 5 e 6 febbraio 1783, lungo il versante settentrionale del Monte Pacì, sia arrivato in mare, e qui si sia depositato (come dimostrano le indagini *off-shore*), causando lo tsunami di Scilla.



Fig. 2.25 – Area di frana del Monte Pacì vista da mare. Sono indicate le principali caratteristiche geometriche della frana stessa.

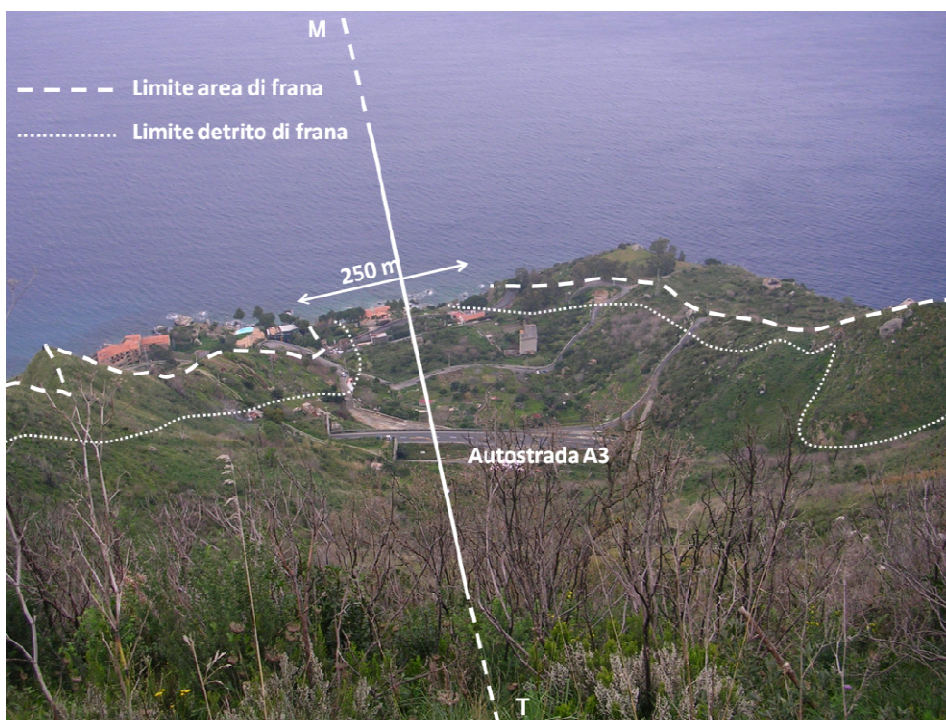


Fig. 2.26 – Area di frana del Monte Paci vista dalla corona di frana. In questa immagine è apprezzabile il volume svuotato dall'evento gravitativo.



Fig. 2.27 – Detrito di frana costituito da enormi blocchi di breccie di gneiss in matrice calcitica poggianti sul detrito più fine alla base della scarpata di frana. E' presumibile che i blocchi rocciosi in questo settore siano da attribuire ad eventi di crollo dalla scarpata per arretramento della stessa.



Fig. 2.28 – Detrito di frana costituito da enormi blocchi di breccie di gneiss in matrice calcitica in corrispondenza dell'attuale linea di costa. In questo caso la matrice fine risulta asportata dal moto ondoso, e si ritiene che insieme ai blocchi costituisca il detrito della frana del 1783.

2.4.2 La frana Feliciusu

La frana Feliciusu prende il nome dalla sottostante galleria autostradale, che, nell'ambito dei lavori di ammodernamento dell'Autostrada Salerno-Reggio Calabria è stata parzialmente ampliata. Essa si trova all'interno del territorio comunale di Bagnara Calabria e in direzione SW rispetto allo stesso centro abitato (Allegato 1.2). Se la frana del Monte Pacì, come abbiamo visto, rappresenta un fenomeno di grandi dimensioni, con mille sfaccettature e che quindi concede numerosi spunti per studi scientifici che toccano più ambiti della geologia, lo stesso non si può certo dire di questa frana di modeste dimensioni, la cui presenza è, se vogliamo, poco significativa in un territorio caratterizzato da una incredibile densità di fenomeni gravitativi. In più, seppur in prossimità di un imbocco di una galleria autostradale (Fig. 2.29) è da sottolineare che la sua presenza non ha influito nella realizzazione della stessa, a differenza di altre che hanno interessato altri imbocchi nel tratto Scilla – Bagnara Calabria. Quindi essa non rappresenta neanche un fattore di rischio per alcuna attività antropica. Eppure essa ha rappresentato un ottimo campo di prova per testare i metodi di costruzione dei modelli geologico-tecnici presentati in questa tesi e per la loro successiva validazione. Questo per due particolari motivi. Innanzitutto è stato possibile anche in questo caso definire con estremo dettaglio le caratteristiche geologiche dell'area, nonché gli elementi geomorfologici caratterizzanti la frana stessa, e, in secondo luogo, ma di certo non meno importante, è stato possibile effettuare numerosi rilievi geomeccanici in tutta l'area intorno alla frana. Tutto ciò ha consentito di definire prima il modello geologico presentato nell'Allegato 2.2, in scala molto dettagliata (1:2.000), poi quello geologico-tecnico (alla stessa scala) proprio grazie alla densità dei punti di rilievo. Pur in assenza di specifiche indagini geognostiche, gli elementi morfologici individuati in campagna hanno consentito di definire al meglio la geometria del terreno coinvolto nel movimento gravitativo e l'evoluzione dello stesso.

La frana Feliciusu si imposta sul versante in destra idrografica del torrente Mancusi, uno dei numerosi fossi che caratterizzano la fascia costiera tra Scilla e Bagnara, e che si sviluppano a partire da circa 500 m di quota (in corrispondenza del IV ordine di terrazzo marino) fino al mare, avendo una pendenza estremamente elevata. Per quanto concerne il quadro geologico generale è importante sottolineare la presenza di almeno due faglie immediatamente a monte rispetto all'area di frana. Entrambe si possono riferire al sistema circa parallelo alla linea di costa. La prima delle due, partendo dall'alto, è quella che ribassa, in località Catoi, le sabbie gialle Plio-pleistoceniche, ed in corrispondenza della quale si osserva sia la presenza di una sella morfologica, sia di un'ampia fascia cataclastica. La seconda, più a ridosso dell'area di frana, e pertanto visibile nell'Allegato 2.2, ha direzione analoga alla prima ed è sub-verticale. Questo piano di faglia, ben riconoscibile in

campagna è stato già mostrato nella Fig. 2.23. In questa figura si nota il substrato metamorfico a sinistra, mentre a destra sono presenti i terreni riferibili al terrazzo marino che si sono poggiati sopra questo piano tettonico. L'estensione areale del suddetto deposito di terrazzo è ridotta, essendo pari a 1,3 km². La base di tale deposito di terrazzo è caratterizzata dalla trasgressione dello stesso sul substrato metamorfico. In Fig. 2.30 si evidenzia tale contatto in corrispondenza della parte sommitale della corona della frana Felicibusu, in un settore in cui questa è arretrata per fenomeni di crollo. Nella stessa foto è possibile notare come il substrato gneissico immediatamente al di sotto del contatto trasgressivo risulti essere fortemente fratturato ed alterato.

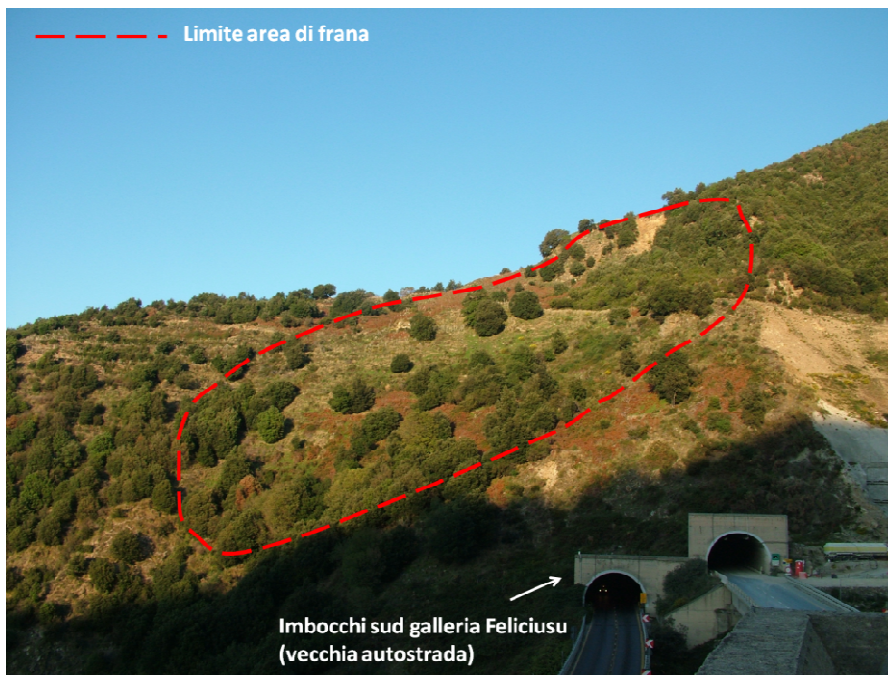


Fig. 2.29 – Vista della frana Felicibusu dal versante opposto. Si evidenzia come gli imbocchi sud delle gallerie della vecchia autostrada non sono stati direttamente interessati dalla presenza di tale movimento gravitativo. Tantomeno risulta interessato il nuovo imbocco che si trova sulla destra rispetto alla foto.

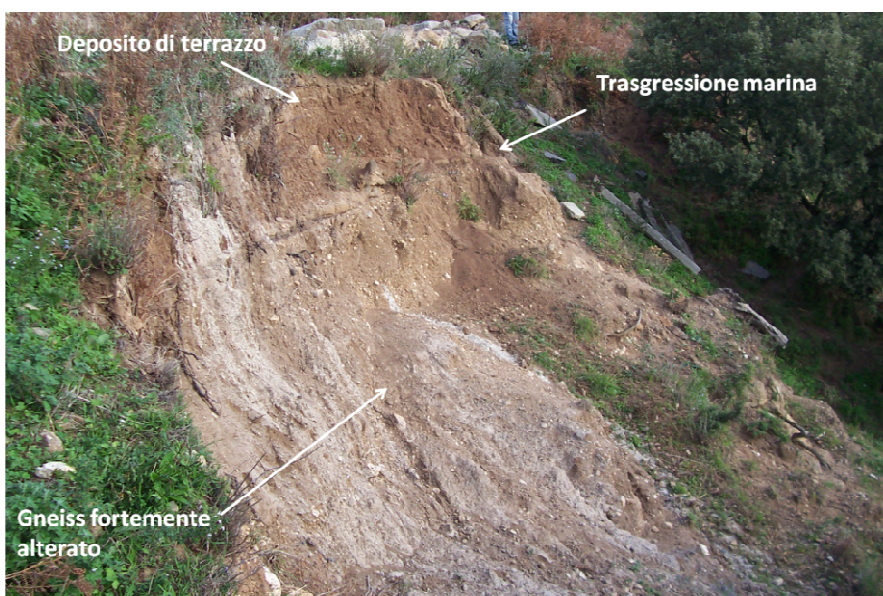


Fig. 2.30 – Contatto trasgressivo tra il substrato metamorfico fortemente alterato e il deposito di terrazzo marino in corrispondenza della corona della frana Felicibusu.

La restante parte dell'area limitrofa alla frana risulta caratterizzata dalla esclusiva presenza del substrato metamorfico anche in questo caso rappresentato dagli gneiss ercinici. Essi, come si può notare dalla cartografia presente nell'Allegato 2.2, si presentano da scarsamente fratturati a frantumati, e, come già detto, i numerosi rilievi geomeccanici effettuati hanno consentito di quantificare piuttosto dettagliatamente questa variazione geomeccanica.

La presenza delle sopracitate faglie, testimonia, inoltre, come anche in questo caso il controllo strutturale sia di fondamentale importanza nell'innescò e nell'evoluzione dello stesso fenomeno gravitativo. A conferma di tale considerazione il rilevamento geologico di dettaglio condotto sulla frana, unitamente ai dati sulle famiglie di discontinuità ricavati dai rilievi geomeccanici, ha consentito di individuare due fasce di intensa fratturazione dell'ammasso, come si può vedere nell'Appendice relativa a tutte le stazioni, aventi entrambe direzione circa NE-SW, a fronte del verso di spostamento del corpo di frana che è avvenuto in direzione WSW. Pur avendo analoga direzione questi sistemi hanno opposta immersione, dato che uno immerge verso mare e l'altro verso monte. Queste due distinte fasce di intensa fratturazione si sovrappongono, seppure parzialmente, in corrispondenza del fianco destro della frana, che, non a caso, è caratterizzato dagli ammassi rocciosi di peggiore qualità. Una terza fascia di intensa fratturazione è stata ben individuata in campagna, trovando riscontro anche nei dati geomeccanici. Essa caratterizza la parte di piede della frana Feliciusu, ha direzione NW-SE ed è stata assunta come verticale.

Il coronamento della frana Feliciusu si imposta solo in parte nei depositi di terrazzo marino quaternari, che costituiscono, pertanto, soltanto una porzione minima della scarpata principale, e non superano mai lo spessore di 1,5 m; il resto della corona si attesta, invece, negli gneiss per una lunghezza complessiva di circa 170 m (Fig. 2.31A). La parte basale della scarpata di frana è coperta dall'accumulo per crollo di blocchi di roccia distaccatisi dalla corona, che, a loro volta, poggiano sul corpo di frana. E' importante sottolineare come anche in questo caso la scarpata principale tenda ad arretrare per fenomeni di crollo. A monte della stessa sono anche riconoscibili delle fratture e trincee dovute al rilascio tensionale. Il corpo di frana si presenta molto ben evidentemente terrazzato, tanto che in tutta la sua estensione sono stati distinti almeno quattro ordini di terrazzo, i primi due dei quali sono particolarmente evidenti ed estesi (Fig. 2.31B).

Il piede del corpo di frana è stato cartografato ad una quota di poco più di 330 m s.l.m., pertanto la frana Feliciusu è da considerarsi una frana "sospesa", in quanto si localizza a circa 100 m di dislivello dal fondovalle.

Il tipo di cinematismo proposto corrisponde a quello di una frana roto-traslazione a prevalente componente traslazionale (Cruden & Varnes, 1996), come dimostrato dalla geometria della superficie di scorrimento lungo la sezione cinematica L-L' (Allegato 2.1) che non si presenta tanto come un arco quanto come una superficie curva a largo raggio. Nella medesima sezione è possibile apprezzare gli spessori del corpo di frana, che si attestano su valori massimi di quasi 30 m, nonché la profondità al di sotto della quale si trova il cavo della vecchia carreggiata Nord della galleria Feliciusu (futura carreggiata Sud, a seguito dei lavori di allargamento del cavo stesso) che è variabile da 67 m a 108 m a seconda del punto di misura. La sezione L-L' non arriva ad intersecarsi invece con l'asse della futura canna Nord, che, pertanto, non viene riportata. E' da notare comunque che il corpo di frana non interferisce direttamente con alcuna delle gallerie autostradali presenti.

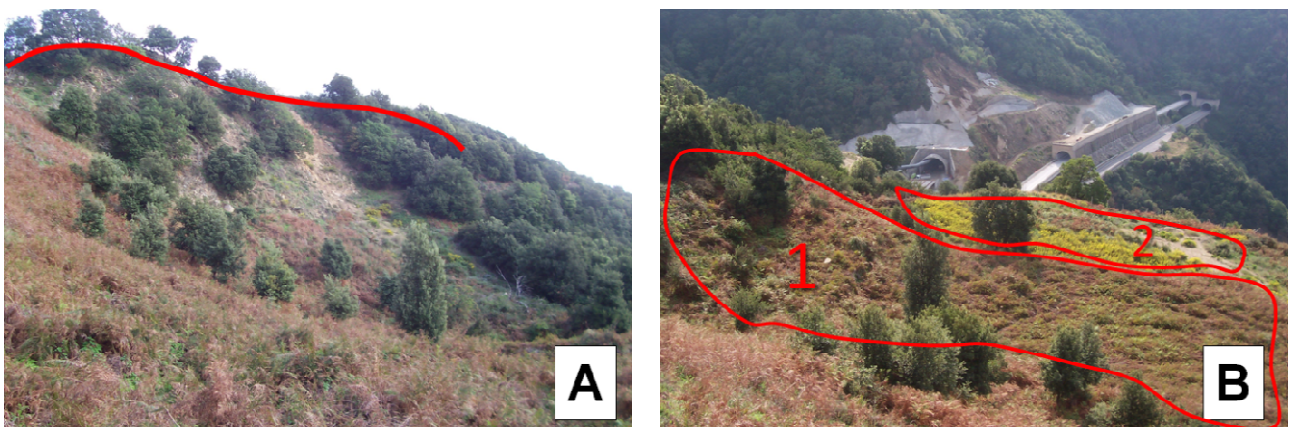


Fig. 2.31 – (A) Scarpata della frana Feliciusu (in rosso l'orlo della scarpata). (B) Terrazzi di frana con relativa numerazione gerarchica.

Come nel caso della frana del Monte Paci, anche in questo sono le diverse sezioni geologiche presentate (Allegato 2.2) a fornirci un quadro più chiaro ed immediato circa l'assetto geologico in cui si è potuta sviluppare la frana Feliciusu. In particolare, le sezione V-V', che taglia trasversalmente la frana, mostra come quest'ultima si sia sviluppata quasi esclusivamente all'interno delle fasce a più intensa fratturazione del substrato gneissico. La sezione Z-Z' è ubicata nei pressi del fianco destro della frana, e, come si avrà modo di apprezzare in seguito, essa ha rivestito una notevole importanza nella costruzione del modello geologico-tecnico, in quanto, come anche riportato nella sezione stessa, essa intercetta numerose stazioni geomeccaniche che hanno consentito di definire dettagliatamente le variazioni del grado di fratturazione degli ammassi rocciosi incontrati e di mettere in relazione questi dati quantitativi con le osservazioni di campagna precedentemente illustrate. Infine, sempre nell'Allegato 2.2, sono presenti quattro differenti versioni della sezione cinematica L-L' (utilizzata per le analisi di stabilità). La prima è quella che possiamo definire *standard* in quanto presenta solo i dati geologici e senza differenziazione all'interno del

corpo di frana. Ma, per la frana Feliciusu, grazie alla presenza delle diverse superfici terrazzate, è stato possibile riconoscere tre distinte superfici di scorrimento all'interno del corpo di frana, oltre, ovviamente, alla superficie principale alla base del corpo stesso. Quest'ultima essendo la più profonda è stata quella che ha mobilizzato il maggior volume di materiale. Inoltre, è stato individuato in campagna, anche se molto disturbato, il limite fra gli gneiss ed i depositi di terrazzo marino all'interno del corpo di frana, che viene riportato, pertanto, nella sezione geologica cinematica della frana. Si tratta in ogni caso di un dato piuttosto incerto.

Dall'andamento del profilo topografico all'altezza delle superfici di taglio, si è notata la presenza di piccole scarpate che hanno consentito di fare una stima grossolana dei rigetti operati dalle rispettive superfici, che hanno permesso di ricostruire la morfologia precedente all'attivazione di ciascuna di esse. A partire da queste informazioni, è stata eseguita la retrodeformazione dell'intero corpo di frana, fino ad ottenere il modello geologico mostrato nella terza versione della sezione L-L'. A partire da questo modello, è stata tracciata un'ipotesi di morfologia pre-frana, che è stata completata con la proiezione delle faglie e dei sistemi di discontinuità che delimitano le fasce cataclastiche e che di fatto rappresenta il modello geologico del versante prima dell'innescò della frana (quarta versione della sezione L-L' nell'Allegato 2.1).

2.4.3 La frana Santa Trada

Terza ed ultima frana oggetto di studio della presente tesi è quella riattivata il 30 gennaio 2009 sul versante in sinistra idrografica del torrente Santa Trada all'altezza dell'attuale sede autostradale. Per questo motivo, ed anche perché questo tratto autostradale è tuttora oggetto dei lavori di ammodernamento, la riattivazione di questo movimento franoso ha determinato una situazione di allarme con una temporanea chiusura al traffico dell'autostrada nei giorni immediatamente successivi all'evento. A seguito di un'attività di monitoraggio interferometrico terrestre gestito dalla protezione civile (Del Ventisette et alii, 2010) e ai successivi sopralluoghi che hanno messo in evidenza come l'attività della frana non determinasse una situazione di rischio per la sede autostradale, la stessa è stata successivamente riaperta al traffico.

Come già accennato, l'evento del 30 gennaio 2009 ha rappresentato comunque "solo" una riattivazione di un fenomeno gravitativo già in atto. Che questa frana esistesse da tempo lo dimostrano le foto aeree scattate nel 1943 sia dalla RAF (*Royal Air Force*) che dall'Aeronautica Militare, che sono state appositamente acquistate presso l'Aerofototeca Nazionale (ICCD - Istituto Centrale per il Catalogo e la Documentazione del Ministero dei Beni e delle Attività Culturali), mostrate in Fig. 2.32. Nonostante si tratti di foto a bassa risoluzione e scattate da quote elevate

(quindi anche scala nominale bassa), è possibile distinguere, in entrambe, due distinte scarpate di frana analoghe a quelle rilevabili ad oggi in sito. Questa riattivazione del movimento franoso si è verificato a seguito di piogge autunnali eccezionali e ha coinvolto una cava la cui attività è documentata da immagini aeree relative agli ultimi 10 anni. E' inevitabile sottolineare, anche se ciò in parte esula dal tema di questo lavoro, come l'apertura di un'attività di cava alla base di un versante già interessato da movimenti gravitativi dimostri una grave approssimazione in senso geologico nonché una fonte di elevato rischio. La disponibilità di diverse foto aeree relative all'attività di cava degli ultimi 10 anni, unita alla presenza di numerosi elementi geologici e geomorfologici rilevabili in sito, hanno consentito, come vedremo, di definire un dettagliato modello evolutivo del versante.

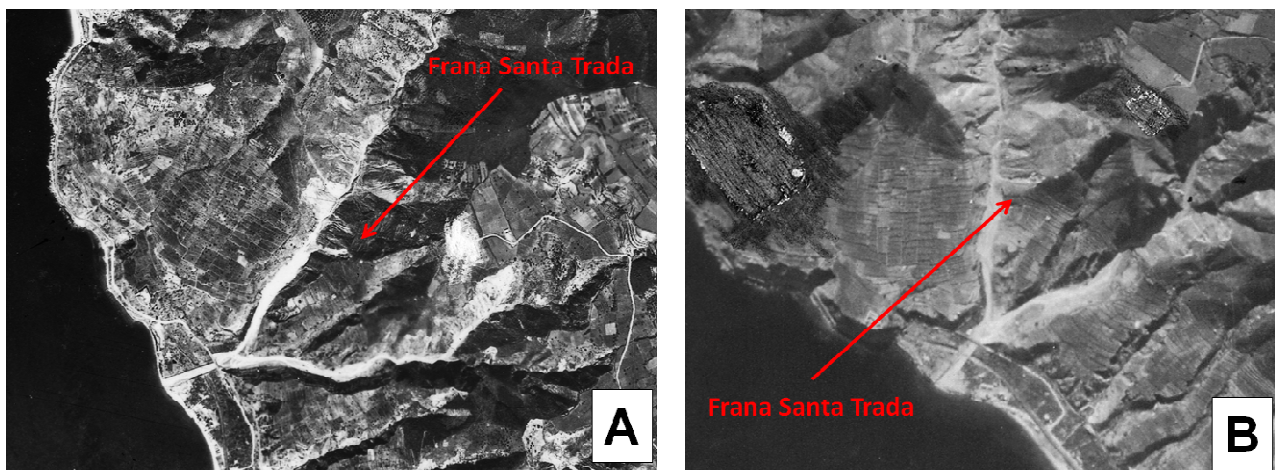


Fig. 2.32 – (A) Foto aerea dell'Aeronautica Militare (COD: AM 1943_254_2_110_57542_0). (B) Foto aerea della RAF (COD: RAF 1943_254_2_5017_185967_0).

Con riferimento all'intera area rilevata nel presente lavoro di dottorato, l'area della frana Santa Trada si trova nel settore più meridionale, nel territorio comunale di Villa San Giovanni. Anche rispetto al complesso dell'*horst* di Campo Piale ci troviamo nei pressi del suo margine più meridionale, e anche topograficamente abbiamo rilievi meno elevati. In ogni caso, anche quest'area è caratterizzata dalla presenza preponderante dei termini del basamento metamorfico (gneiss), mentre ancora più a sud compaiono i termini del plutone granitico di Villa. Nell'Allegato 2.3 viene riportata la cartografia di estremo dettaglio che è stata prodotta per tale area (scala 1:1.000) e le relative sezioni geologiche, tra cui quella cinematica sulla quale sono state effettuate tutte le analisi di stabilità che in seguito verranno discusse. La cartografia geologica mette in evidenza la presenza di due importanti lineamenti tettonici. Il primo, avente direzione circa SW – NE ed immergente verso mare, altro non è se non un tratto della faglia di Scilla così come proposto da Ferranti et alii (2008) (cfr. Paragrafo 2.2.3 e Fig. 2.17). Essa, come già discusso, borda verso monte i depositi di terrazzo marino appartenenti al X ordine (Miyauchi et alii, 1994), che si attestano tra i 75 e i 110 m

di quota. In corrispondenza di tale elemento tettonico corre l'attuale autostrada Salerno-Reggio Calabria. Nello stesso settore sono presenti, procedendo verso l'attuale linea di costa altri due ordini di terrazzo (XI e XII) che presentano comunque una minore continuità. In questo specifico settore la faglia di Scilla corrisponde, inoltre, alla scarpata morfologica che raccorda i depositi marini del X ordine con quelli del VII, ubicati ad una quota di circa 320 m s.l.m., ai quali è stata attribuita un'età di circa 300.000 anni (Miyachi et alii, 1994). Il secondo elemento tettonico è correlabile proprio con la presenza del fosso Santa Trada, avente direzione NW –SE. Questo elemento è correlabile con la faglia Matiniti individuata da Ghisetti (1981) (cfr. Fig. 2.5). In linea più generale notiamo anche in questo settore la presenza di due distinti sistemi tettonici, uno parallelo e l'altro perpendicolare alla linea di costa.

La frana Santa Trada si imposta interamente sul basamento metamorfico costituito dagli gneiss, che, come ormai abbiamo visto in tutte le situazioni finora descritte, non si presentano al loro interno omogenei, ma sono caratterizzati da notevoli variazioni, in particolare del grado di alterazione e di fratturazione, che ne influenzano in maniera determinante il comportamento. In questo caso si può notare che nella cartografia geologica non è presente alcuna fascia cataclastica, e questo non certo perché gli ammassi rocciosi si presentino sempre poco fratturati, ma perché nel rilevamento di campagna non ne è stata individuata alcuna in maniera chiara. La presenza di fasce a più intensa fratturazione è stata comunque individuata a seguito dell'analisi areale dei dati geomeccanici, come si vedrà in seguito. Il processo di analisi statistica di tali dati e il loro successivo *contouring* spaziale, uniti ai dati giacitureali delle principali discontinuità individuate in campagna, e all'assetto strutturale più a grande scala, ha quindi consentito di definire il modello geologico-tecnico del versante, analogamente a quanto fatto nei precedenti casi. E' necessario evidenziare quindi che il processo di definizione dei diversi modelli geologico-tecnici proposti, pur seguendo criteri stabiliti ed analoghi, può presentare diverse sfaccettature in funzione del singolo caso da affrontare. Infatti, a mio parere, anche alla luce dei differenti casi di studio affrontati in questi anni (anche al di fuori della presente tesi di dottorato, il nodo fondamentale in questo tipo di analisi è la ricerca della corrispondenza, qualora esista, tra i dati geologici, prettamente qualitativi, e quelli geomeccanici, che, come spiegato nel primo capitolo, si è cercato di rendere essenzialmente quantitativi.

La corona della frana si assesta ad una quota compresa tra i 190 m e i 195 m s.l.m. con una scarpata che raggiunge massimo i 2 m di altezza. La sua estensione è di 112 m (Fig. 2.33). L'accumulo ai piedi del versante è costituito da materiale incoerente a clasti spigolosi (Fig. 2.34).

Sul fianco sinistro della frana e sul suo fianco destro, in corrispondenza di un piccolo ripiano che è stato appurato non essere legato alla frana, ma che ha origini marine, si rinvengono una serie di

trincee, sia a direzione longitudinale che trasversale rispetto al corpo di frana. Lateralmente al movimento principale sono stati cartografati modeste instabilità superficiali, il cui coronamento si imposta sui depositi terrazzati del Pleistocene (Allegato 2.3), coinvolgendo comunque anche il substrato.



Fig. 2.33 – La frana Santa Trada vista dal versante opposto. Il corpo di frana non intercetta la sede autostradale, ma termina nel sottostante fosso omonimo (Fig. 2.34).

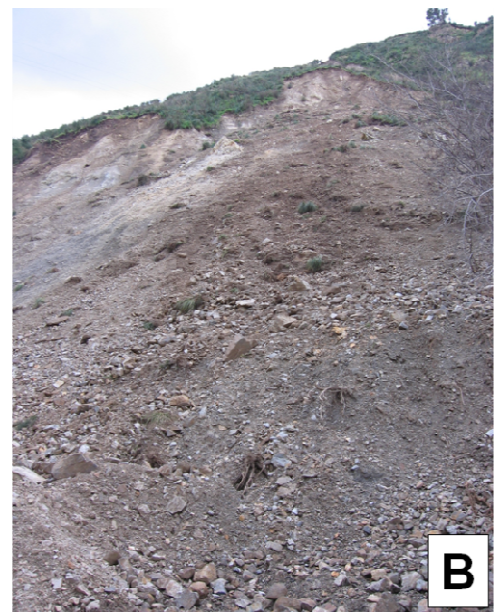


Fig. 2.34 – (A e B) Accumulo di frana fotografato nei giorni immediatamente successivi all'evento del 30 gennaio 2009. Il materiale è costituito prevalentemente di clasti spigolosi ed eterometrici.

Il meccanismo di frana può essere classificato come uno scorrimento traslativo in roccia (Cruden & Varnes, 1996). Come detto, la storia evolutiva di questa frana ha inizio ben prima del 30 gennaio

2009, ed essa può essere messa in relazione con le diverse fasi evolutive del sottostante fosso Santa Trada. Le evidenze geologiche e geomorfologiche raccolte in campagna ci hanno consentito di definire un quadro evolutivo dello stesso piuttosto dettagliato.

Il fosso si imposta a partire dal VII ordine di terrazzo, ad una quota che, in questo settore, raggiunge i 350 m s.l.m., datato a circa 300 ka (Miyachi et alii, 1994). La prima incisione dei versanti risale quindi ad un periodo successivo a questa data e perdura fino a circa 105 ka, in corrispondenza dei depositi dell'ultimo interglaciale (trasgressione eutirreniana) che corrispondono al X ordine di terrazzo marino, posto ad una quota di 120 m s.l.m..

Da tenere in considerazione che tra il VII e X ordine di terrazzo, in aree adiacenti, si sarebbero formati altri 3 ordini terrazzati che, però, o perché obliterati dall'incisione valliva o perché non formati, non sono visibili nella località Santa Trada.

Una seconda fase erosiva si ha tra i 105 e gli 84 ka, nel periodo intercorso tra la deposizione del terrazzo marino di quota 120 m e quello di quota 90 m s.l.m.. La terza fase erosiva di fatto è quella attuale, che ha avuto inizio dopo la deposizione del terrazzo marino di quota 90 m.

Il modello geologico-evolutivo di cui si è tenuto conto durante la simulazione numerica, di seguito descritta, rispecchia totalmente questa sequenza di fasi erosive (*step*) ed ha permesso di simulare il processo di *creep* (ovvero tempo-dipendente), che ha interessato il versante, scandito attraverso gli intervalli di tempo associati all'erosione dei successivi terrazzi marini.

A questo modello geologico-evolutivo si è sovrainposta, negli ultimi 10 anni, l'attività di cava che, come si è detto, ha interessato l'area di piede della frana Santa Trada. Fino al novembre del 2001 non era presente alcuna attività di cava, come dimostra l'immagine in Fig. 2.35.



Fig. 2.35 – Il fosso Santa Trada in corrispondenza dell'Autostrada Salerno-Reggio Calabria in un'immagine aerea del novembre 2001. Non si nota alcuna attività di cava (da Google Earth).

Sono state recuperate ben altre quattro foto aeree dell'area, scattate tra il 2001 ed il 2008:

- volo Reggio Calabria – P.S.M. Villa Margherita (4093) – 8 agosto 2001;
- immagine satellitare da Google Earth – 19 luglio 2002;
- volo a bassa quota per l'Autostrada A3 Salerno-Reggio Calabria (7678) – 13 marzo 2005;
- volo a bassa quota per l'Autostrada A3 Salerno-Reggio Calabria – 20 luglio 2008.

La Fig. 2.36 mostra le immagini aeree del 2002, del 2005 e del 2008 con i relativi limiti della cava.

Queste immagini sono state riportate sulla cartografia in scala 1:1.000. Ciò ha consentito di riportare anche i limiti delle fasi di avanzamento della cava. Non essendo disponibile né una base topografica antecedente al 2005 né una post-frana, tutte le analisi morfometriche sono state realizzate sulla base topografica disponibile (Allegato 2.3). E' stato quindi necessario ricostruire il profilo pre-scavo del versante tramite un processo di "lisciaggio" delle isoipse, eseguito tramite il *software Autocad Map* (come fatto anche per la frana del Monte Paci). La sezione cinematica E-E' dell'Allegato 2.3 mostra sia il profilo pre-scavo, sia i profili delle varie fasi dell'attività di cava che è stato possibile ricostruire. In questo modo è stato altresì possibile calcolare i volumi totali asportati ad ogni *step* di ripresa fotografica. Il grafico di Fig. 2.37 mostra l'andamento nel tempo dei volumi asportati durante le attività di scavo. E' possibile notare come, su un volume totale asportato di circa 55.000 m³, più del 90% sia stato asportato tra marzo 2005 e luglio 2008, con un notevole incremento della produzione.

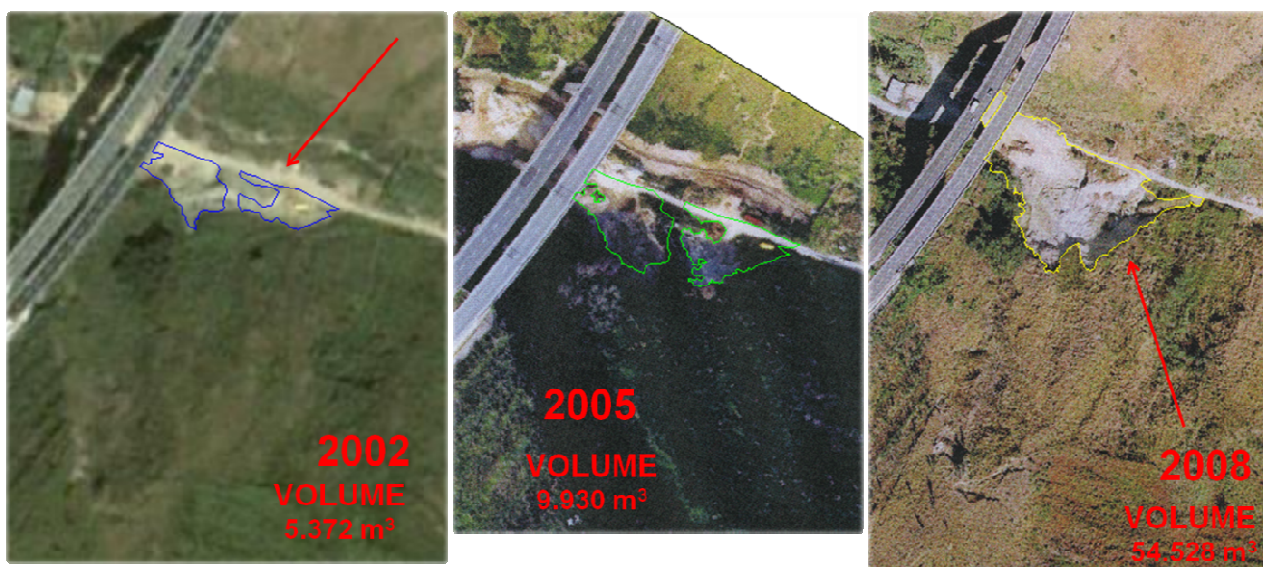


Fig. 2.36 – La frana Santa Trada nelle foto aeree del luglio 2002, del marzo 2005 e del luglio 2008. Vengono riportati i limiti planimetrici dei tre step ed il relativo volume asportato durante l'attività di scavo.

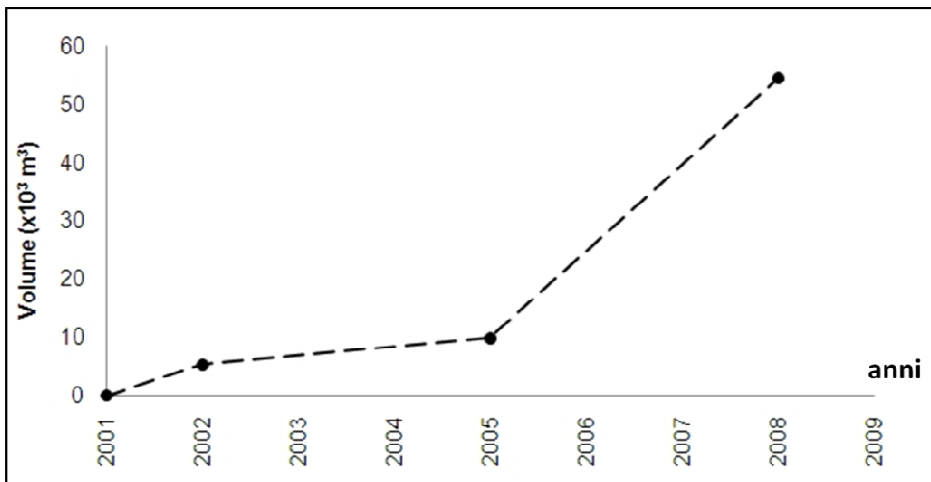


Fig. 2.37 – Volume asportato durante l'attività di scavo nei tre step considerati.

Il modello evolutivo della frana Santa Trada ha inizio quindi con il processo di deformazione tempo-dipendente e dovuto alla gravità, che è strettamente connesso con il comportamento visco-plastico degli ammassi rocciosi intensamente fratturati. Questo processo si è sviluppato a partire da 300.000 anni fa in funzione dell'evoluzione morfologica del fosso Santa Trada e del versante in questione, attraverso gli *step* precedentemente descritti. A questo processo si è sovrainposta l'attività antropica (cava) che, modificandone il tasso deformativo, ha portato il versante in una situazione di “*creep* terziario”. In ultimo, va tenuto in considerazione il fatto che nei mesi immediatamente antecedenti il gennaio 2009 (da settembre a dicembre 2008) l'area è stata soggetta ad intensi e ripetuti fenomeni piovosi come testimoniano i dati di pioggia cumulata reperibili sul sito dell'Arpacal (http://www.cfcalabria.it/DatiVari/midmar/banca_dati.php). Queste piogge rappresentano quindi la causa dell'innesco della frana del 30 gennaio 2009.

3. CARATTERIZZAZIONE FISICA E MECCANICA DELLA MATRICE ROCCIOSA

Gli ammassi rocciosi sono, di fatto, dei materiali costituiti dalla matrice rocciosa (roccia intatta) la cui continuità fisica è interrotta dalla presenza di discontinuità aventi specifiche caratteristiche fisico-meccaniche e geometriche. Questa definizione ci indica che, per definire le caratteristiche fisiche e meccaniche degli ammassi rocciosi, è necessario fondere le proprietà della matrice con quelle relative allo stato di fratturazione dell'ammasso.

Nel capitolo introduttivo della presente tesi è stato evidenziato come la determinazione delle proprietà della matrice rocciosa risulti, sia concettualmente che operativamente, più immediata e meno complessa rispetto a quella della fratturazione. Infatti, la determinazione delle proprietà della roccia intatta avviene tramite le prove di laboratorio effettuate su campioni che si ritengono rappresentativi rispetto all'intero ammasso.

La rappresentatività dei campioni in ammassi rocciosi come gli gneiss, che abbiamo visto caratterizzare gran parte del territorio rilevato, è un problema di non immediata risoluzione, principalmente a causa dell'elevata variabilità sia mineralogica che petrografica che queste formazioni presentano al loro interno. A ciò si deve aggiungere l'anisotropia di alcuni campioni di roccia dovuta alla foliazione che spesso è possibile riscontrare in alcuni settori degli affioramenti degli gneiss. Queste problematiche rendono decisiva la scelta dei campioni di roccia da sottoporre ai *test* di laboratorio, in quanto i risultati di tali prove, come vedremo, influiranno notevolmente sui parametri di resistenza e deformabilità degli ammassi.

Affinché i campioni possano definirsi rappresentativi della roccia intatta devono presentarsi, inoltre, quanto meno possibile alterati e quanto più possibile distanti dai piani di discontinuità. Per tale motivo si è deciso di sottoporre ai test di laboratorio delle carote di sondaggio estratte da profondità comprese tra i 60 e i 75 m dal p.c.. Questi sondaggi sono stati realizzati nell'ambito dei lavori di ammodernamento dell'Autostrada Salerno-Reggio Calabria. La loro ubicazione è in località San Giovanni, nel territorio comunale di Bagnara Calabria, all'interno del territorio rilevato. Gli spezzoni di roccia ricavati dai sondaggi geognostici sono stati a loro volta ricarotati con un diametro inferiore, per ottenere dei campioni aventi dimensioni *standard* per le prove di laboratorio.

3.1 LE PROVE DI LABORATORIO

Le prove di laboratorio sui campioni di roccia intatta sono state eseguite presso il Laboratorio Geotecnico della Provincia Autonoma di Trento, e sono consistite in:

- caratterizzazione fisica;
- prove di compressione uniassiale (UCS);
- prove di trazione indiretta (*Brazilian test*);
- prove ultrasoniche;
- prove di compressione triassiale.

3.1.1 Caratterizzazione fisica

Le prove sono state eseguite secondo la normativa di riferimento I.S.R.M. (1979) per determinare la porosità (n) e il peso totale per unità di volume ($\gamma_n = P_{tot}/V_{tot}$) con il metodo della saturazione del calibro. Le prove sono state condotte su quattro campioni di gneiss e in Tab. 3.1 vengono riportati tutti i dati relativi alle singole misure. In Tab. 3.2 vengono invece riportati i valori medi dei quattro provini che sono stati quindi assunti come rappresentativi degli gneiss.

<i>Determinazione di porosità e peso per unità di volume naturale</i>						
Numero provino			4	5	6	7
Volume totale del provino	V	cm ³	315,24	316,86	324,72	318,58
Massa satura	M _{sat}	g	842,57	857,70	876,23	865,64
Massa dei grani	M _s	g	840,46	856,67	874,98	864,14
Densità dell'acqua	γ_w	g/cm ³	0,99	0,99	0,99	0,99
Volume solido	V _s	cm ³	313,11	315,82	323,45	317,06
Volume dei vuoti	V _v	cm ³	2,13	1,04	1,26	1,52
Porosità	n		0,68%	0,33%	0,39%	0,48%
Peso per unità di volume naturale	γ_n	g/cm ³	2,67	2,70	2,70	2,71

Tab. 3.1 – Dati relativi alle singole determinazioni di densità e peso per unità di volume naturale per i campioni analizzati.

<i>Valori di porosità e peso per unità di volume naturale degli gneiss</i>			
Porosità	n		0,47%
Peso unità di volume naturale	γ_n	g/cm ³	2,69

Tab. 3.2 – Valori medi di porosità e peso per unità di volume naturale dei campioni analizzati.

3.1.2 Prove di compressione uniassiale (UCS)

Anche queste prove sono state eseguite secondo la normativa I.S.R.M. (1979). Le tre prove sono state realizzate su cilindri di gneiss cui è stata applicata gradualmente (rampa di carico 200 kPa/s) una forza assiale fino a portare il provino a rottura. Le deformazioni assiali che si sono prodotte sul provino sono state misurate mediante bande estensimetriche (Fig. 3.1). Nella Tab. 3.3 vengono riportate le caratteristiche fisiche dei tre provini e i rispettivi valori di forza e pressione di rottura. Questo tipo di prova ha consentito di determinare la resistenza a compressione semplice (σ_c a confinamento nullo) della matrice rocciosa, nonché le sue componenti elastiche tramite l'analisi delle curve sforzo-deformazione (Fig. 3.2). In particolare sono stati determinati il modulo di deformabilità iniziale E_i , quello tangenziale relativo al comportamento elastico E_t (modulo di Young) e il modulo secante E_s relativo al comportamento elasto-plastico (Tab. 3.4).

Il modulo iniziale E_i e tangenziale E_t sono stati ricavati considerando rispettivamente il 30 e il 50% di deformazione assiale, come previsto dalle normative di riferimento. Il modulo secante E_s , relativo al comportamento elasto-plastico, è stato determinato considerando il tratto tra la fine del comportamento elastico e il punto di rottura (Fig. 3.3). Dai campi di deformazione competenti ai diversi moduli misurati è stata valutata l'ampiezza del campo elastico e di quello plastico, espressa in percentuale sulla deformazione totale misurata fino a rottura.

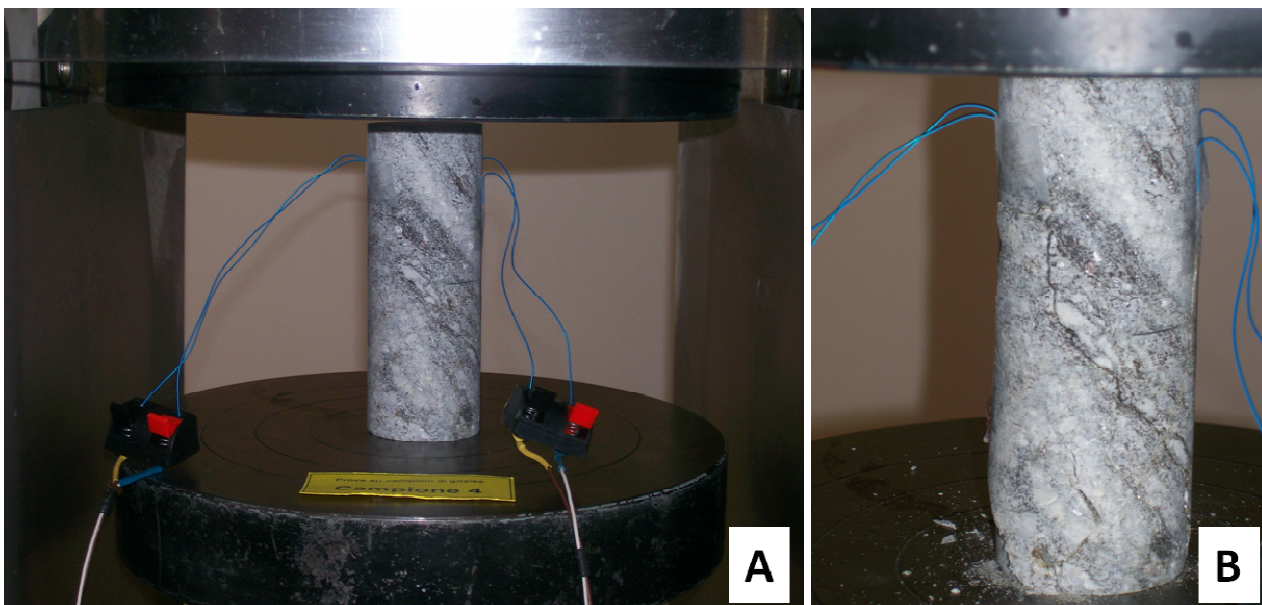


Fig. 3.1 – (A) Provino di gneiss sottoposto a prova UCS. I fili blu sono i cavi elettrici collegati alle bande estensimetriche utilizzate per la misura delle deformazioni. Nelle prove UCS sono state montate due bande estensimetriche, entrambe longitudinali al provino. (B) Lo stesso provino dopo la rottura.

N° camp.	Diametro (cm)	Sezione (cm ²)	Altezza (cm)	H/D	Massa (g)	γ (kN/m ³)	Rampa di carico (kPa/s)	Forza di rottura (kN)	Pressione di rottura (MPa)
4	5,29	21,98	14,34	2,71	841,25	26,2	200	115,1	52,3
5	5,28	21,86	14,49	2,75	857,02	26,5	200	282,7	129,3
6	5,32	22,22	14,62	2,75	875,24	26,4	200	227,2	102,3
MEDIA	5,30	22,02	14,48	2,74	857,84	26,4	200	208,3	94,6

Tab. 3.3 – Caratteristiche fisiche dei provini sottoposti a prova UCS e relativi valori di forza e pressione di rottura.

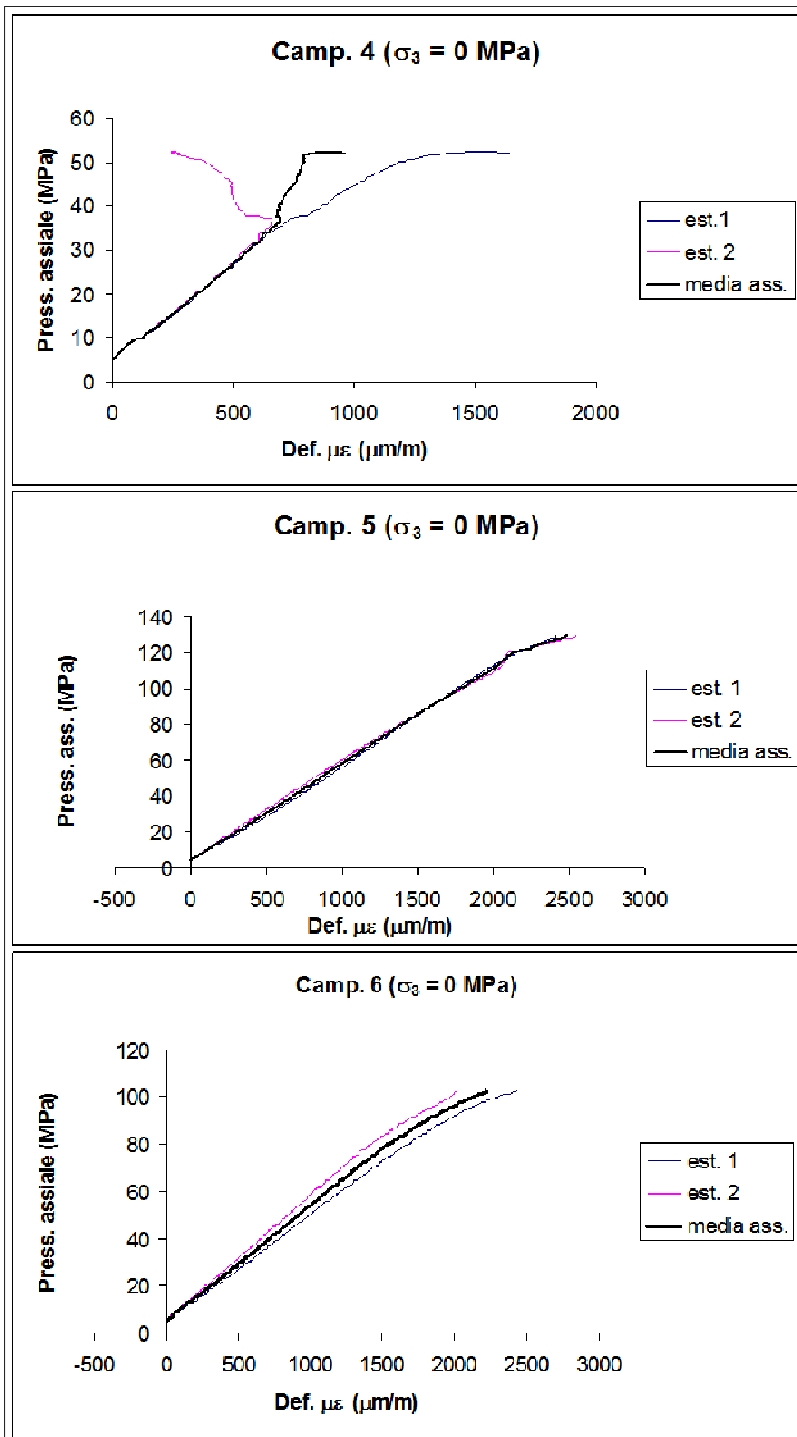


Fig. 3.2 – Grafici sforzo-deformazione per i provini di gneiss analizzati. In blu e magenta le curve relative alle deformazioni assiali misurate tramite le due bande estensimetriche montate sui provini, in nero i valori di deformazione assiale media.

CAMPIONE 4			ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_2 ($\mu\text{m/m}$)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	E (GPa)	% campo elastico	
UCS ($\sigma_3 = 0$ MPa)			E_i	300	0	18	5		43
def. Tot. ($\mu\epsilon$)	def. 30 % ($\mu\epsilon$)	def. 50 % ($\mu\epsilon$)	E_e	600	400	32	22		50
1515	455	758	E_{sec}	1515	800	52	38		20
CAMPIONE 5			ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_2 ($\mu\text{m/m}$)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	E (GPa)	% campo elastico	
UCS ($\sigma_3 = 0$ MPa)			E_i	400	0	25	5		50
def. Tot. ($\mu\epsilon$)	def. 30 % ($\mu\epsilon$)	def. 50 % ($\mu\epsilon$)	E_e	1700	700	96	42		54
2480	744	1240	E_{sec}	2480	2000	129	111		38
CAMPIONE 6			ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_2 ($\mu\text{m/m}$)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	E (GPa)	% campo elastico	
UCS ($\sigma_3 = 0$ MPa)			E_i	600	0	34	5		48
def. Tot. ($\mu\epsilon$)	def. 30 % ($\mu\epsilon$)	def. 50 % ($\mu\epsilon$)	E_e	1200	600	64	34		50
2214	664	1107	E_{sec}	2214	1500	102	78		34
MEDIA UCS ($\sigma_3 = 0$ MPa)			ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_2 ($\mu\text{m/m}$)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	E (GPa)	% campo elastico	
UCS ($\sigma_3 = 0$ MPa)			E_i	433	0	26	5		47
def. Tot. ($\mu\epsilon$)	def. 30 % ($\mu\epsilon$)	def. 50 % ($\mu\epsilon$)	E_e	1167	567	64	33		51
2070	621	1035	E_{sec}	2070	1433	94	76		30

Tab. 3.4 – Determinazione dei moduli di deformabilità E_i , E_e ed E_{sec} per i tre provini e relativi campi di comportamento elastico in percentuale sulla deformazione totale misurata a rottura. L'ultima tabella si riferisce ai valori medi dei moduli e del campo elastico.

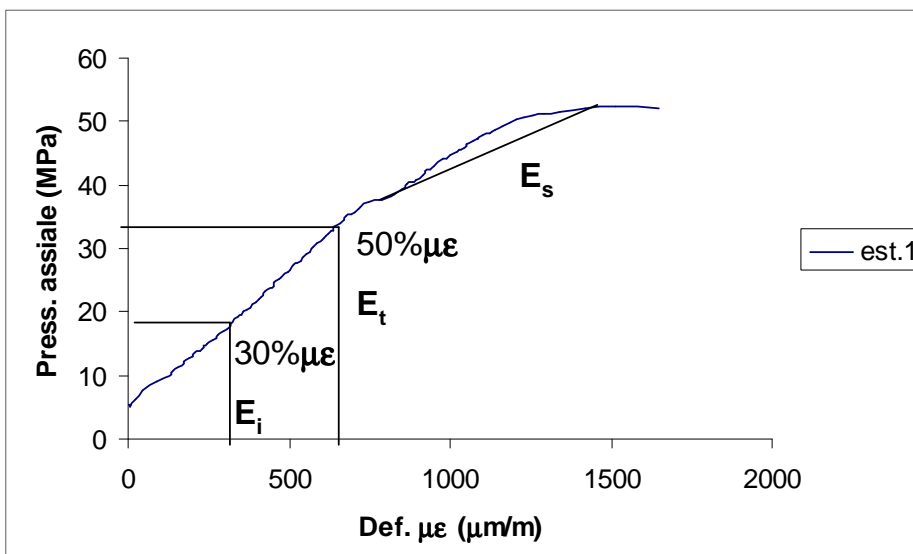


Fig. 3.3 – Rappresentazione esemplificativa di come sono stati determinati i valori per il calcolo dei differenti moduli di deformabilità riportati in Tab. 3.4.

I valori di resistenza a compressione uniassiale e dei moduli di deformabilità così determinati sono rappresentativi della matrice rocciosa degli gneiss nelle condizioni di confinamento laterale nullo ($\sigma_3=0$). Queste condizioni si riferiscono, dunque, alla roccia intatta in affioramento, o comunque nei primissimi metri al sotto del piano campagna. Come vedremo, le prove di compressione triassiale ci consentiranno di determinare gli stessi parametri per differenti, e superiori, pressioni di confinamento.

3.1.3 Prove di trazione indiretta (*brazilian test*)

Le difficoltà tecniche nell'esecuzione di prove di trazione diretta (spesso per afferrare i campioni si creano sollecitazioni locali da momenti flettenti che rendono non significativa la prova), hanno portato allo sviluppo di prove indirette per la determinazione della resistenza a trazione. La più comune tra queste è la cosiddetta prova "brasiliana", che consiste nell'applicare una compressione diametrale tra le piastre di una macchina di prova di compressione ad un provino cilindrico di spessore (t) in genere uguale al raggio. Nell'ipotesi di mezzo elastico, lo stato di sollecitazione piano in corrispondenza del diametro su cui viene applicato il carico (Fig. 3.4A) è caratterizzato da una sollecitazione orizzontale costante e pari a

$$\sigma_t = \frac{0,636 P}{Dt}$$

e da una sollecitazione verticale di compressione pari a tre volte quella orizzontale nella zona centrale del provino e che tende ad infinito in corrispondenza del punto di applicazione del carico. La letteratura scientifica (Jaeger & Cook, 1976; Wang & Xing, 1999; Wang & Wu, 2004; Mates et alii, 2007) ha messo in evidenza come, per ridurre lo sforzo di compressione in prossimità dei contatti, si possa eseguire la prova caricando il provino su un arco di circonferenza o su provini appiattiti (Fig. 3.4B); tale condizione di carico non influenza, infatti, il raggiungimento della rottura per trazione nella zona centrale del provino (Jaeger & Cook, 1976) (Fig. 3.4C).

Sulla base del criterio di rottura piano di Griffith (1924), questa condizione di sforzo ($\sigma_1 + 3 \sigma_3 = 0$) corrisponde proprio alla transizione da una rottura per trazione, per un valore dello sforzo minimo uguale alla resistenza a trazione uniassiale, a quella per taglio. Si può ritenere, quindi, che la rottura avvenga per superamento della resistenza a trazione uniassiale a partire dalla zona centrale del provino con piano di rottura perpendicolare alla direzione della sollecitazione di trazione.

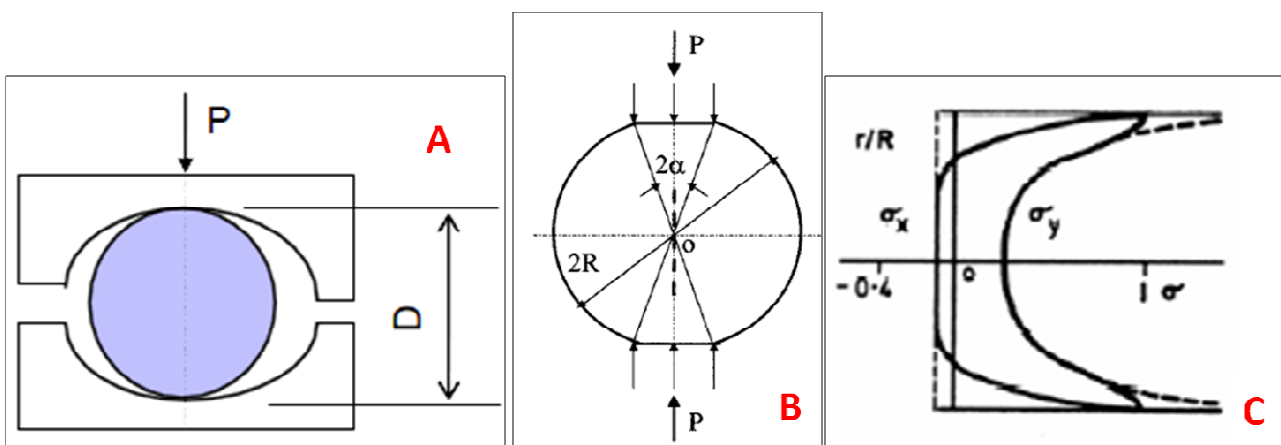


Fig. 3.4 – Condizioni di carico in un provino sottoposto a prova di trazione indiretta: (A) carico puntuale; (B) carico distribuito su un provino appiattito. (C) Andamento degli sforzi orizzontale (σ_x) e verticale (σ_y) nella sezione diametrale parallela al carico (linea tratteggiata nel caso A, continua nel caso B).

Nelle prove eseguite presso il Laboratorio Geotecnico della Provincia Autonoma di Trento è stata seguita la normativa I.S.R.M. (1978). Nella Tab. 3.5 vengono riportati tutti i parametri fisici dei dieci provini sottoposti a prova di trazione, la velocità di carico, lo sforzo a rottura e la resistenza a trazione (σ_t). Quest'ultima è pari, in media, a 12,6 MPa.

ID campione	diametro (D) (mm)	spessore (t) (mm)	massa provino (g)	peso unità volume (kN/m ³)	velocità di rottura (N/s)	carico di rottura (P) (kN)	resistenza a trazione (σ_t) (MPa)
BR4	52,86	24,53	145,94	26,59	200	28,2	13,8
BR5	52,54	25,56	151,25	26,77	200	26,3	12,5
BR6A	52,98	27,39	163,64	26,58	200	28,0	12,3
BR6B	52,78	25,21	149,65	26,61	200	25,4	12,1
BR7	52,66	26,87	156,39	26,21	200	28,9	12,9
BR8A	52,64	25,58	153,48	27,04	200	30,9	14,6
BR8B	52,79	25,24	153,16	27,19	200	27,0	12,9
BR9	52,48	26,34	154,89	26,66	200	25,1	11,5
BR12	52,70	25,70	150,32	26,30	200	21,9	10,3
BR15	53,52	27,19	165,60	26,76	200	29,7	13,0
MEDIA	52,80	25,96	154,43	26,67	200	27,1	12,6

Tab. 3.5 – Sintesi dei dati relativi alle prove di trazione indiretta (brazilian test), secondo normativa I.S.R.M. (1978).

Al fine di poter confrontare i risultati delle prove UCS con quelli delle prove brasiliane, trattandosi in entrambi i casi di prove rapide e distruttive, sono state eseguite due ulteriori prove di trazione indiretta utilizzando provini con differenti caratteristiche geometriche, quindi diversamente da come prescrive la norma I.S.R.M.. Non avendo a disposizione provini aventi dimensioni analoghe a quelli delle prove UCS, non è stato possibile confrontare direttamente i risultati. Per ovviare a ciò si è deciso di far variare lo spessore (t) dei provini (Tab. 3.6) in modo da poter ricavare una correlazione tra esso e il valore di resistenza a trazione, ed ottenere il confronto con le prove UCS in maniera indiretta (Fig. 3.5).

ID campione	diametro (D) (mm)	spessore (t) (mm)	massa provino (g)	peso unità volume (kN/m ³)	velocità di rottura (N/s)	carico di rottura (P) (kN)	resistenza a trazione (σ_t) (MPa)
1	53,10	119,20	711,20	26,47	200	49,1	4,9
2	53,60	73,70	445,22	26,26	200	34,9	5,6

Tab. 3.5 – Sintesi dei dati relativi alle prove di trazione indiretta (brazilian test), eseguite con dimensioni dei provini non standard.

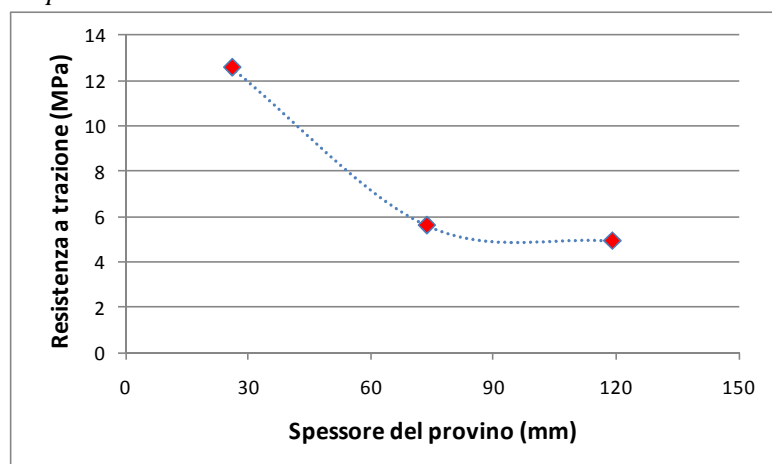


Fig. 3.5 – Grafico di correlazione tra le dimensioni del provino e la resistenza a trazione misurata in maniera indiretta.

Ovviamente la resistenza a trazione tende a diminuire all'aumentare delle dimensioni del provino. Il grafico di Fig. 3.5 evidenzia come ciò avvenga in maniera esponenziale. Poiché lo spessore dei provini sottoposti a prova UCS è di circa 145 mm, è stato stimato, utilizzando il grafico di Fig. 3.5, un valore di σ_t pari a 4,2 MPa per il confronto tra le diverse tipologie di prova. Questo dato verrà successivamente discusso nel paragrafo dedicato alla discussione generale dei dati di laboratorio.

3.1.4 Prove ultrasoniche

Sono state condotte 11 prove secondo la normativa di riferimento ASTM D 2845 – 90 (1990). È stata determinata la velocità delle onde elastiche di compressione (onde P) su provini cilindrici di roccia, a partire dalla misura del tempo di transito (Δt_p) di un'onda trasmessa e rilevata da trasduttori piezoelettrici, posizionati sulle due facce piane del provino stesso, secondo la relazione:

$$V_p = \frac{H}{\Delta t_p}$$

dove H è l'altezza del provino. La frequenza utilizzata è stata di 55 kHz.

Le prove di compressione triassiale, che vedremo nel successivo paragrafo, hanno consentito di determinare il coefficiente di Poisson ($\nu = 0,25$), per cui è stato possibile calcolare la velocità delle onde di taglio (V_s) attraverso la seguente equazione:

$$V_s = \sqrt{\frac{V_p^2}{(1-\nu)/(0,5-\nu)}}$$

Note V_p e V_s , è stato possibile calcolare i moduli elastici dinamici, e, in particolare, il modulo di Young (E_d), il modulo di taglio (G_d) e il modulo di compressibilità volumetrica (K_d) secondo le tre seguenti equazioni:

$$E_d = \gamma_n V_s^2 \left[\frac{(3V_p^2 - 4V_s^2)}{(V_p^2 - V_s^2)} \right]$$

$$G_d = \gamma_n V_s^2$$

$$K_d = \gamma_n \left(V_p^2 - \frac{4}{3} V_s^2 \right)$$

dove γ_n è il peso per unità di volume naturale.

In Tab. 3.6 vengono riportati tutti i parametri ricavati dalle prove di velocità ultrasonica.

Come detto, in diversi punti dell'area rilevata gli gneiss si presentavano fortemente foliati, quindi con una marcata anisotropia meccanica e conseguenti piani preferenziali di fratturazione. Al fine di valutare il grado di anisotropia di queste rocce, si è deciso di effettuare sia delle prove di velocità ultrasonica, sia delle prove di compressione triassiale su provini appositamente sagomati in modo da valutare le caratteristiche fisiche e meccaniche sia in direzione parallela che perpendicolare ai piani di foliazione individuati. La Fig. 3.6 mostra i due provini su cui sono state condotte le prove. I risultati di queste prove (Tab. 3.7) mostrano una maggiore velocità di propagazione delle onde P (e di conseguenza delle onde S) nel provino allungato secondo la direzione dei piani di foliazione (provino S6) (Fig. 3.6A), rispetto a quella del provino S9 in cui i piani di foliazione risultano perpendicolari alla lunghezza dello stesso. Il rapporto tra queste due velocità ci fornisce una stima del coefficiente di anisotropia della roccia che in questo caso risulta pari a 1,37.

ID campione	V_p (m/s)	Coeff. Poisson ν	V_s (m/s)	V_p/V_s	Modulo di Young (E_d) GPa	Modulo di taglio (G_d) GPa	Modulo volumetrico (K_d) GPa
1	4.691	0,12	3.080	1,52	57	26	25
4	4.687	0,25	2.706	1,73	49	20	33
5	4.946	0,25	2.855	1,73	55	22	37
6	4.938	0,25	2.851	1,73	55	22	36
7	4.792	0,27	2.680	1,79	49	19	36
8	4.718	0,25	2.724	1,73	50	20	33
9	4.773	0,23	2.830	1,69	53	22	33
10	4.860	0,40	1.950	2,49	29	10	50
12	4.717	0,27	2.650	1,78	48	19	35
14	4.911	0,16	3.120	1,57	61	26	30
15	5.504	0,31	2.900	1,90	59	23	51
Media	4.867	0,25	2.759	1,79	51	21	36

Tab. 3.6 – Sintesi dei dati relativi alle prove di velocità ultrasonica eseguite su provini di gneiss.

ID campione	V_p (m/s)	Coeff. Poisson ν	V_s (m/s)	V_p/V_s	Modulo di Young (E_d) GPa	Modulo di taglio (G_d) GPa	Modulo volumetrico (K_d) GPa	Coefficiente di anisotropia
S6	5.079	0,38	2.230	2,27	37	13	52	1,37
S9	3.695	0,21	2.250	1,64	33	14	19	

Tab. 3.7 – Sintesi dei dati relativi alle prove di velocità ultrasonica eseguite sui provini di gneiss fortemente foliati.

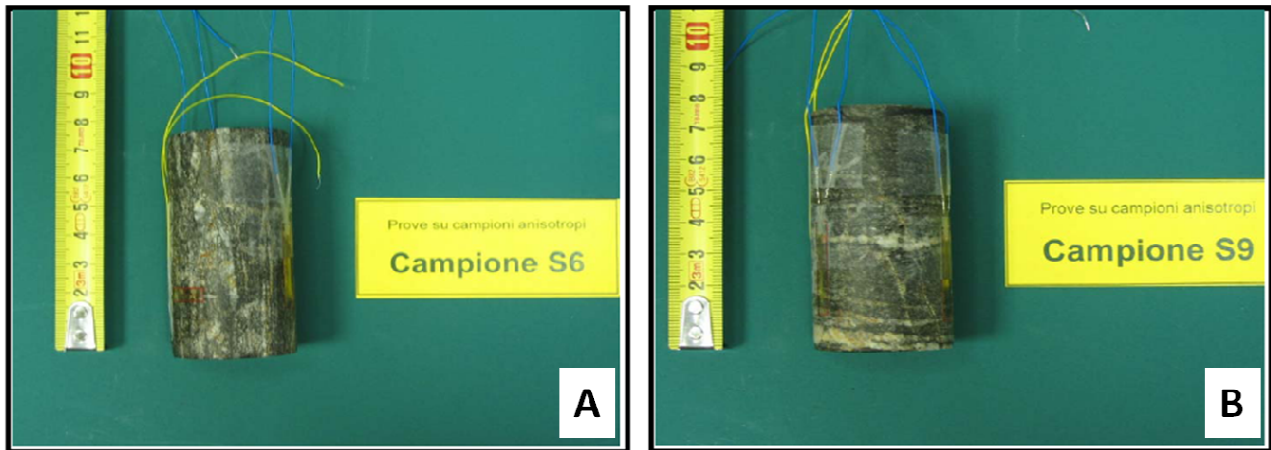


Fig. 3.6 – *Campioni di gneiss fortemente foliati su cui sono state condotte le prove di velocità ultrasonica e di compressione triassiale. (A) Sagomatura parallela alla direzione dei piani di foliazione; (B) sagomatura perpendicolare.*

3.1.5 Prove di compressione triassiale

Nella prova di compressione triassiale il provino è sottoposto a sforzi diversi da zero nelle tre direzioni: uno sforzo principale massimo lungo l'asse del provino ed uno sforzo assisimmetrico principale minimo nel piano normale a tale asse. La sollecitazione principale maggiore viene applicata dalla sola macchina di prova, mentre le due sollecitazioni principali minori derivano dalla pressione del fluido, isolato dal provino mediante una guaina impermeabile. La procedura di applicazione dei carichi prevede una prima fase di percorso di carico in condizioni isotrope, e una seconda fase in cui viene mantenuta costante la pressione di confinamento ed incrementata solamente la forza assiale fino al raggiungimento del carico di rottura.

Anche queste prove sono state condotte secondo la normativa di riferimento I.S.R.M. (1983). Oltre al carico di rottura, sono state misurate le deformazioni sia assiali che diametrali, mediante coppie di bande estensimetriche poste in entrambe le direzioni (Fig. 3.7).

Sono state eseguite complessivamente otto prove, due per ogni differente pressione di confinamento prescelta: la Tab. 3.8 illustra i dati di sintesi relativi alle otto prove eseguite. Come mostra la tabella, le pressioni di confinamento alle quali sono state eseguite le prove sono: 1, 5, 10 e 20 MPa. Queste pressioni corrispondono a differenti confinamenti cui la roccia è sottoposta in sito a diverse profondità, in funzione del carico litostatico. Questo può essere facilmente calcolato a partire dal peso per unità di volume naturale dei terreni costituenti le diverse formazioni in sito. Nel caso di gneiss affioranti, come spesso accade nel territorio rilevato, alle pressioni di confinamento precedentemente elencate, corrispondono, rispettivamente, le seguenti profondità: 57, 286, 566 e 1132 m. E' stato considerato un coefficiente di spinta (k) pari a 0,65. Le Figg. 3.8, 3.9, 3.10 e 3.11

mostrano, rispettivamente, i grafici sforzo-deformazione relativi alle prove condotte alle pressioni di confinamento di 1, 5, 10 e 20 MPa. Negli stessi grafici vengono riportate le medie delle deformazioni assiali e diametrali (sulle rispettive coppie di estensimetri), nonché la deformazione volumetrica calcolata secondo l'equazione

$$\Delta V = \Delta_{\text{assiale}} + 2\Delta_{\text{diametrale}}$$

dove Δ_{assiale} e $\Delta_{\text{diametrale}}$ sono le deformazioni lungo gli assi principali. Le Tabb. 3.9, 3.10, 3.11 e 3.12 riportano i moduli di deformabilità (iniziale, elastico e secante), calcolati secondo quanto già riportato per le prove UCS, sia delle singole prove, sia dei valori medi relativi alle diverse pressioni di confinamento. Viene riportata anche la percentuale di comportamento elastico sul totale della deformazione a rottura. Infine, la Tab. 3.13 sintetizza i valori dei moduli di deformabilità ricavati per le diverse pressioni di confinamento. Questi rappresentano i moduli della roccia intatta a differenti carichi litostatici in sito, quindi a diverse profondità dal piano campagna.

ID campione	Diametro provino (D) (cm)	Sezione (cm ²)	Altezza (H) (cm)	H/D	Massa (g)	γ_n (kN/m ³)	Rampa di carico (kPa/s)	Forza di rottura (kN)	Pressione di cella (σ_3) (MPa)	Pressione di rottura (σ_1) (MPa)	Coefficiente di Poisson (ν)
1	5,35	22,50	13,89	2,60	850,0	26,7	200	163,3	1,2	72,6	0,12
7	5,29	21,95	14,52	2,75	864,7	26,6	200	238,4	5,0	108,6	0,27
8	5,31	22,15	14,58	2,75	862,7	26,2	200	378,0	9,9	170,7	0,25
9	5,31	22,11	14,46	2,73	860,3	26,4	200	395,2	19,8	178,7	0,23
10	5,36	22,52	14,72	2,75	877,7	26,0	200	170,4	1,0	75,6	0,40
12	5,25	21,68	14,57	2,77	850,3	26,4	200	184,2	5,0	85,0	0,27
14	5,36	22,59	14,54	2,71	885,0	26,4	200	266,7	9,9	118,1	0,16
15	5,36	22,53	14,53	2,71	890,7	26,7	200	594,5	19,8	263,9	0,31

Tab. 3.8 – Dati di sintesi delle prove di compressione triassiale effettuate sui campioni di gneiss a differenti pressioni di confinamento.



Fig. 3.7 – Campione di gneiss sottoposto a prova triassiale su cui si nota la deformazione che ha coinvolto un estensimetro diametrale.

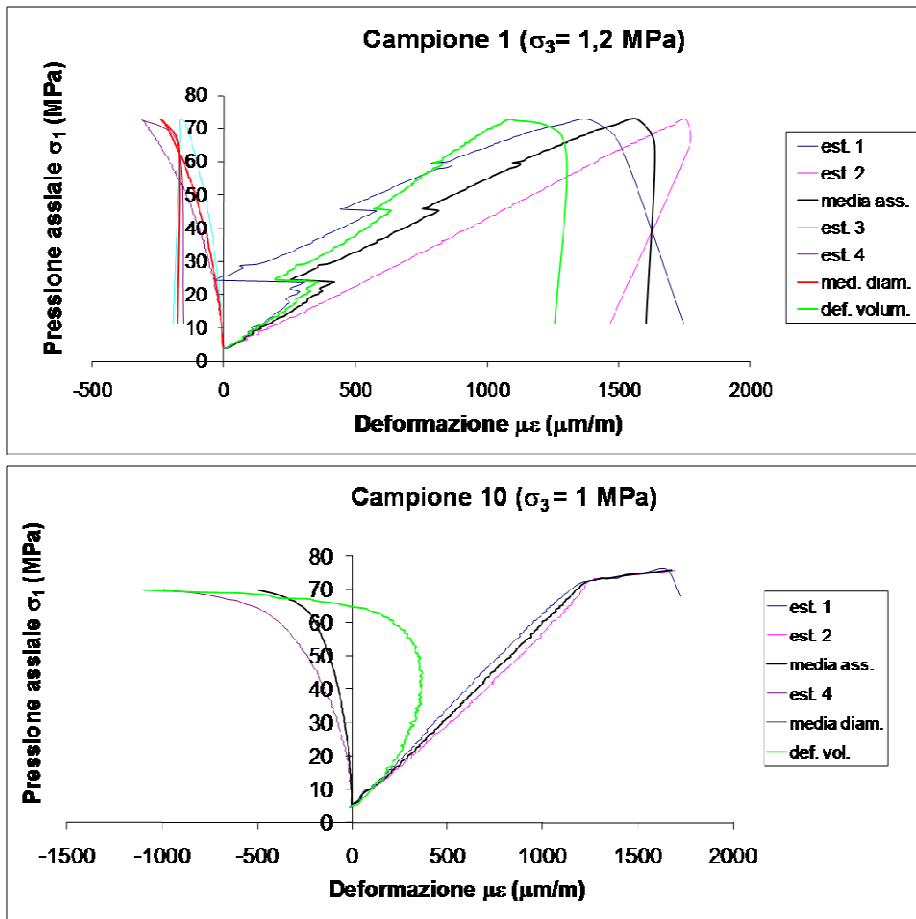


Fig. 3.8 – Grafici sforzo-deformazione dei due campioni di gneiss sottoposti a prova triassiale con pressione di confinamento di 1 MPa. Vengono riportate le deformazioni dei singoli estensimetri, le deformazioni medie assiali e diametrali e la deformazione volumetrica.

CAMPIONE 1			ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_2 ($\mu\text{m/m}$)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	E (GPa)	% campo elastico
Triassiale ($\sigma_3 = 1$ MPa)			E_i	400	100	23	8	
def. Tot. ($\mu\epsilon$)	def. 30 % ($\mu\epsilon$)	def. 50 % ($\mu\epsilon$)	E_e	800	500	45	33	40
1573	472	787	E_{sec}	1573	1300	73	66	24
CAMPIONE 10			ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_2 ($\mu\text{m/m}$)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	E (GPa)	% campo elastico
Triassiale ($\sigma_3 = 1$ MPa)			E_i	400	0	26	5	
def. Tot. ($\mu\epsilon$)	def. 30 % ($\mu\epsilon$)	def. 50 % ($\mu\epsilon$)	E_e	1000	500	60	32	57
1667	500	834	E_{sec}	1650	1150	76	68	15
CAMPIONI 1 e 10			ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_2 ($\mu\text{m/m}$)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	E (GPa)	% campo elastico
Triassiale ($\sigma_3 = 1$ MPa)			E_i	400	50	25	7	
def. Tot. ($\mu\epsilon$)	def. 30 % ($\mu\epsilon$)	def. 50 % ($\mu\epsilon$)	E_e	900	500	53	32	49
1620	486	810	E_{sec}	1612	1225	74	67	19

Tab. 3.9 – Moduli di deformabilità (E_i , E_e ed E_{sec}) dei campioni sottoposti a prova triassiale con confinamento pari a 1 MPa e valori medi degli stessi.

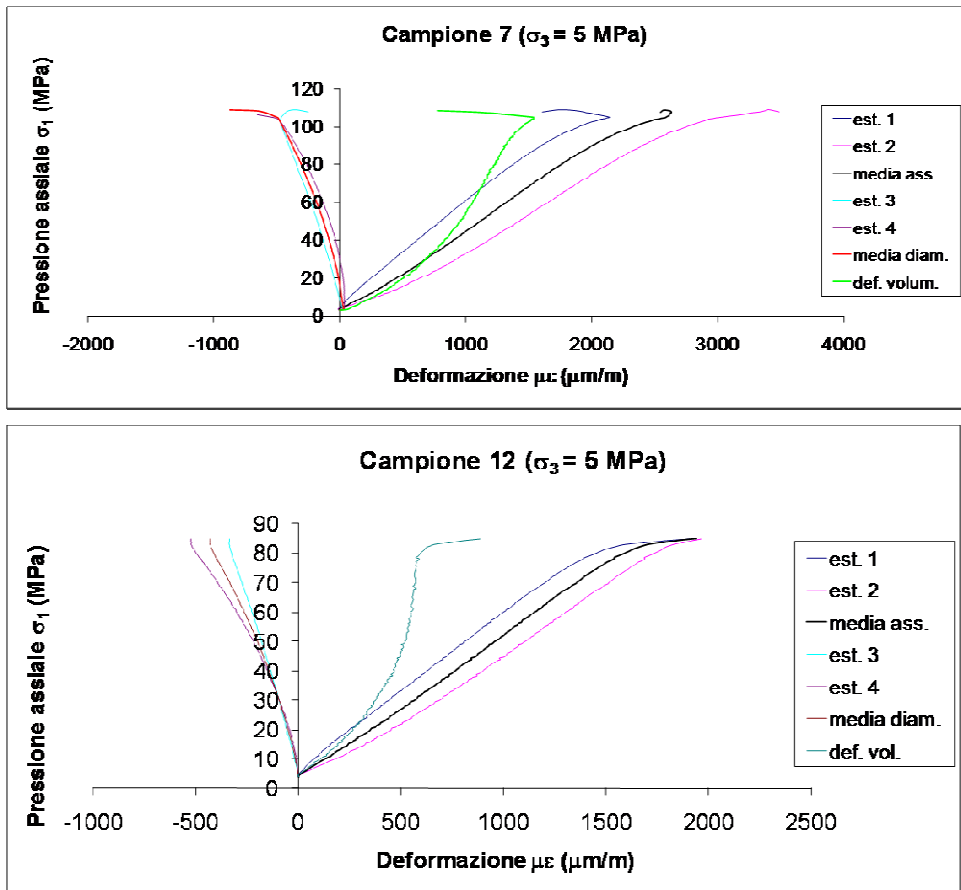


Fig. 3.9 – Grafici sforzo-deformazione dei due campioni di gneiss sottoposti a prova triassiale con pressione di confinamento di 5 MPa. Vengono riportate le deformazioni dei singoli estensimetri, le deformazioni medie assiali e diametrali e la deformazione volumetrica.

CAMPIONE 7			ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_2 ($\mu\text{m/m}$)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	E (GPa)	% campo elastico	
Triassiale ($\sigma_3 = 5$ MPa)			E_i	500	0	34	4	60	61
def. Tot. ($\mu\epsilon$)	def. 30 % ($\mu\epsilon$)	def. 50 % ($\mu\epsilon$)	E_e	1300	800	59	35	48	
2635	791	1318	E_{sec}	2635	1600	107	73	33	
CAMPIONE 12			ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_2 ($\mu\text{m/m}$)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	E (GPa)	% campo elastico	
Triassiale ($\sigma_3 = 5$ MPa)			E_i	500	0	27	4	46	67
def. Tot. ($\mu\epsilon$)	def. 30 % ($\mu\epsilon$)	def. 50 % ($\mu\epsilon$)	E_e	1300	600	68	37	44	
1938	581	969	E_{sec}	1938	1300	85	68	27	
CAMPIONI 7 e 12			ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_2 ($\mu\text{m/m}$)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	E (GPa)	% campo elastico	
Triassiale ($\sigma_3 = 5$ MPa)			E_i	500	0	31	4	53	64
def. Tot. ($\mu\epsilon$)	def. 30 % ($\mu\epsilon$)	def. 50 % ($\mu\epsilon$)	E_e	1300	700	63	36	46	
2287	686	1143	E_{sec}	2287	1450	96	70	30	

Tab. 3.10 – Moduli di deformabilità (E_i , E_e ed E_{sec}) dei campioni sottoposti a prova triassiale con confinamento pari a 5 MPa e valori medi degli stessi.

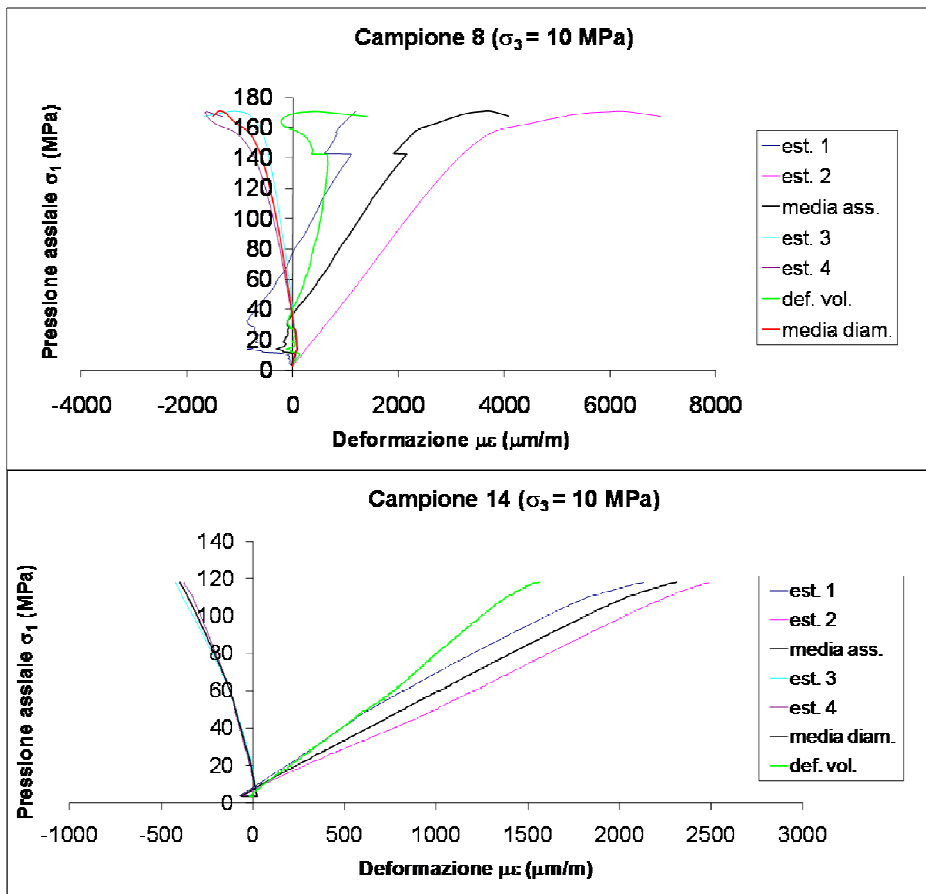


Fig. 3.10 – Grafici sforzo-deformazione dei due campioni di gneiss sottoposti a prova triassiale con pressione di confinamento di 10 MPa. Vengono riportate le deformazioni dei singoli estensimetri, le deformazioni medie assiali e diametrali e la deformazione volumetrica.

CAMPIONE 8			ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_2 ($\mu\text{m/m}$)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	E (GPa)	% campo elastico	
Triassiale ($\sigma_3 = 10$ MPa)			E_i	1000	0	46	3	43	48
def. Tot. ($\mu\epsilon$)	def. 30 % ($\mu\epsilon$)	def. 50 % ($\mu\epsilon$)	E_e	2500	1000	115	47	45	
6297	1889	3149	E_{sec}	6297	3000	172	135	11	
CAMPIONE 14			ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_2 ($\mu\text{m/m}$)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	E (GPa)	% campo elastico	
Triassiale ($\sigma_3 = 10$ MPa)			E_i	500	0	34	7	54	78
def. Tot. ($\mu\epsilon$)	def. 30 % ($\mu\epsilon$)	def. 50 % ($\mu\epsilon$)	E_e	1700	700	94	44	50	
2311	693	1156	E_{sec}	2311	1800	118	99	37	
CAMPIONI 8 e 14			ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_2 ($\mu\text{m/m}$)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	E (GPa)	% campo elastico	
Triassiale ($\sigma_3 = 10$ MPa)			E_i	750	0	40	5	49	63
def. Tot. ($\mu\epsilon$)	def. 30 % ($\mu\epsilon$)	def. 50 % ($\mu\epsilon$)	E_e	2100	850	105	46	48	
4304	1291	2152	E_{sec}	4304	2400	145	117	24	

Tab. 3.11 – Moduli di deformabilità (E_i , E_e ed E_{sec}) dei campioni sottoposti a prova triassiale con confinamento pari a 10 MPa e valori medi degli stessi.

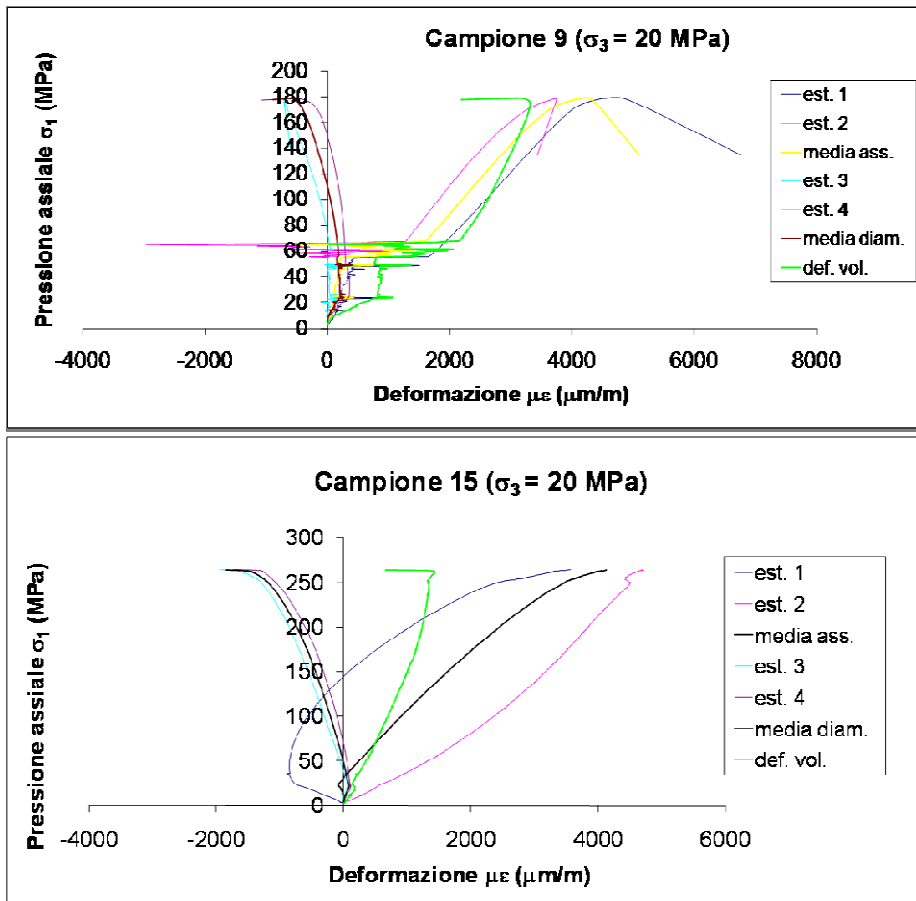


Fig. 3.11 – Grafici sforzo-deformazione dei due campioni di gneiss sottoposti a prova triassiale con pressione di confinamento di 20 MPa. Vengono riportate le deformazioni dei singoli estensimetri, le deformazioni medie assiali e diametrali e la deformazione volumetrica.

CAMPIONE 9			ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_2 ($\mu\text{m/m}$)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	E (GPa)	% campo elastico
Triassiale ($\sigma_3 = 20$ MPa)			E_i	150	0	14	4	67
def. Tot. ($\mu\epsilon$)	def. 30 % ($\mu\epsilon$)	def. 50 % ($\mu\epsilon$)	E_e	2900	1800	138	78	69
4332	1300	2166	E_{sec}	4332	3000	178	143	
CAMPIONE 15			ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_2 ($\mu\text{m/m}$)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	E (GPa)	% campo elastico
Triassiale ($\sigma_3 = 20$ MPa)			E_i	500	0	70	31	78
def. Tot. ($\mu\epsilon$)	def. 30 % ($\mu\epsilon$)	def. 50 % ($\mu\epsilon$)	E_e	2000	1000	174	107	64
4050	1215	2025	E_{sec}	4050	2600	263	209	
CAMPIONI 9 e 15			ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_2 ($\mu\text{m/m}$)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	E (GPa)	% campo elastico
Triassiale ($\sigma_3 = 20$ MPa)			E_i	325	0	42	18	72
def. Tot. ($\mu\epsilon$)	def. 30 % ($\mu\epsilon$)	def. 50 % ($\mu\epsilon$)	E_e	2450	1400	156	93	67
4191	1257	2096	E_{sec}	4191	2800	221	176	

Tab. 3.12 – Moduli di deformabilità (E_i , E_e ed E_{sec}) dei campioni sottoposti a prova triassiale con confinamento pari a 20 MPa e valori medi degli stessi.

σ_3 (MPa)	E_i (GPa)	E_e (GPa)	E_{sec} (GPa)	E_e / E_{sec}
1	52	49	19	2,5
5	53	46	30	1,5
10	49	48	24	2,0
20	72	61	32	1,9

Tab. 3.13 – Moduli di deformabilità (E_i , E_e ed E_{sec}) ricavati dalle prove triassiali per le diverse pressioni di confinamento.

Come visto per le prove di velocità ultrasonica, sono state condotte prove triassiali su campioni aventi una marcata anisotropia meccanica dovuta alla foliazione degli gneiss. I campioni sottoposti a prova ($\sigma_3 = 5$ MPa) sono quelli di Fig. 3.6. Su questi campioni sono stati montati due soli estensimetri, uno in direzione assiale e uno in direzione diametrale. In questo modo è stato possibile determinare il coefficiente di anisotropia meccanica ($\sigma_{1(S6)}/\sigma_{1(S9)}$, dove σ_1 è la pressione di rottura) per gli gneiss fortemente foliati. I risultati di tali prove vengono riportati nel grafico di Fig. 3.12 e nella Tab. 3.14, analogamente a quanto visto per le altre prove triassiali. I valori dei coefficienti di anisotropia misurati con prove triassiali e con prove di velocità ultrasonica, pur essendo leggermente differenti (1,59 e 1,37 rispettivamente), risultano comunque congruenti.

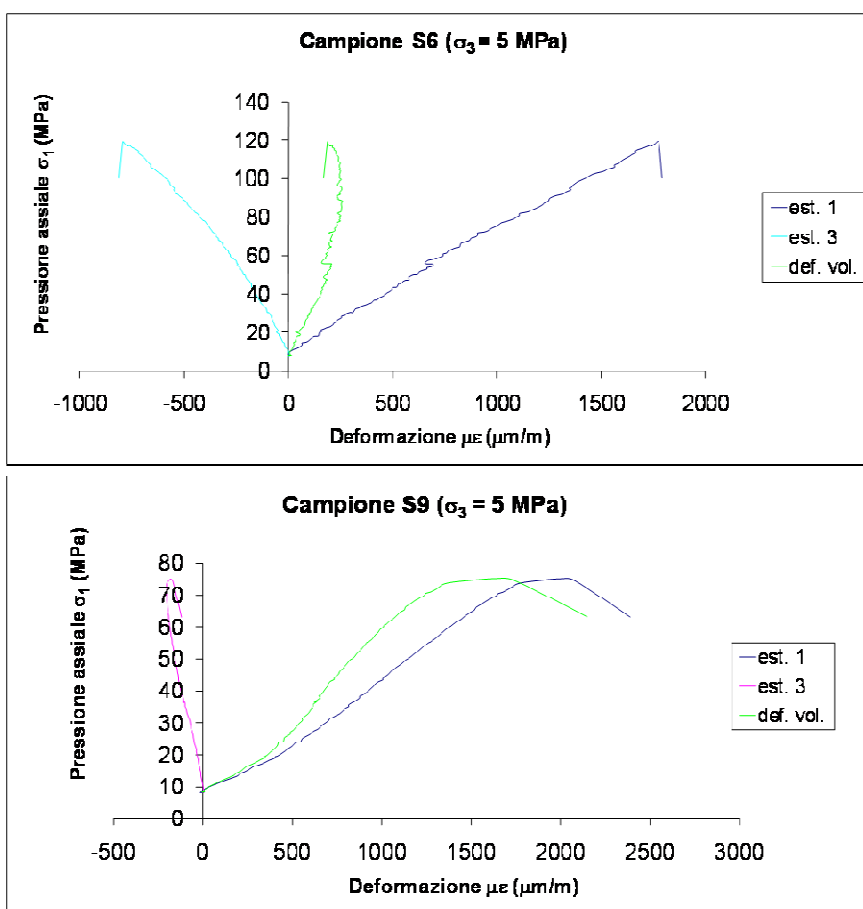


Fig. 3.12 – Grafici sforzo-deformazione dei due campioni di gneiss con marcata foliazione sottoposti a prova triassiale con pressione di confinamento di 5 MPa. Vengono riportate le deformazioni dei singoli estensimetri e la deformazione volumetrica.

CAMPIONE S6			ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_2 ($\mu\text{m/m}$)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	E (GPa)	% campo elastico
Triassiale ($\sigma_3 = 5$ MPa)			E_i	500	0	43	9	
def. Tot. ($\mu\epsilon$)	def. 30 % ($\mu\epsilon$)	def. 50 % ($\mu\epsilon$)	E_e	1500	500	103	43	90,2
1774	532	887	E_{sec}	1774	1600	120	110	
CAMPIONE S9			ϵ_1 ($\mu\text{m/m}$)	ϵ_2 ($\mu\text{m/m}$)	σ_1 (MPa)	σ_2 (MPa)	E (GPa)	% campo elastico
Triassiale ($\sigma_3 = 5$ MPa)			E_i	400	0	19	9	
def. Tot. ($\mu\epsilon$)	def. 30 % ($\mu\epsilon$)	def. 50 % ($\mu\epsilon$)	E_e	1500	500	65	23	80,2
1996	599	998	E_{sec}	1996	1600	75	69	

Tab. 3.14 – Moduli di deformabilità (E_i , E_e ed E_{sec}) dei campioni di gneiss foliati sottoposti a prova triassiale con confinamento pari a 5 MPa.

3.1.6 Discussione dei dati ottenuti dalle prove di laboratorio

Le prove di laboratorio fin qui descritte ci hanno fornito i parametri della roccia intatta fondamentali per la definizione dei modelli geologico-tecnici, potendo ora disporre sia dei parametri di resistenza (a compressione uniassiale, a differenti pressioni di confinamento laterale, nonché la resistenza a trazione), sia dei moduli di deformabilità (alle diverse condizioni di prova e quindi di sito).

Per quanto concerne i moduli di deformabilità, un immediato confronto tra i valori scaturiti dalle prove UCS e da quelle triassiali a più bassa pressione di confinamento (1 MPa), mostra come sia i moduli iniziali che i moduli elastici (di Young) presentino valori analoghi per le due modalità di prova ($E_i=47$ MPa ed $E_e=51$ MPa per le prove UCS; $E_i=52$ MPa ed $E_e=49$ MPa per le prove triassiali). Questi valori sono altresì confrontabili con quelli ricavati dalle prove di velocità ultrasonica, da cui si ricava un modulo di deformabilità (E_e) pari a 51 MPa. In genere il valore del modulo di deformabilità dinamico, ricavato dalle prove di velocità sonica, è superiore rispetto a quello statico, ricavato dalle prove di compressione. La differenza è tanto più marcata quanto più il materiale è interessato da microfrazioni, pori e alterazione dei minerali presenti. Per questo motivo, negli ammassi rocciosi fratturati il divario tra i due moduli può addirittura essere di un ordine di grandezza (Ribacchi, 2000). Molti autori hanno proposto negli anni varie relazioni tra il modulo statico e quello dinamico per gli ammassi rocciosi (ad esempio Deere et alii, 1967; Rzhnevsky & Novik, 1971). Questi hanno messo in evidenza come i valori del modulo statico siano tanto più bassi rispetto a quelli del modulo dinamico quanto più scadente è l'ammasso roccioso. Ritornando alle nostre misure, possiamo notare come il fatto di avere una buona coincidenza tra i due moduli, pur tenendo in conto il numero non troppo elevato di prove a disposizione, è un'ottima indicazione circa la capacità dei provini testati di rappresentare al meglio la roccia intatta.

Il grafico di Fig. 3.13 mostra la variazione dei tre moduli di deformabilità (E_i , E_e ed E_{sec}) al variare della pressione di confinamento laterale (σ_3). Innanzitutto è da evidenziare come il modulo iniziale e quello elastico (di Young) presentino valori molto simili, mentre il modulo secante abbia dei valori pari a circa la metà rispetto agli altri, congruentemente con l'entrata nel campo delle grandi deformazioni (campo elasto-plastico). Inoltre, il valore dei moduli tende ad aumentare con l'incremento della pressione di confinamento, quindi della profondità in sito.

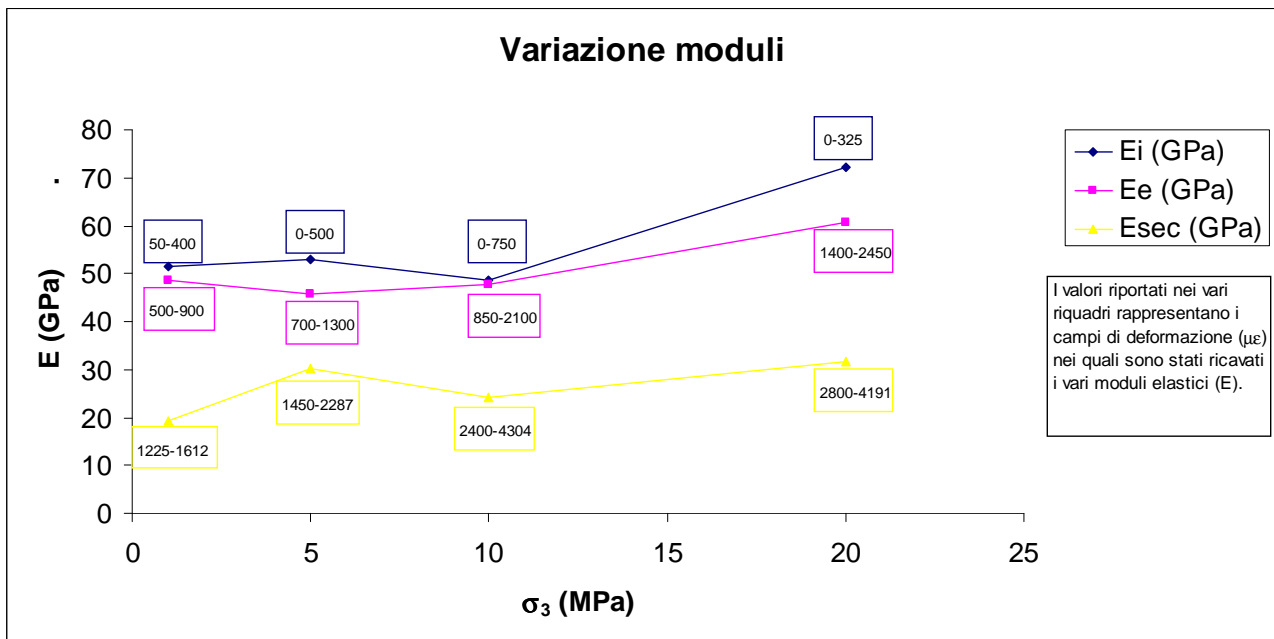


Fig. 3.13 – Variazione dei moduli di deformabilità (E_i , E_e ed E_{sec}) degli gneiss in relazione alla pressione di confinamento laterale cui sono stati sottoposti.

Le prove UCS, triassiali e brasiliane ci hanno fornito i parametri di resistenza della roccia intatta nei diversi stati di sollecitazione. Questi parametri risultano del tutto coerenti con i campi di variabilità che la letteratura indica per gli gneiss, come mostra anche il diagramma di Fig. 3.14 (Deere & Miller, 1966, modificata). Le prove UCS definiscono, per queste rocce, un valore di resistenza medio pari a 94,6 MPa.

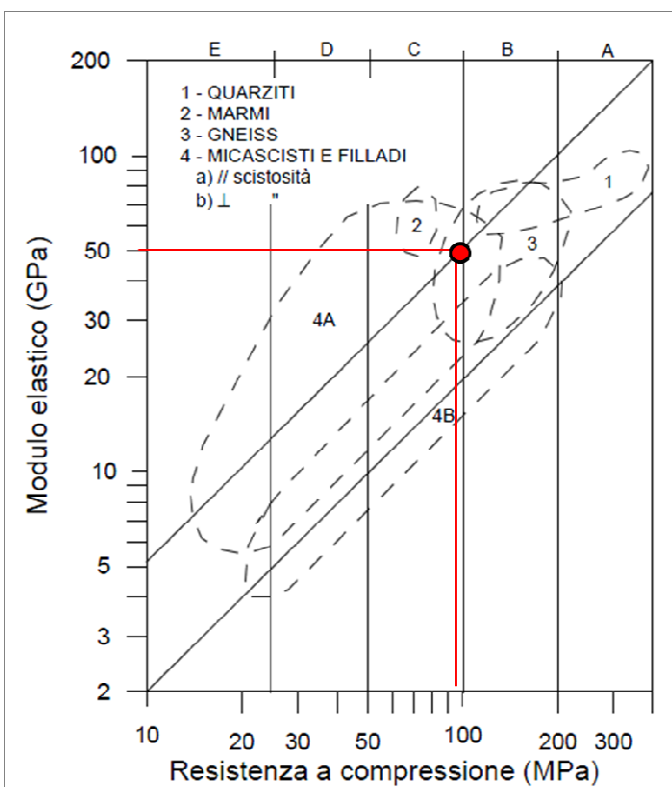


Fig. 3.14 – Diagramma E_e (GPa) – σ_c (MPa) per le rocce metamorfiche (Deere & Miller, 1966, modificato). I campioni sottoposti alle prove di laboratorio ricadono all'interno del campo di esistenza degli gneiss (punto rosso).

La disponibilità di tutti questi dati ha consentito, inoltre, di definire l'involuppo a rottura, sia in campo compressivo che in campo trattivo della matrice rocciosa.

I dati desunti dalle prove triassiali hanno consentito di costruire i cerchi di Mohr per le diverse pressioni di confinamento (1, 5, 10 e 20 MPa). In questo modo è stato possibile ricostruire l'involuppo a rottura come mostrato in Fig. 3.15.

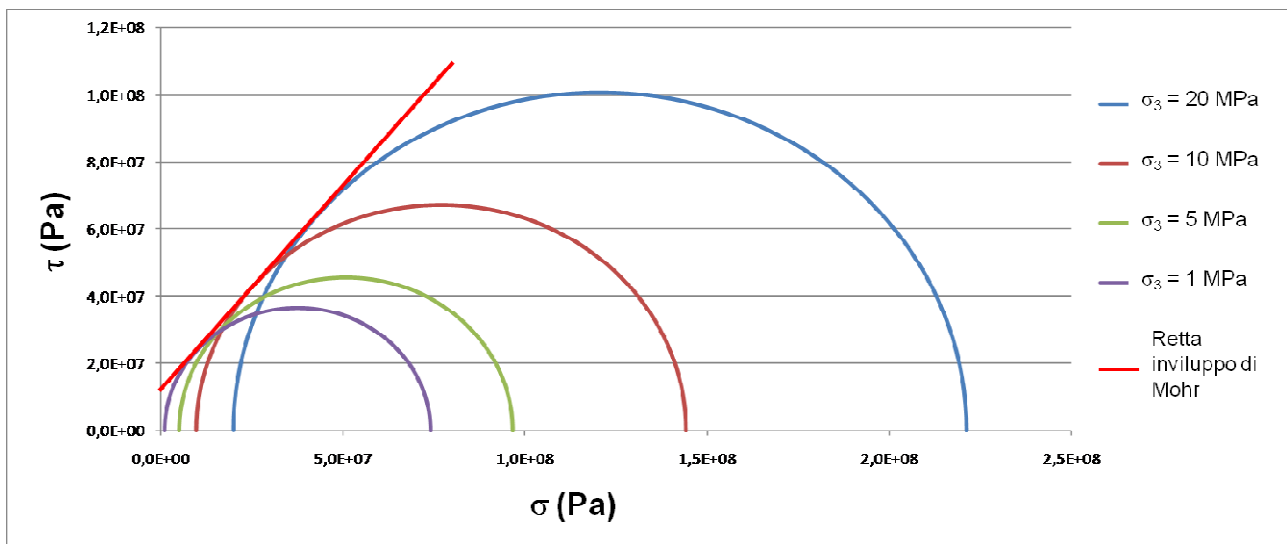


Fig. 3.15 – Involuppo lineare a rottura (linea rossa) ricavato dai cerchi di Mohr costruiti a partire dai dati delle prove triassiali sui campioni di gneiss.

Per poter completare l'involuppo a rottura anche nel campo trattivo è necessario prendere in considerazione anche i dati delle prove UCS e soprattutto delle prove brasiliane. Il criterio di rottura che meglio si addice alla descrizione del comportamento della roccia in campo trattivo è quello di Griffith (1924). Questo criterio esprime la resistenza a trazione monoassiale in termini di energia di deformazione richiesta per propagare microfrazture, ed esprime la resistenza a compressione monoassiale in funzione della resistenza a trazione. Nel paragrafo dedicato alle prove brasiliane si è visto come il valore di resistenza a trazione (σ_t) per un provino avente dimensioni analoghe a quelle dei provini sottoposti a prova UCS è pari a 4,2 MPa. A partire da questo valore la Fig. 3.16 mostra la linea involuppo di Griffith ricavata tramite la relazione

$$\tau = 4\sigma_t \cdot \sigma + 4\sigma_t^2,$$

per cui se $\sigma = 0$, $\tau = 2\sigma_t = 8,4$ MPa.

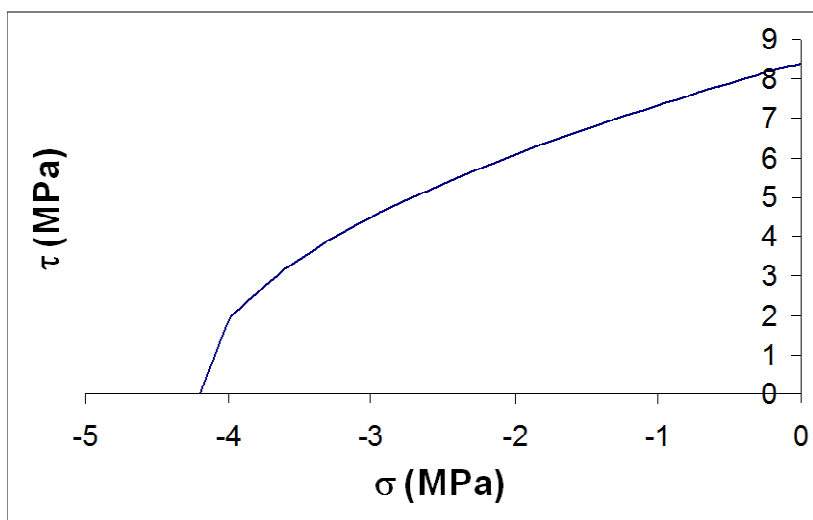


Fig. 3.16 – Curva involuppo secondo il criterio di rottura di Griffith (1921) nel campo trattivo.

A questo punto è necessario integrare l'involuppo di Griffith con quello di Mohr ricavato dalle prove di compressione semplice, come illustrato nel grafico di Fig. 3.17. Questo mostra che la retta tangente al cerchio di Mohr non può essere ritenuta la prosecuzione in campo compressivo dell'involuppo parabolico di Griffith.

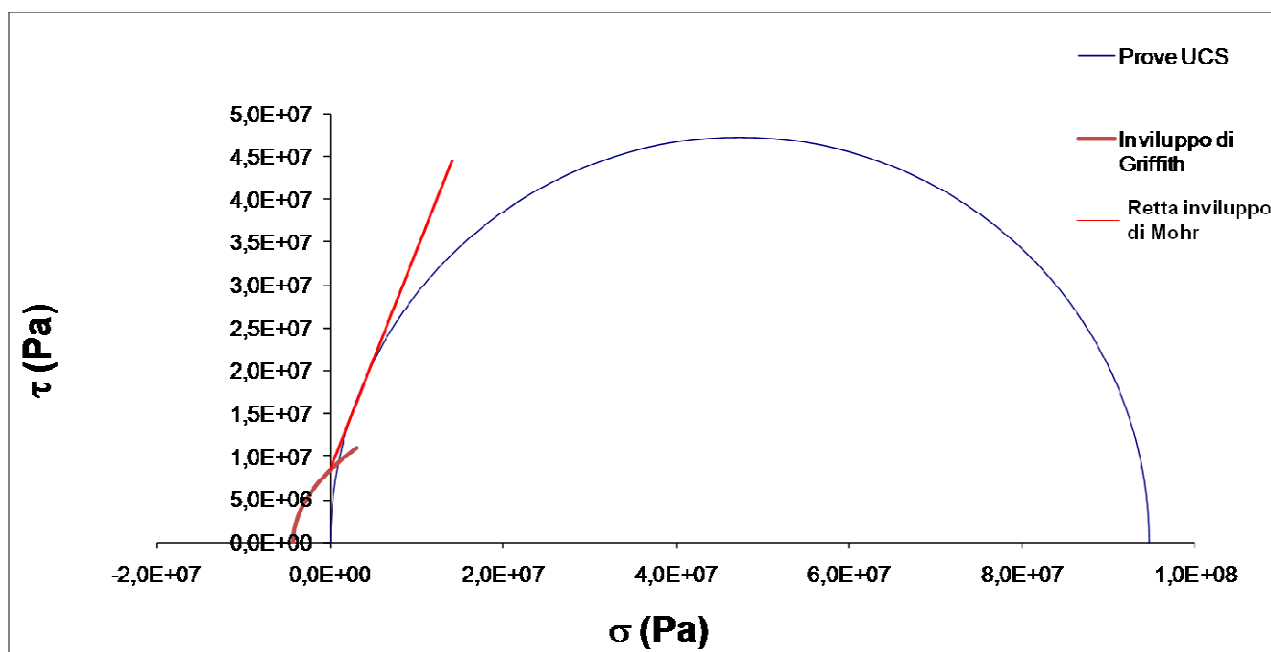


Fig. 3.17 – Involuppo lineare a rottura (linea rossa) ricavato dalle prove UCS e involuppo di Griffith (linea marrone).

Poiché il confronto tra le due linee involuppo non può essere ritenuto soddisfacente, il criterio di Griffith non può essere utilizzato per ottenere una curva di estensione al campo trattivo dell'involuppo a rottura ricavato dalle prove triassiali. In particolare, il valore di resistenza a trazione ricavato dalla prosecuzione della retta tangente al cerchio di Mohr relativo alle prove UCS si discosta dal valore di resistenza ricavato dalle prove brasiliane di circa 1 MPa (Fig. 3.17). Di conseguenza, per completare l'involuppo lineare a rottura ricavato dalle prove triassiali, in relazione

a tale scostamento, è stato necessario modificare la retta in corrispondenza delle basse pressioni di confinamento (ossia dal punto di tangenza del cerchi di Mohr della prova a $\sigma_3=1$ MPa). La nuova retta involucro così definita (Fig. 3.18) ci fornisce il valore di coesione (c) che risulta pari a 8 MPa. Utilizzando l'equazione di Griffith, si otterrebbe un valore di resistenza a trazione pari a 4 MPa. Dal grafico di Fig. 3.18 vediamo invece che la prosecuzione in campo trattivo del nuovo involucro di Mohr per le basse pressioni di confinamento indica un valore di resistenza a trazione pari a 5 MPa. In questo modo viene rispettato lo scostamento di 1 MPa tra i valori di resistenza a trazione ottenuti coi diversi criteri di rottura come visto in precedenza.

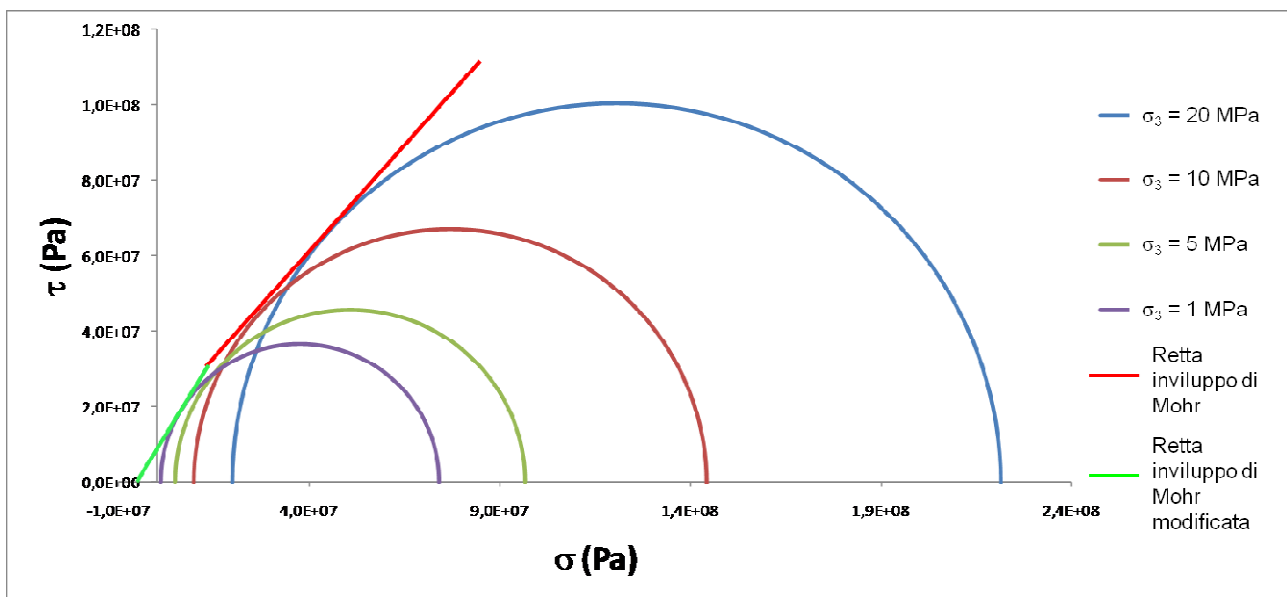


Fig. 3.18 – Involuppo lineare a rottura (linea rossa) ricavato dalle prove triassiali e involucro a rottura modificato per le basse pressioni di confinamento (linea verde).

L'involuppo a rottura così ottenuto rispecchia fedelmente quanto sostenuto da Hoek & Brown (1980) circa la non linearità dell'involuppo lineare a rottura soprattutto alle basse pressioni di confinamento. Inoltre gli stessi autori sostengono che il valore di coesione sia in genere pari al 10% della resistenza a compressione semplice e nel nostro caso ciò risulta confermato essendo i due valori pari, rispettivamente a 8 e 94 MPa.

Dall'involuppo a rottura così ricavato e dalle relazioni che regolano il criterio di rottura lineare di Mohr è stato altresì possibile ricavare il valore di angolo di attrito di base (ϕ) che è risultato essere pari a circa 50°.

3.2 POINT LOAD TEST

Le prove di carico puntuale (*point load test*) sono state messe a punto nell'esigenza di ricavare un indice della resistenza della roccia in modo speditivo (Broch & Franklin, 1972). Esse vengono presentate, in questa tesi, separatamente dalle altre prove di laboratorio in quanto sono state eseguite direttamente in sito. Oltre ad una esigenza essenzialmente pratica (in questo modo è stato possibile eseguire un numero molto elevato di prove), questa scelta ha anche una motivazione più tecnica. Infatti, viste le finalità con cui sono state condotte le prove di laboratorio, ossia la determinazione delle proprietà della roccia intatta, i provini del *point load test*, a causa soprattutto delle loro dimensioni, non sono stati considerati rappresentativi della matrice rocciosa. Inoltre, a differenza di quelli sottoposti alle prove di laboratorio, diversi campioni utilizzati per le prove di *point load* presentavano piani di debolezza ben marcati al loro interno.

I *point load test* sono stati eseguiti secondo le Raccomandazioni I.S.R.M. (1994). La prova consiste nel portare a rottura per trazione il provino applicando un carico lungo due facce parallele attraverso due punte coniche di forma standardizzata. I provini di roccia sottoposti alla prova sono di forma irregolare, con il rapporto D/W variabile tra 0,3 e 1,0; W è la larghezza media del provino, ricavata dalle due lunghezze del blocchetto misurate con un calibro di acciaio, D è la distanza tra i due punti di contatto punte-provino. Queste prove hanno consentito di ricavare l'indice di resistenza a punzonamento della roccia (I_s). A causa della dipendenza della resistenza dalla dimensione dei provini, la prova fornisce indici di resistenza che si riducono all'aumentare delle dimensioni degli stessi. Per ovviare a tale problema, l' I_s deve essere corretto per un fattore di forma (F) al fine di determinare il valore di $I_{s(50)}$, ossia la resistenza a punzonamento di un provino avente diametro di 50 mm.

Sono state condotte, complessivamente, 195 prove di *point load* su campioni di roccia provenienti dai fronti di scavo di tre diverse gallerie (Muro, San Giovanni e Brancato) tuttora in fase di costruzione nell'ambito dei lavori di ammodernamento dell'Autostrada A3 Salerno-Reggio Calabria (DG24/03) dal km 393+500 (Svincolo di Gioia Tauro escluso) al km 423+300 (Svincolo di Scilla escluso). Tutti i dati relativi a tali prove vengono riportati nell'Appendice 1 – *Point Load Test*. Nelle stesse tabelle vengono specificate tutte le formule utilizzate per il calcolo dell' $I_{s(50)}$, secondo la normativa adottata. I valori di resistenza a punzonamento così ricavati variano tra 0,40 e 9,94 MPa. Il diagramma di frequenza di Fig. 3.19, ottenuto raggruppando i valori di $I_{s(50)}$ in dieci classi di ampiezza omogenea (1 MPa), evidenzia che la maggior parte dei provini (76%) ha una resistenza a punzonamento compresa tra i 2 e i 6 MPa. Il diagramma mostra una distribuzione di frequenza asimmetrica positiva (coda verso i valori più elevati) dei valori di $I_{s(50)}$, ad indicare la presenza di

valori anomali (*outliers*). Ciò, inoltre, è congruente con le caratteristiche degli gneiss, che presentano una elevata variazione delle caratteristiche petrografiche al loro interno. Per tale motivo, il valore rappresentativo di resistenza a punzonamento degli gneiss è stato calcolato dalla media geometrica di tutti i valori misurati in sito. Essa si ottiene moltiplicando fra loro tutti i valori delle singole prove e calcolando la radice n-ma del prodotto, secondo la formula

$$Mg = (x_1 * x_2 * x_3 * \dots * x_n)^{1/n}.$$

Il valore di $I_{s(50)}$ così calcolato risulta pari a 2,88 MPa.

La correlazione tra il valore di resistenza a punzonamento ($I_{s(50)}$) e quello a compressione semplice (da prove UCS) non è di facile determinazione. Nel nostro caso il rapporto tra il σ_1 a rottura della prova UCS e l' $I_{s(50)}$ è pari a 32. Le Raccomandazioni I.S.R.M. seguite indicano che tale valore, in genere, varia tra 20 e 25 per rocce isotrope, mentre può variare tra 15 e 50 per rocce anisotrope come gli gneiss. Questo indica che l'errore che si può commettere nello stimare la resistenza a compressione uniassiale a partire da prove di *point load* è superiore al 100%. In ogni caso il rapporto ricavato in questa sede rientra nel campo di variabilità delle rocce anisotrope.

La prova di punzonamento è anche una misura indiretta della resistenza a trazione di una roccia. $I_{s(50)}$ è approssimativamente pari a 0,80 volte la resistenza a trazione misurata con la prova brasiliana (Raccomandazioni I.S.R.M., 1994). Nel nostro caso è necessario considerare la resistenza a trazione di un provino di 50 mm di diametro per avere un confronto significativo. Dal grafico di Fig. 3.5 si deduce che un tale provino dovrebbe avere una σ_t pari a circa 8 MPa. Di conseguenza il rapporto è pari a 0,36, decisamente inferiore a quanto riportato dall'I.S.R.M.. Questo conferma come i provini sottoposti a punzonamento non possano essere considerati rappresentativi della roccia intatta, come precedentemente spiegato. Infatti, per ottenere un rapporto di 0,80 dovremmo considerare esclusivamente i pochi, percentualmente, provini con $I_{s(50)}$ almeno pari a 6 MPa, circa il 10% del totale.

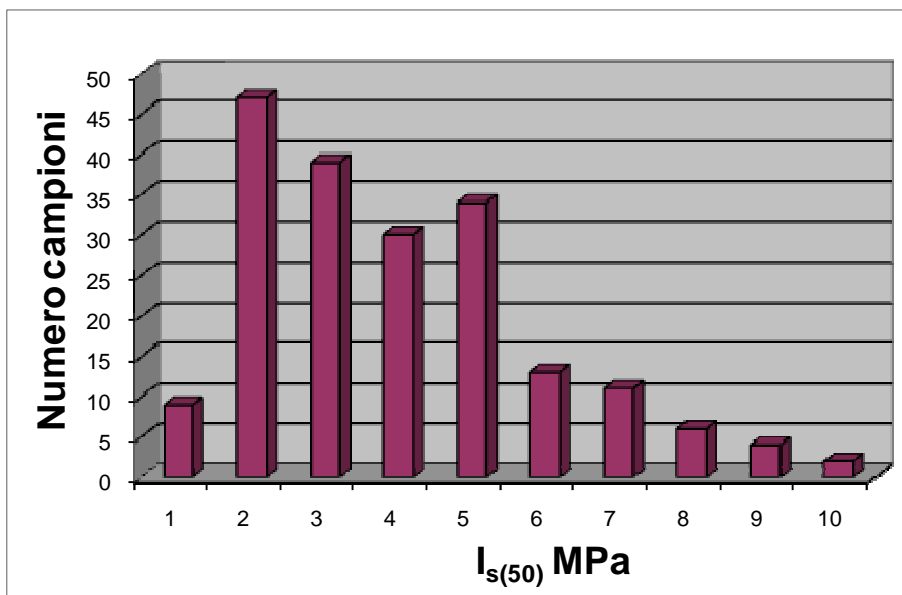


Fig. 3.19 – Distribuzione di frequenza dei valori di $I_{s(50)}$, raggruppati in classi di ampiezza omogenea (1 MPa).

La Tab. 1 dell'Appendice 1 mostra i dati relativi alle prove di *point load* condotte su campioni di gneiss fortemente foliati. Queste prove (28) sono state condotte ponendo il carico sia in direzione perpendicolare (16) che parallela (12) rispetto i piani di foliazione. Analogamente a quanto fatto per il totale delle prove, anche in questo caso sono stati determinati i valori di $I_{s(50)}$ rappresentativi delle due modalità di prova. Il valore di $I_{s(50)}$ per le prove condotte con direzione parallela alla foliazione è risultato pari a 3,20 MPa, ed a 5,21 MPa per le prove con direzione perpendicolare. Di conseguenza il coefficiente di anisotropia ($I_{s(50)perp} / I_{s(50)par}$) è 1,63. Se confrontato con i coefficienti di anisotropia ricavati dalle prove di velocità ultrasonica e di compressione triassiale (rispettivamente 1,39 e 1,57) esso risulta leggermente superiore e comunque congruente con gli altri due.

4. I RILIEVI GEOMECCANICI IN SITO

Chiunque si sia occupato di ammassi rocciosi fratturati, qualsiasi sia stato l'obiettivo del suo lavoro, sa bene che il nodo principale da sbrogliare è quello relativo alla caratterizzazione del sistema di fratturazione che ogni ammasso possiede. Nel capitolo introduttivo sono state spiegate, a partire dalle norme I.S.R.M. (2007) quali sono stati i criteri che mi hanno guidato nelle scelte circa le modalità di realizzazione dei rilievi geomeccanici in sito. Senza ritornare su quanto già detto, occorre comunque qui ribadire il concetto fondamentale che deve guidare nell'approccio ad un'analisi geomeccanica, ossia l'obiettivo finale del lavoro. Essendo il mio obiettivo quello di parametrizzare quantitativamente, riguardo sia le condizioni di resistenza che quelle di deformabilità, gli ammassi rocciosi fratturati alla scala dei versanti, l'attenzione è stata rivolta a quei parametri geomeccanici, rilevabili in sito, che meglio soddisfacevano tale scopo. Da ciò si evince l'importanza di questo e dei successivi due capitoli, che rappresentano il nucleo centrale di questo lavoro di ricerca, pur rimarcando ancora come ogni singola parte (dal rilevamento alle prove di laboratorio, alle analisi di stabilità) abbia rappresentato un pezzo fondamentale nel mosaico finale.

Nei successivi paragrafi verranno presentati e discussi i dati rilevati attraverso le stazioni geomeccaniche effettuate sia in affioramento, sia sui fronti di scavo delle gallerie autostradali in fase di costruzione nell'ambito dei lavori di ammodernamento dell'Autostrada A3 Salerno-Reggio Calabria. Infatti, al fine di poter avere accesso alle aree di cantiere e soprattutto ai fronti di scavo in galleria è stato necessario stipulare una convenzione, ai fini di ricerca, tra l'Università di Roma "Sapienza" – Centro di Ricerca CERi e la Società di Progetto SaRc S.C.p.A (Società Consortile per Azioni) che gestisce tutte le attività di cantiere nel lotto DG24/03 dal km 393+500 (Svincolo di Gioia Tauro escluso) al km 423+300 (Svincolo di Scilla escluso). I diversi periodi trascorsi nei cantieri mi hanno consentito, oltre a svolgere le attività strettamente inerenti il mio dottorato, di arricchirmi professionalmente sia attraverso lo scambio di conoscenze coi colleghi o con altre figure professionali, sia grazie alla possibilità di seguire direttamente diverse delle attività che si svolgono in un grande cantiere e che coinvolgono e chiamano in causa direttamente noi geologi.

4.1 I RILIEVI GEOMECCANICI IN AFFIORAMENTO

Nel corso di questi anni sono state effettuate diverse campagne di indagini in sito. Operativamente queste campagne hanno previsto principalmente un'attività di rilevamento geologico e geomorfologico di un determinato settore (Capitolo 2) e un'attività di rilievo geomeccanico sia in affioramento che in galleria. Complessivamente sono stati effettuati **144 rilievi** su affioramenti di

gneiss nel tratto compreso tra Santa Trada e Bagnara Calabria. I punti di rilievo geomeccanico sono riportati sia nella cartografia geologica generale (Allegato 1) sia nelle carte geologiche di dettaglio relative alle tre frane studiate (Allegato 2). Inoltre sono stati condotti 14 rilievi sui graniti costituenti il corpo intrusivo di Villa San Giovanni (Allegato 1). Siccome uno degli scopi del lavoro era quello di giungere ad una zonazione delle caratteristiche geomeccaniche degli ammassi rocciosi che coprisse l'intero territorio rilevato, si è tentato di distribuire quanto più possibile omogeneamente i punti di rilievo. Ma, per poter eseguire un rilievo geomeccanico, seppur puntuale, è evidentemente necessaria la presenza di affioramenti significativi, con un'area di rilievo pari almeno a 2 m². Anche se quest'area di rilievo non risulta certo particolarmente elevata, di fatto l'esecuzione di un rilievo, nella maggior parte dei casi, è vincolata alla presenza di tagli stradali. Pertanto spesso la distribuzione dei punti di rilievo geomeccanico assume l'aspetto di una fila allungata in una sola direzione. Se questo ha rappresentato un forte limite, di fatto non superato, nella costruzione di carte di ammasso a grande scala (area rilevata), come vedremo ha però a volte rappresentato un importante elemento per la costruzione dei modelli geologico-tecnici delle frane analizzate. In ogni caso sono state condotte quanti più possibili rilievi geomeccanici, compatibilmente con le condizioni di sito, al fine di avere un data-base quanto più significativo per le successive analisi geostatistiche proposte nel successivo capitolo.

4.1.1 Le schede geomeccaniche per gli affioramenti

Sulla base di quanto detto finora, è stata messa a punto una scheda di rilievo geomeccanico, al fine di soddisfare le specifiche esigenze del presente lavoro. Quindi, ogni stazione geomeccanica è consistita nella misura degli indici geomeccanici in sito, e nella successiva definizione dei parametri secondo quanto riportato in seguito. E' stata scelta una singola stazione geomeccanica (D13) al fine di spiegare nel dettaglio l'intera procedura di acquisizione e prima analisi dei dati. La Fig. 4.1 mostra la scheda geomeccanica completa, utilizzata in campagna, del rilievo preso ad esempio.

Andiamo ora più nel dettaglio di come i singoli dati siano stati ricavati in sito, nonché di come essi siano stati analizzati singolarmente, prima di andarli a confrontare con gli analoghi ricavati da tutti gli altri rilievi.

Innanzitutto ogni stazione geomeccanica è stata ubicata sulla carta topografica in scala 1:5.000, definendone così le coordinate geografiche (latitudine e longitudine). Successivamente si è proceduto a compilare i dati generali della stazione (Fig. 4.2), e precisamente:

- **data;**
- **numero identificativo** della stazione;

- **area dello stendimento:** rappresentata dalla lunghezza dei lati del rettangolo di roccia su cui è stato eseguito il rilievo. Generalmente i rilievi sono stati eseguiti su un'area di 6 m² (3 m di lunghezza per 2 di altezza). Le dimensioni minime per cui si è ritenuto attendibile eseguire il rilievo sono state di 2 m², in quanto la spaziatura tra le discontinuità è risultata essere nelle quasi totalità dei casi ravvicinata o molto ravvicinata (<20 cm) (I.S.R.M., 2007);
- **direzione del fronte:** vengono riportate la direzione s.s. e la direzione di immersione. In realtà gli affioramenti, essendo in genere verticali, non presentano immersione. In questo caso, si è assunto, per convenzione, che l'affioramento immergesse verso l'esterno con un angolo di 89°, al fine di avere un dato di immersione fondamentale per l'analisi delle famiglie di discontinuità come si evidenzierà in seguito;
- **litotipo** (gneiss o granito);
- **stato dell'ammasso:** secondo quanto riportato nelle norme I.S.R.M. (2007) e nella Fig. 4.3 (Ercoli, 1981). Nella maggior parte dei casi l'ammasso è risultato essere irregolare;
- **note:** è riportata la quota s.l.m. del rilievo ed eventualmente particolari annotazioni (elevato grado di foliazione, evidenti differenziazioni petrografiche, particolari condizioni di alterazione, ammasso cataclasato, ecc.).

Data:		N° Stazione:		Area stendimento (m):				Dir. fronte:														
14/07/2008		D13		3 x 1,5				N 80 E - 350														
Litotipo:		Stato dell' ammasso:				Note:																
gneiss		irregolare				quota 350 m s.l.m. Ammasso alterato ed ossidato																
Prove sclerometriche: martello di Schmidt.																						
Sist.	Direzione	Valori						Media	Qc (MPa)													
1	2	38	32	26	28	18		28,7	46													
2	3	50	38	53	56	45		49,3	121													
3	4	53	54	42	34	26		43	80													
									82													
Analisi soggettiva																						
1° Sistema		Immersione (°) 170				inclinazione (°) 30				Media												
Spaz. (cm)		25	13	4	7	3	26	22	10	15	32	20	22								15,8	
2° Sistema		Immersione (°) 280				inclinazione (°) 84				Media												
Spaz. (cm)		19	4	13	5	5	7	5	16	6	4	4	8								8,0	
3° Sistema		Immersione (°) 10				inclinazione (°) 55				Media												
Spaz. (cm)		6	19	3	4	5	10	14	9	14	7	6	2	3	19						8,6	
4° Sistema		Immersione (°)				inclinazione (°)				Media												
Spaz. (cm)																						
Analisi oggettiva (stesa orizzontale)																						
Prog. (cm)		0	5	5	12	17	7	6	27	29	33	35	36	37	40	39	42	39	48	46	55	68
Imm. (°)		10	290	150	300	300	160	20	300	210	290	10	15	70	340	20	350	190	140	20	360	340
Incl. (°)		60	85	85	75	80	80	58	75	65	78	62	68	56	40	62	80	70	60	58	70	65
Prog. (cm)		80	66	77	102	94	105	114	106	78	112	124	132	143	140	136	150	143	156	155	170	176
Imm. (°)		60	20	160	320	10	10	10	190	40	330	360	30	190	10	10	5	360	360	40	120	20
Incl. (°)		45	60	72	70	48	48	48	80	55	48	40	50	40	40	70	30	30	35	70	70	
Prog. (cm)		180	186	190	202	208	222	210	218	226	246	238	275	276	290	286	297	274				
Imm. (°)		10	10	120	100	100	100	210	30	230	130	200	110	210	100	40	200	20				
Incl. (°)		62	62	80	80	80	85	40	40	45	75	50	80	50	85	70	55	72				
Jv standard		Jv H	22,5		Jv H	18,0		Jv H	21,5		Jv H medio	20,7										
		Jv V	16,7		Jv V	22,7		Jv V	23,3		Jv V medio	20,9										
		Jv O	24,0		Jv O	18,0		Jv O	19,0		Jv O medio	20,3										
		Media totale Jv											20,6									
FOTC	N°	1547	1548	4391	4392																	
	Distanza	3	3	3	3																	
Indice dei blocchi* (cm):											10,8											
<small>*dall'analisi soggettiva.</small>																						

Fig. 4.1 – Esempio di scheda di rilievo geomeccanico per gli affioramenti.

Data:	N° Stazione:	Area stendimento (m):	Dir. fronte:
14/07/2008	D13	3 x 1,5	N 80 E - 350
Litotipo:	Stato dell' ammasso:	Note:	
gneiss	irregolare	quota 350 m s.l.m. Ammasso alterato ed ossidato	

Fig. 4.2 – Informazioni generali sull'affioramento (particolare di scheda di rilievo geomeccanico per gli affioramenti).

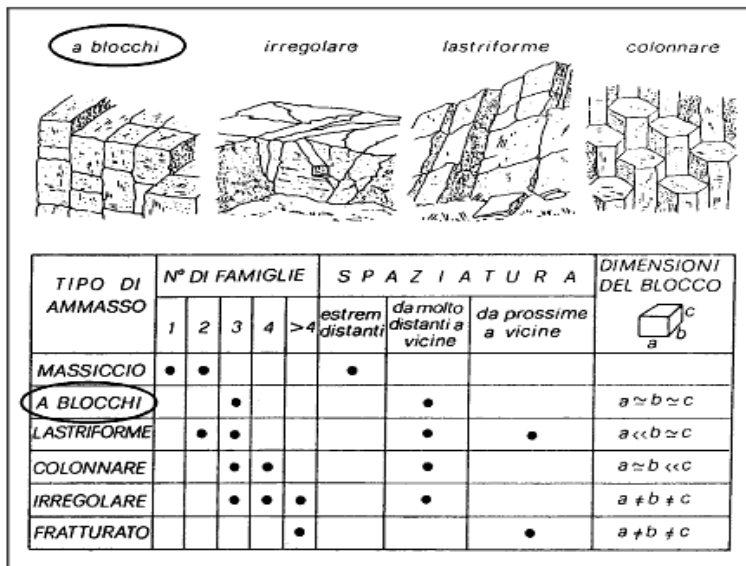


Fig. 4.3 – Tipiche strutture degli ammassi rocciosi (Ercoli, 1981).

Le norme I.S.R.M. individuano due distinti criteri sui quali basare il censimento delle discontinuità:

- 1) **criterio soggettivo:** secondo il quale vengono rilevate solamente le discontinuità (o i sistemi di discontinuità) che sembrano svolgere un ruolo importante nei riguardi delle caratteristiche meccaniche dell'ammasso;
- 2) **criterio oggettivo:** secondo il quale vengono campionate tutte le discontinuità che intersecano una certa linea di riferimento (linea di scansione) o che ricadono all'interno di una certa area di riferimento (area dello stendimento).

Nella maggior parte dei rilievi condotti, i dati sono stati raccolti secondo entrambi i criteri. Laddove ne è stato seguito uno solo questo è stato sempre quello soggettivo. Il perché di tale scelta risiede nel fatto che, come riportato dall'I.S.R.M., il criterio soggettivo consente di focalizzare l'attenzione sulle discontinuità che, sempre secondo l'operatore, influenzano realmente le caratteristiche meccaniche dell'ammasso, oggetto di tale lavoro.

L'analisi soggettiva è consistita nell'individuazione visiva delle famiglie di discontinuità costituenti l'ammasso, e in particolare di quelle aventi una maggiore persistenza. In questo caso si parla di persistenza lineare, ovvero la continuità espressa in percentuale della traccia della discontinuità

rispetto all'estensione dell'affioramento. Di ogni famiglia (o sistema) di discontinuità è stata misurata la giacitura (*dip direction; dip*) e la spaziatura tra i singoli giunti, come evidenziato in Fig. 4.4.

Analisi soggettiva															
1° Sistema	Immersione (°) 170										Inclinazione (°) 30				Media
Spaz. (cm)	25	13	4	7	7	3	26	22	10	15	32	20	22		15,8
2° Sistema	Immersione (°) 280										Inclinazione (°) 84				Media
Spaz. (cm)	19	4	13	5	5	7	5	16	6	4	4	8			8,0
3° Sistema	Immersione (°) 10										Inclinazione (°) 55				Media
Spaz. (cm)	6	19	3	4	5	10	14	9	14	7	6	2	3	19	8,6
4° Sistema	Immersione (°)										Inclinazione (°)				Media
Spaz. (cm)															
Indice dei blocchi* (cm):														10,8	
*dall'analisi soggettiva.															

Fig. 4.4 – Particolare della scheda geomeccanica riferita all'analisi soggettiva dei sistemi di discontinuità riconosciuti.

La spaziatura tra i singoli giunti appartenenti al medesimo sistema di discontinuità è stata misurata ponendo una fettuccia metrica in direzione perpendicolare agli stessi. Da questi dati è stata ottenuta, facendone la media aritmetica, la spaziatura caratteristica di ogni sistema di discontinuità. Nella maggior parte dei casi sono state riconosciute tre famiglie di discontinuità, altre volte ne sono state riconosciute due o quattro, mentre solo in due casi ne sono state riconosciute cinque.

A partire dai dati di spaziatura dei singoli set di discontinuità, è stato possibile definire l'Indice dei Blocchi (I_b , espresso in cm) dell'ammasso roccioso, attraverso la relazione

$$I_b = \frac{S_1 + S_2 + S_3}{3}$$

dove S è la spaziatura media del singolo sistema. Nel caso di più di tre sistemi di discontinuità, secondo quanto suggerito anche dalle norme I.S.R.M., la formula è stata utilizzata escludendo dal calcolo la famiglia avente un valore di spaziatura maggiore. Questo parametro così calcolato rappresenta la dimensione lineare media del blocco tipico di roccia costituente l'ammasso roccioso. Questo non va confuso con un analogo parametro che è rappresentato dal Volume Roccioso Unitario (V.R.U.) calcolabile attraverso la relazione

$$V.R.U. = S_1 \times S_2 \times S_3$$

che, come facilmente intuibile, fornisce il volume tipico dei blocchi costituenti l'ammasso.

Dei dati giacitureali dei singoli sistemi di discontinuità riconosciuti tramite analisi soggettiva è stata eseguita, tramite il software “Rockscience DIPS”, la proiezione equiangolare sul reticolo di Schmidt (Fig. 4.5). Analogamente è stato proiettato anche il piano di immersione del fronte dell’affioramento.

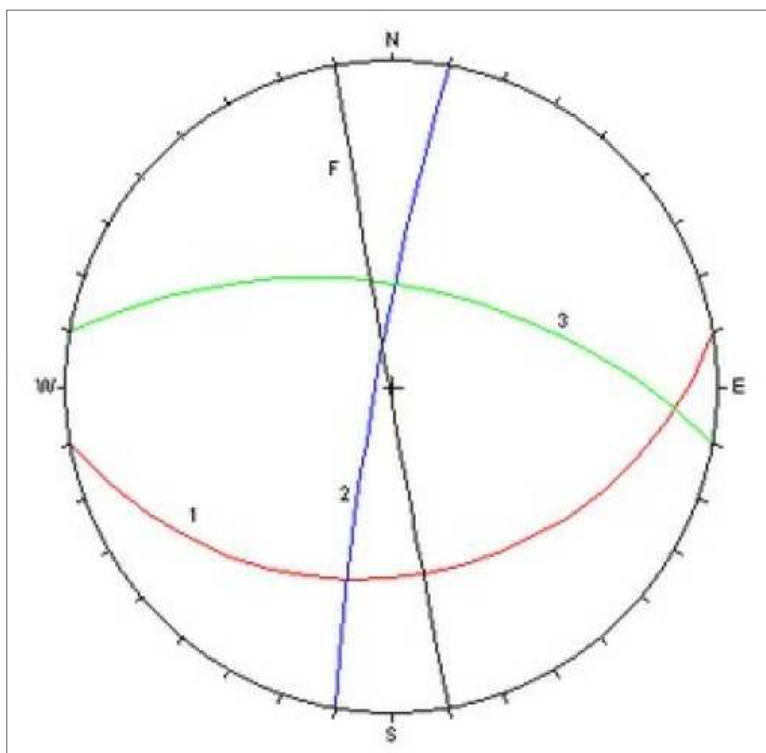


Fig. 4.5 – Proiezione sul reticolo equiangolare di Schmidt dei piani riferibili ai tre sistemi di discontinuità riconosciuti (linee colorate) e della direzione di immersione del fronte di affioramento (linea nera) della stazione geomeccanica D13.

Su uno dei piani appartenenti ad ogni singolo sistema di discontinuità individuato nell’analisi soggettiva, sono state eseguite le prove sclerometriche (martello di Schmidt tipo L) al fine di determinare la resistenza a compressione uniassiale dei giunti. Una prova sclerometrica viene eseguita ponendo il martello di Schmidt (Fig. 4.6A) in direzione perpendicolare al piano di cui si vuole misurare la resistenza. Lo strumento di prova fornirà il valore di rimbalzo (tramite una molla opportunamente tarata) di una massa nota sulla discontinuità stessa. Per ottenere il valore di resistenza a compressione uniassiale (σ_c) è necessario correggere il valore di rimbalzo (R) in funzione del peso per unità di volume della roccia (γ_n), secondo la seguente relazione

$$\log_{10}(\sigma_c) = 0,00088 \cdot \gamma_n \cdot R + 1,01 \quad (\text{Barton \& Choubey, 1977}).$$

La correzione della relazione per l’orientamento del martello di Schmidt va eseguita applicando i valori riportati in Tab. 4.1.

Rimbalzo	Verso il basso		Verso l'alto		Orizzontale
	$\alpha = -90$	$\alpha = -45$	$\alpha = 90$	$\alpha = 45$	
R	$\alpha = -90$	$\alpha = -45$	$\alpha = 90$	$\alpha = 45$	$\alpha = 0$
10	0	-0,8	-	-	-3,2
20	0	-0,9	-8,8	-6,9	-3,04
30	0	-0,8	-7,8	-6,2	-3,1
40	0	-0,7	-6,6	-5,3	-2,7
50	0	-0,6	-5,3	-4,3	-2,2
60	0	-0,4	-4,0	-3,3	-2,7

Tab. 4.1 – Tabella di correzione dei valori di rimbalzo ottenuti col martello di Schmidt da inserire nelle relazione di Barton & Choubey (1977).

Analogamente, il valore di resistenza a compressione uniaassiale può essere ottenuto graficamente come mostra la Fig. 4.6B.

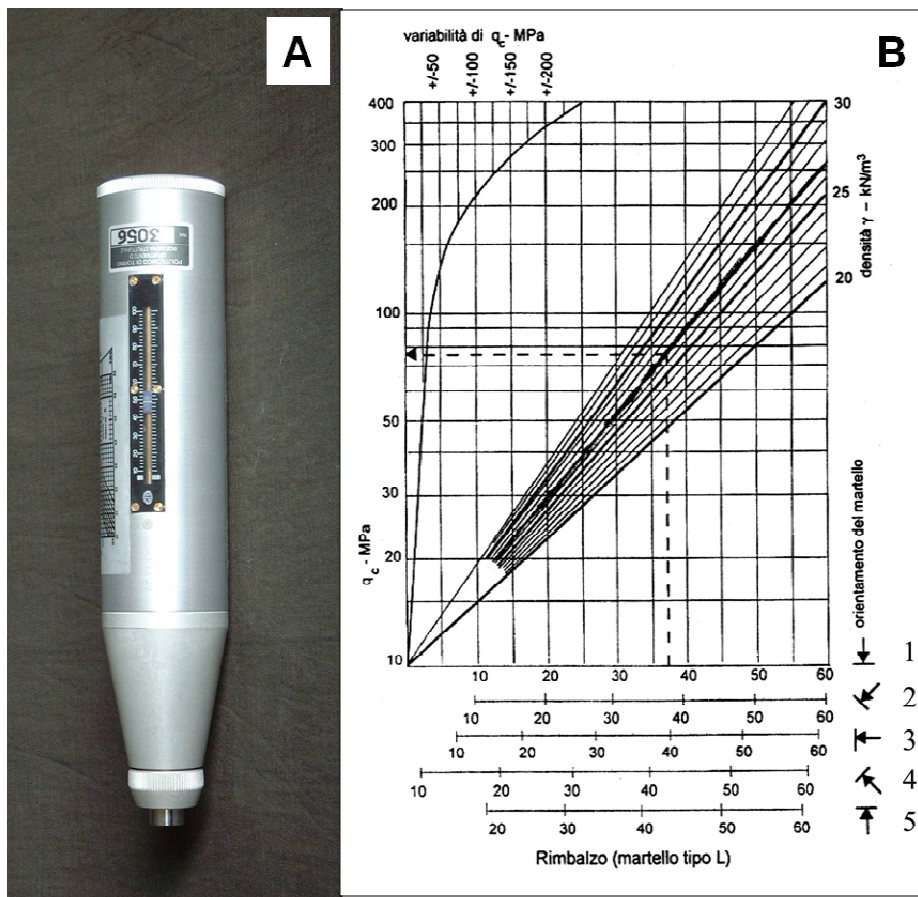


Fig. 4.6 – (A) Martello di Schmidt – Tipo L. (B) Diagramma di correlazione tra il valore di rimbalzo dello sclerometro e il valore di resistenza a compressione uniaassiale della roccia.

Le norme I.S.R.M. suggeriscono di effettuare 10 prove sclerometriche su ogni piano, di scartare i 5 valori di rimbalzo più bassi, e di mediare i restanti 5 valori. Nel presente lavoro, il valore di resistenza a compressione uniaassiale è stato ricavato, per la matrice rocciosa, da prove UCS. In più, una stima indiretta di tale parametro si può ricavare dalle prove di *point load*, che potremmo considerare come intermedie tra prove di laboratorio e prove in sito. Le prove sclerometriche, forniscono invece i valori di resistenza delle singole pareti delle discontinuità e, nel presente lavoro, sono state condotte eseguendo, su ogni piano investigato, 5 misure, andando successivamente a

scartare il valore più alto e più basso ottenuti e facendo la media dei tre rimanenti, come riportato in Fig. 4.7.

Prove sclerometriche: martello di Schmidt.									
Sist.	Direzione	Valori						Media	Qc (MPa)
1	2	60	62	60	62	59		61	270
2	4	46	38	30	53	34		39	60
3	4	52	48	36	48	35		44	85

Fig. 4.7 – Particolare della scheda geomeccanica riferita alle prove sclerometriche. Il sistema è riferito ai set di discontinuità individuati nell'analisi soggettiva, la direzione si riferisce all'orientazione del martello e corrisponde al numero riportato nel diagramma di Fig. 4.6B. Q_c è la resistenza a compressione uniassiale.

L'analisi oggettiva, come già detto, consiste nel prendere in considerazione tutte le discontinuità presenti nell'ammasso e di conseguenza tutti i sistemi.

Il procedimento è consistito nello stendere la fettuccia metrica nella direzione in cui si incontravano il maggior numero di fratture (generalmente quella orizzontale) per una lunghezza pari a quella investigata nell'analisi soggettiva (*scan-line*), annotando la giacitura (*dip direction; dip*) dei giunti e la relativa progressiva lungo la "*scan-line*", e ottenendo quindi una terna di dati per ogni punto di misura: direzione di immersione, inclinazione e progressiva. I dati giacaturali sono stati elaborati successivamente mediante il software "*Rockscience DIPS*", che ha restituito in forma grafica sul reticolo stereografico i poli dei piani che interessano l'ammasso; questi programmi hanno anche la possibilità di eseguire delle *contour map* con isodense, rappresentanti appunto linee ad egual densità di poli, e delimitanti aree contrassegnate da diverse tonalità cromatiche in funzione della quantità di poli situati nell'area. In questo modo è stato possibile, stabilendo a priori un valore minimo di densità dei punti e impostando la percentuale di area dello *stereo-plot* su cui il software calcola la densità dei poli, individuare quali e quante sono le famiglie di discontinuità dell'ammasso studiato, fornendo dunque un utile raffronto a quanto osservato nell'analisi soggettiva. La Fig. 4.8A mostra la rappresentazione stereografica dei poli dei piani ottenuta utilizzando i dati dell'analisi oggettiva effettuata per la stazione D46. Questi dati vengono riportati nella Fig. 4.8B insieme a quelli dell'analisi soggettiva dello stesso punto di rilievo.

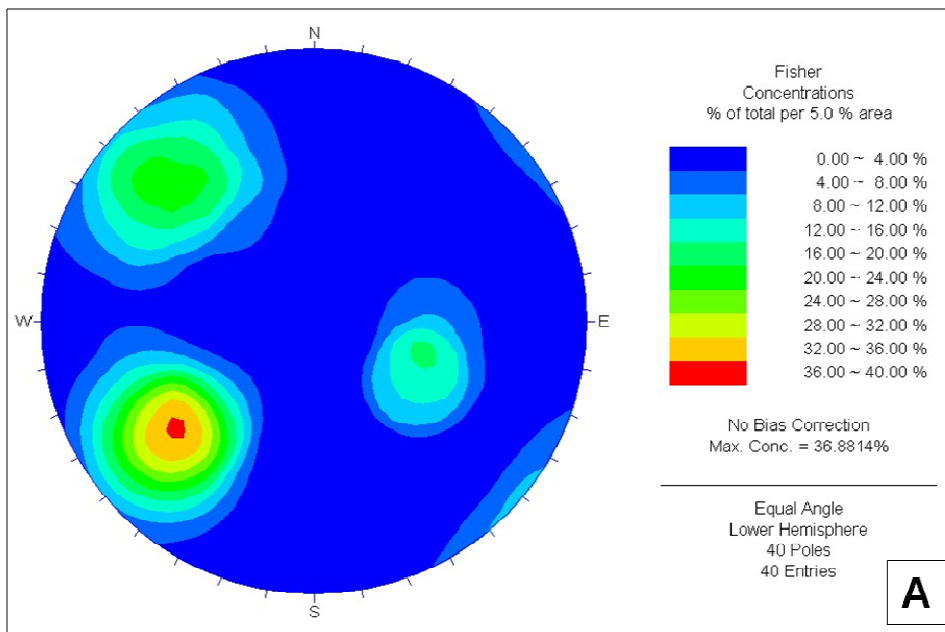


Fig. 4.8 – (A)
Rappresentazione stereografica dei poli dei piani nel reticolo di Wulff (ottenuta tramite il software “Rockscience DIPS”). Sono stati presi in considerazione i dati dell’analisi oggettiva della stazione geomeccanica D46. (B) Tabella dei dati ottenuti da analisi soggettiva e analisi oggettiva per la stazione D46.

Analisi soggettiva																					
1° Sistema	Immersione (°) 300										Inclinazione (°) 45					Media					
Spaz. (cm)	32	13	8	7	11	5	25													14,4	
2° Sistema	Immersione (°) 55										Inclinazione (°) 60					Media					
Spaz. (cm)	12	14	18	15	4	6	4	8	7	4	3	5	3	6						7,8	
3° Sistema	Immersione (°) 130										Inclinazione (°) 70					Media					
Spaz. (cm)	8	14	11	5	20	10	17	23	19	20										14,7	
4° Sistema	Immersione (°)										Inclinazione (°)					Media					
Spaz. (cm)																					
Analisi oggettiva (stesa orizzontale)																					
Prog. (cm)	2	5	17	11	29	22	52	65	70	72	71	46	38	88	90	94	93	103	111	114	123
Imm. (°)	50	50	140	90	150	60	130	120	140	50	260	40	40	160	150	140	50	140	300	60	60
Incl. (°)	50	50	55	60	50	70	70	70	75	75	40	80	65	70	70	75	60	85	45	75	65
Prog. (cm)	142	132	150	143	149	154	159	161	170	193	180	161	173	196							
Imm. (°)	55	300	270	50	50	50	50	45	50	70	200	120	120	260							
Incl. (°)	70	50	45	60	60	65	70	70	70	70	80	80	80	55							

In questo caso il secondo sistema dell’analisi soggettiva corrisponde perfettamente al maggiore picco di densità dei poli, e ciò concorda anche col valore di spaziatura media calcolato tramite analisi soggettiva (8 cm). Anche gli altri due sistemi trovano comunque corrispondenza tra le due diverse tipologie di analisi. In generale si è visto come, nelle stazioni geomeccaniche eseguite, le due tipologie di analisi avessero una buona corrispondenza, salvo casi sporadici.

Una volta individuati i sistemi di discontinuità anche tramite analisi oggettiva, è stato possibile ricavarne anche la spaziatura reale media (X_n). Infatti occorre far notare come la distanza tra due successive discontinuità appartenenti alla medesima famiglia, ricavabile dalle misure progressive, rappresenti la spaziatura apparente (X_d), come illustrato in Fig. 4.9.

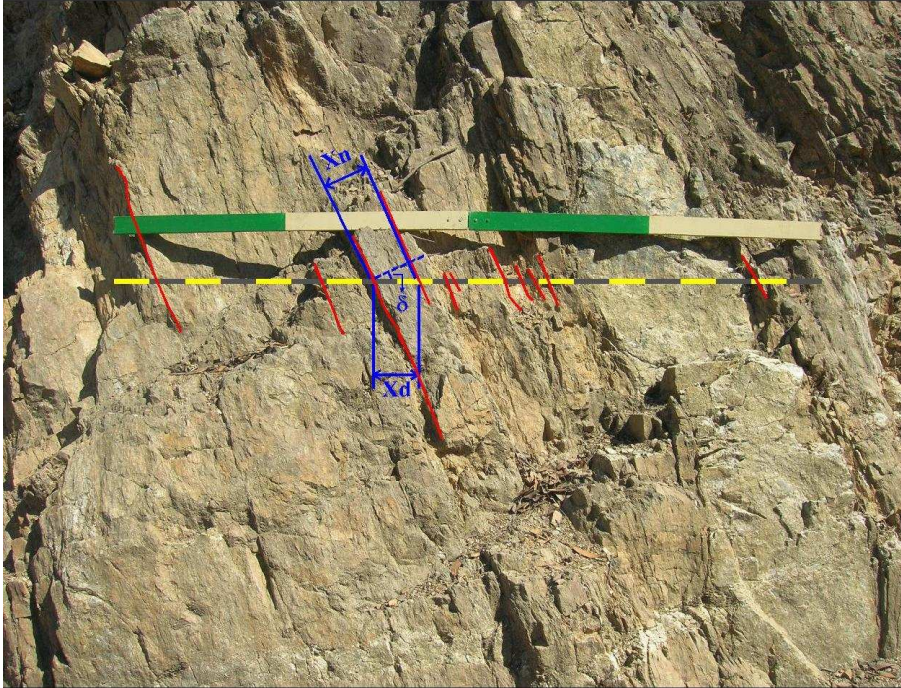


Fig. 4.9 – Spaziatura reale (X_n) e spaziatura apparente (X_d) di due superfici di discontinuità appartenenti allo stesso sistema.

Analiticamente si può ricavare la spaziatura reale (X_n) a partire dai valori di spaziatura apparente (X_d) attraverso l'utilizzo della seguente relazione

$$X_n = X_d * \cos \delta$$

dove δ è l'angolo acuto tra la linea di scansione e la normale media del set di discontinuità considerato. Questo angolo si può ricavare dalla formula

$$\cos \delta = \text{ASS} [\cos(\alpha_N - \alpha_S) * \cos \beta_N * \cos \beta_S + \sin \beta_N * \sin \beta_S]$$

dove ASS indica il valore assoluto, α_N e β_N rappresentano la direzione e l'inclinazione della normale al piano di discontinuità, mentre α_S e β_S la direzione e l'inclinazione della linea di scansione. La direzione della linea di scansione coincide con quella del fronte di affioramento, mentre la sua inclinazione (β_S) è pari a zero. Per tale motivo la precedente relazione si può così semplificare

$$\cos \delta = \text{ASS} [\cos(\alpha_N - \alpha_S) * \cos \beta_N].$$

Per ultimo è stato determinato il numero di discontinuità per metro cubo (J_v). Le norme I.S.R.M. definiscono tale indice secondo la relazione di Palmström (1982, 1985, 1986)

$$J_v = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{S_i} \right)$$

dove S_i è la spaziatura (espressa in m) ricavata tramite analisi soggettiva od oggettiva, di ognuno degli n sistemi di discontinuità individuati. L'utilizzo di questa relazione implica una predefinita relazione tra il valore di I_b e quello di J_v . Ai fini di questo lavoro, come sarà più chiaro tra breve, è invece necessario che i due indici, pur rappresentando due facce della stessa medaglia (il grado di fratturazione di un ammasso roccioso), scaturiscano da metodologie di acquisizione ben distinte e aventi differenti finalità. Se infatti l' I_b scaturisce dalle analisi condotte sulle discontinuità appartenenti a sistemi ben individuati in sito, il J_v è espressione del reale e totale numero di discontinuità presenti nell'ammasso, sia quelle sistematiche che quelle *random*. Per tale motivo si è deciso di ottenere il valore di J_v secondo la seguente procedura.

Per ottenere il numero di discontinuità volumetrico è necessario partire dal numero di discontinuità per metro lungo i tre assi cartesiani. Per tale motivo è stato misurato il numero di discontinuità lungo l'orizzontale, lungo la verticale e ortogonalmente rispetto all'area dell'affioramento. Quest'ultimo valore è ottenibile in un numero limitatissimo di casi, laddove il taglio stradale curvi mettendo in affioramento una sezione tridimensionale dell'ammasso roccioso. Per ovviare al problema, è stato sostituito questo valore con il numero di discontinuità per metro "obliquo", ovvero con una stesa inclinata di circa 45° rispetto all'orizzontale.

Numerose osservazioni hanno evidenziato come anche alla scala dell'affioramento il grado di fratturazione degli gneiss subisse repentine variazioni, il più delle volte dovute a variazioni nella composizione petrografica tipica di queste formazioni. Per tale motivo, al fine di ottenere un valore quanto più rappresentativo possibile dello stato di fratturazione dell'intero affioramento, in ogni stazione sono state eseguite tre stese orizzontali, tre verticali e tre oblique su cui è stato misurato il valore di J_v . Il valore di J_v lineare per le tre stese orizzontali è stato calcolato dalla media delle tre misure effettuate, secondo la formula

$$J_{vH\text{medio}} = \frac{J_{vH1} + J_{vH2} + J_{vH3}}{3}$$

dove i termini corrispondono a quelli riportati in Fig. 4.10. Analogamente sono stati calcolati i valori del J_v verticale ed obliquo.

La media dei tre J_v medi ottenuti nelle tre direzioni principali ha consentito di definire il J_v volumetrico dell'ammasso roccioso, secondo la formula

$$J_v = \frac{J_{vH\text{medio}} + J_{vV\text{medio}} + J_{vO\text{medio}}}{3}$$

La Fig. 4.11 mostra come il J_v così misurato rappresenti al meglio il grado di fratturazione dell'ammasso roccioso.

Jv standard	Jv H ₁	22,5	Jv H ₂	18,0	Jv H ₃	21,5	Jv H medio	20,7
	Jv V ₁	16,7	Jv V ₂	22,7	Jv V ₃	23,3	Jv V medio	20,9
	Jv O ₁	24,0	Jv O ₂	18,0	Jv O ₃	19,0	Jv O medio	20,3
							Media totale Jv	20,6

Fig. 4.10 – Stralcio della scheda di rilievo geomeccanico utilizzata in campagna relativo all'acquisizione e calcolo dei valori di J_v .

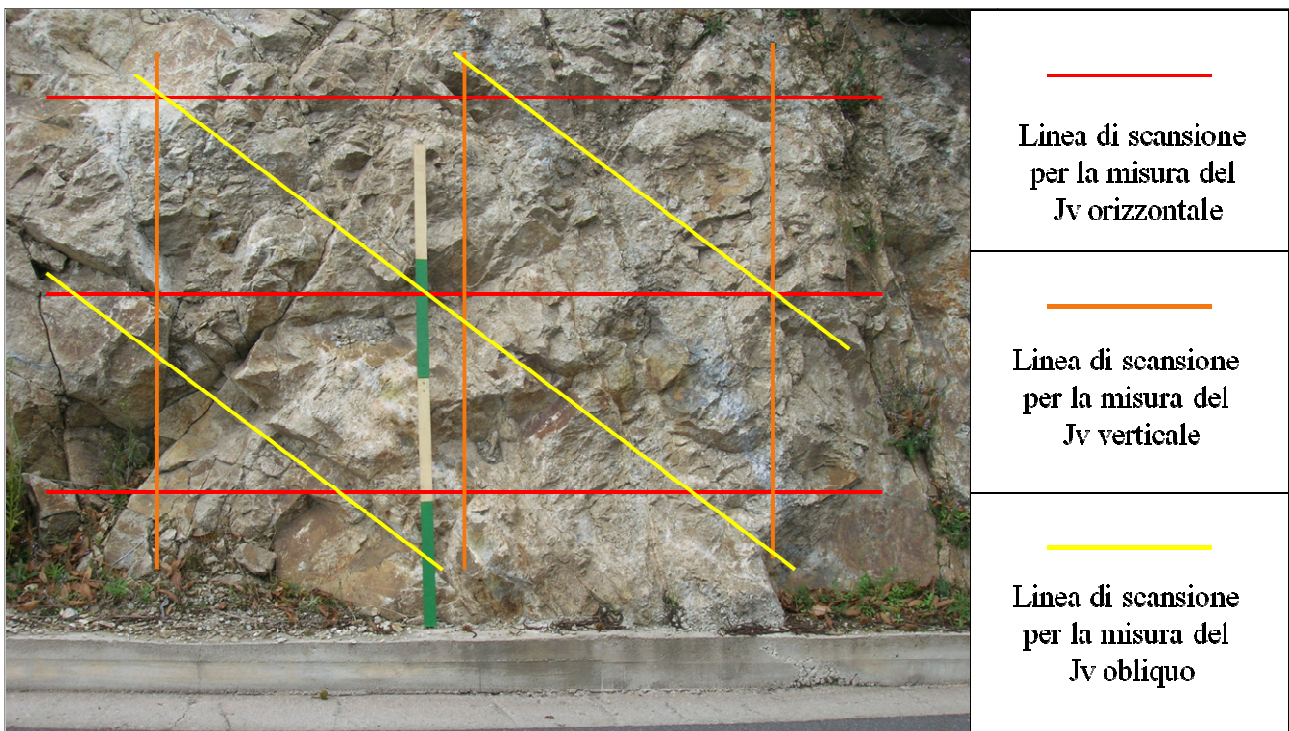


Fig. 4.11 – Reticolo di 9 linee di scansione utilizzato per il calcolo del J_v volumetrico caratteristico dell'intero ammasso roccioso analizzato.

Nell'Appendice 2 vengono riportate le schede semplificate di tutti i rilievi geomeccanici effettuati su fronti di affioramento. In particolare, vengono riportati:

- i dati generali della stazione geomeccanica;
- i differenti sistemi di discontinuità individuati tramite analisi soggettiva, con relativa giacitura, numero di discontinuità ad essa appartenenti, spaziatura media e valore di Q_c ;
- proiezione stereografica dei sistemi di discontinuità e della direzione del fronte di affioramento;

- valori di J_v lineare lungo i tre piani principali (orizzontale, verticale e obliquo);
- valori di J_v e I_b relativi alla stazione geomeccanica;
- foto dell'affioramento con scala (la sbarra bianca e verde è lunga in totale 2 m).

4.1.2 Correlazione tra J_v e I_b

Non in tutti i rilievi geomeccanici di superficie è stato possibile ricavare tutti i dati secondo quanto richiesto nella scheda di rilievo *standard*. Infatti, in alcuni rilievi geomeccanici, e specificatamente quelli denominati con le lettere “Z”, “S” ed “STZ”, sono stati misurati esclusivamente il valore di J_v e sono state eseguite le prove sclerometriche. Queste ultime, in assenza di sistemi di discontinuità riconosciuti, sono state condotte su piani di discontinuità casuali. Il non aver eseguito totalmente i rilievi, come descritto nel paragrafo precedente, è dipeso dall'impossibilità di riconoscere alcuna famiglia di discontinuità. Nella maggior parte dei casi ciò è stato causato dall'elevato grado di fratturazione dell'ammasso (a volte completamente frantumato o addirittura cataclasato), con fratture estremamente ravvicinate. In ogni caso, l'aver determinato, anche in questi punti il valore di J_v ha consentito, tramite semplici correlazioni, di poter stimare, seppur con un certo grado di incertezza, il valore di I_b . Infatti, l'elevato numero di dati ricavato nelle 72 stazioni complete (il fatto che il numero di stazioni complete sia uguale a quello delle incomplete è un puro caso) ha consentito di stabilire una correlazione tra il J_v e l' I_b . E' facilmente intuibile sulla base del significato fisico dei due indici che tra essi possa esistere un rapporto inversamente proporzionale, in quanto, in linea generale, tanto maggiore sarà il numero di discontinuità presenti in un ammasso roccioso (J_v), tanto minore sarà la dimensione dei blocchi di roccia (I_b) che costituiranno quello stesso ammasso. Nel grafico di Fig. 4.12 vengono riportati, sul piano J_v - I_b , i dati empirici ricavati nelle stazioni geomeccaniche complete.

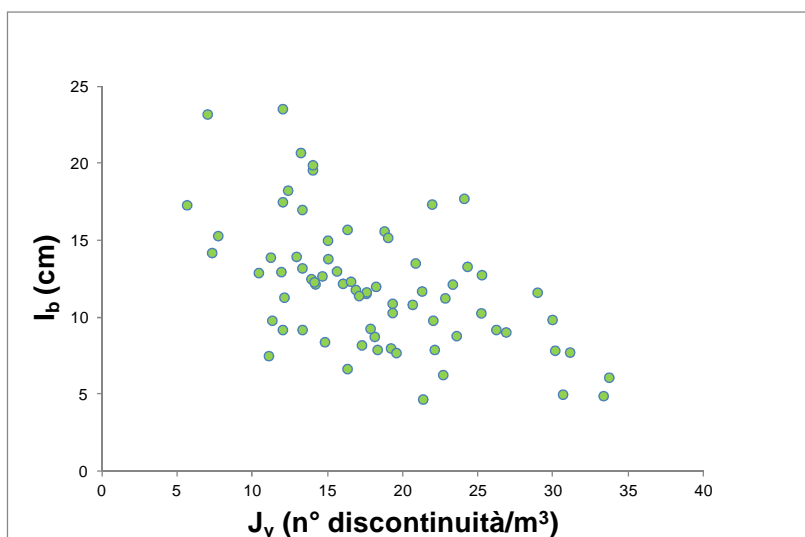


Fig. 4.12 – Grafico J_v - I_b ricavato dalle 72 stazioni geomeccaniche complete.

Al fine di ottenere una correlazione valida tra i due indici si è deciso di suddividere i valori di J_v in intervalli discreti ed omogenei. La Tab. 4.2 mostra i valori di J_v misurati nelle 72 stazioni complete, mentre il grafico di Fig. 4.13 mostra il diagramma di frequenza di occorrenza dei valori di J_v . In prima approssimazione questo diagramma di frequenza evidenzia una distribuzione di tipo tetramodale. Per ogni singola moda, gli intervalli di J_v sono i seguenti:

- 1) J_v compreso tra 6 e 8, con picco di frequenza pari a 2;
- 2) J_v compreso tra 10 e 19, con picco di frequenza pari a 6;
- 3) J_v compreso fra 20 e 26 con picco di frequenza pari a 4;
- 4) J_v compreso fra 30 e 33 con picco di frequenza pari a 2.

Si può notare, inoltre, come l'ampiezza dei picchi di frequenza delle mode estreme sia inferiore di quelle ricadenti nella parte centrale dello stesso diagramma. Ciò potrebbe far supporre, con una minore approssimazione, una distribuzione unimodale delle frequenze misurate.

ID	J_v	ID	J_v	ID	J_v
D1	15	D26	24	ST4	21
D2	6	D27	31	ST5	19
D3	14	D28	17	ST6	27
D4	12	D29	11	ST7	18
D5	13	D30	17	ST8	21
D6	19	D31	8	ST9	29
D7	11	D32	12	ST10	22
D8	18	D33	22	ST25	34
D9	13	D34	22	GM1	23
D10	25	D35	16	GM2	23
D12	15	D36	10	GM3	7
D13	21	D37	7	GM4	15
D14	30	D38	19	GM5	19
D15	18	D39	14	GM6	33
D16	18	D40	14	GM7	12
D17	19	D41	16	GM8	14
D18	13	D42	18	GM9	31
D19	11	D43	12	GM10	16
D20	25	D44	13	GM11	16
D21	26	D45	18	GM12	21
D22	17	D46	14	GM13	23
D23	24	ST1	12	GM14	12
D24	13	ST2	24	GM15	20
D25	15	ST3	30	GM16	17

Tab. 4.2 – Valori di J_v ricavati nelle 72 stazioni geomeccaniche complete.

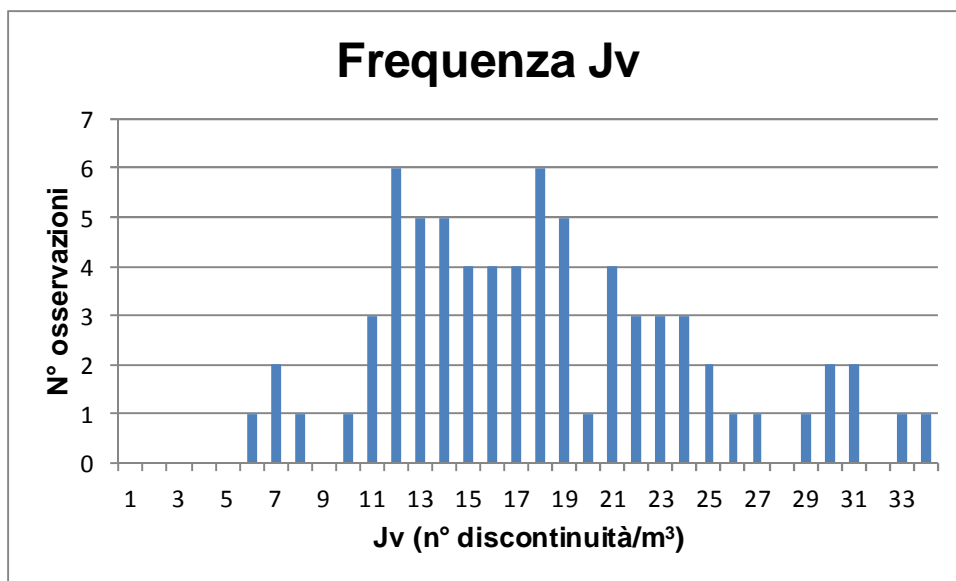


Fig. 4.13 – *Diagramma di frequenza di occorrenza dei valori di J_v ricavati nelle 72 stazioni geomeccaniche complete.*

Nella suddivisione in classi discrete dei valori di J_v si è tenuto conto, oltre che della distribuzione modale, anche della rappresentatività delle misure contenute in ogni singola classe, ossia la presenza di un numero di osservazioni minimo in ogni singolo intervallo discreto. Da ciò ne è scaturita la suddivisione in sei intervalli, ognuno dei quali con un'ampiezza pari a 5 discontinuità/m³. In pratica ad ogni picco di frequenza delle mode estremo corrisponde un intervallo discreto, mentre ad ogni picco di frequenza interno corrispondono due intervalli. La Fig. 4.14 mostra la suddivisione in intervalli discreti dei valori di J_v . In particolare, ogni intervallo discreto è rappresentato così da una coppia di numeri, uno dato dal valore centrale di J_v , l'altro dalla media dei valori di I_b corrispondenti alle stazioni geomeccaniche aventi J_v appartenente all'intervallo stesso. Da queste coppie di valori è stata ricavata la curva di correlazione tra il J_v e l' I_b (Fig. 4.14). Come si può vedere, la dipendenza tra J_v e I_b si esplica tramite interpolazione di tipo logaritmico, cui è associata la seguente equazione

$$I_b \text{ (cm)} = -5,76 \ln(J_v) + 27,48.$$

E' importante notare come l'equazione così ricavata presenti un coefficiente di regressione (R^2) elevato, pari a 0,9. Ciò significa che se volessi stimare il valore di I_b a partire da quello di J_v avrei una probabilità del 90% di successo. Più cautelativamente, è opportuno stimare non un valore esatto dell' I_b , bensì un suo intervallo di variabilità. Ciò è stato fatto considerando la deviazione standard dei valori di I_b appartenenti ad ogni singolo intervallo di J_v illustrato in Fig. 4.14. L'intervallo di variabilità dell' I_b è stato così delimitato verso l'alto e verso il basso rispettivamente sommando o sottraendo al valore medio dell' I_b il valore della deviazione standard. Ciò è stato fatto per ogni intervallo discreto di J_v precedentemente individuato. A partire dai valori massimi di I_b è stata interpolata la curva I_b - J_v in verde nella Fig. 4.15, avente la seguente equazione

$$I_{bMAX} \text{ (cm)} = -6,09 \ln(J_v) + 30,06.$$

Analogamente, in rosso viene contrassegnata la curva ricavata a partire dai valori minimi di I_b , la cui equazione è

$$I_{bMIN} \text{ (cm)} = -5,43 \ln(J_v) + 24,90.$$

Anche queste equazioni presentano un R^2 elevato.

Tutto ciò ci porta ad isolare un'area del grafico, evidenziata in rosso in Fig. 4.15, che rappresenta la variabilità dell' I_b in corrispondenza dei singoli J_v che vengono presi in considerazione. Grazie a tale grafico è così possibile ricavare analiticamente il valore di I_b laddove le condizioni di sito non lo hanno permesso. E' necessario sottolineare come le correlazioni qui proposte siano riferibili solo alla specifica litologia analizzata (gneiss) e solo alla porzione di territorio in cui sono state effettuate le indagini geomeccaniche. E' evidente come esse siano infatti fortemente influenzate sia dalla natura degli ammassi rocciosi analizzati, sia dalle condizioni di stress cui questi siano stati sottoposti nella loro storia.

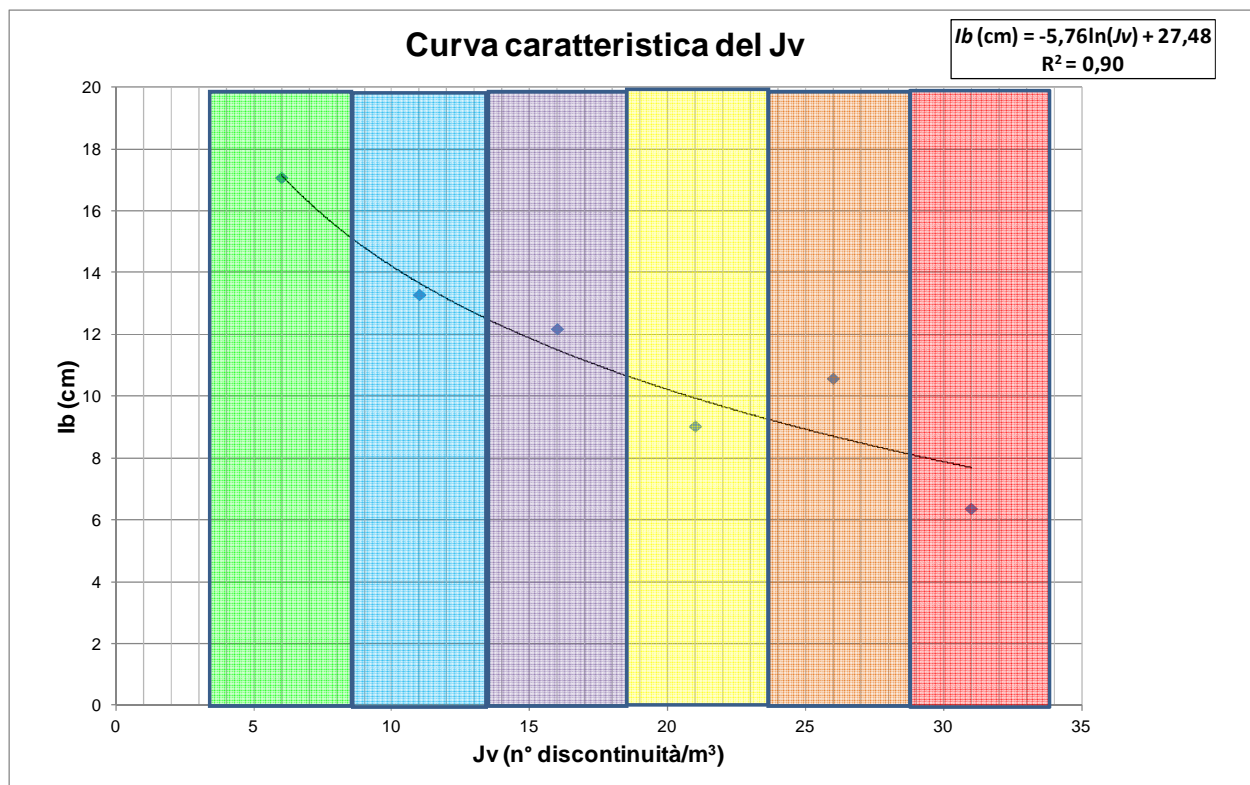


Fig. 4.14 – *Suddivisione in intervalli discreti omogenei dei valori del J_v e curva di correlazione tra J_v e I_b .*

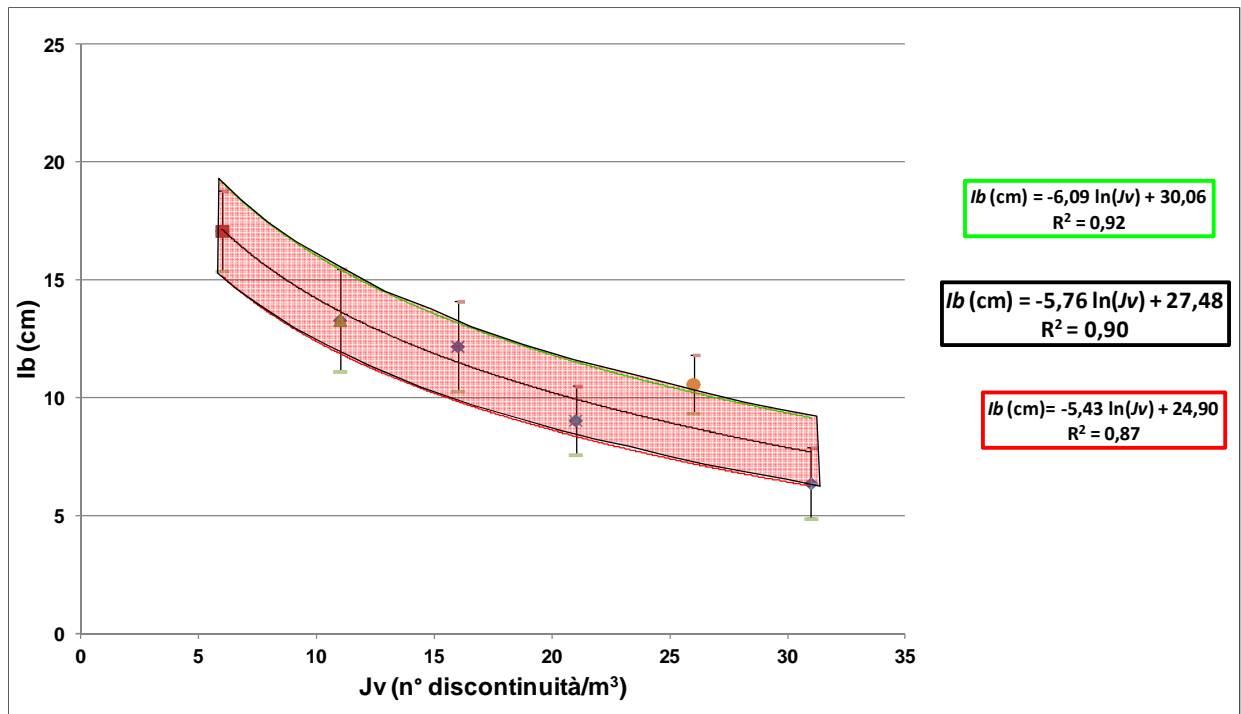


Fig. 4.15 – Curva di correlazione tra J_v e I_b e intervallo di variabilità nella stima dei valori di I_b (area in rosso), definito a partire dalle deviazioni standard calcolate per il J_v .

4.1.3 Sintesi dei dati dei rilievi in superficie e confronto con i metodi tradizionali

E' ora opportuno fare un breve punto su quanto scaturito dai numerosi rilievi geomeccanici condotti sui fronti di affioramento in superficie. Questi rilievi hanno consentito di ottenere un significativo numero di dati geomeccanici quantitativi riguardanti il grado di fratturazione degli gneiss. Nel corso di questo lavoro sono stati altresì condotti diversi rilievi (14) su fronti di affioramento dei graniti riferibili al complesso di Villa San Giovanni. Dato il numero ridotto in confronto ai rilievi su gneiss e soprattutto al fatto che non sono state condotte analisi di stabilità di frane nelle aree di affioramento dei graniti, si è preferito, anche per meglio focalizzare l'obiettivo del lavoro, non riportare in questa sede tali dati.

Dato che lo scopo del lavoro è quello di caratterizzare quantitativamente le proprietà della fratturazione presente negli ammassi rocciosi analizzati, i dati più interessanti ricavati dalle stazioni geomeccaniche sono quelli riguardanti il numero di discontinuità per metro cubo (J_v) e la dimensione caratteristica del blocco di roccia costituente l'ammasso stesso (I_b). In Tab. 4.2 vengono sintetizzati tutti i valori di J_v , I_b e Q_c ricavati dai rilievi geomeccanici. Occorre ricordare che i valori di I_b per le stazioni contrassegnate con le lettere "Z", "S" ed "STZ" sono stati ricavati attraverso la relazione proposta nel precedente paragrafo. Nella stessa tabella vengono riportate le coordinate e la

quota riferite ad ogni singola stazione, nonché il tipo di ammasso (Ercoli, 1981), il numero di sistemi di discontinuità riconosciuti e la spaziatura minima riferita ad un singolo *set*. Inoltre, è stato calcolato, ovviamente solo per le stazioni geomeccaniche complete, il valore di J_v a partire dai valori di spaziatura misurati per ogni singolo sistema riconosciuto in sito (J_{v2} in tabella), secondo la formula di Palmström (1982, 1985, 1986) già vista in precedenza

$$J_{v2} = \sum_{i=1}^n \left(\frac{1}{S_i} \right)$$

dove S_i è la spaziatura (espressa in m) ricavata tramite analisi soggettiva od oggettiva, di ognuno degli n sistemi di discontinuità individuati. In linea generale si può notare come i valori di J_v misurati come numero di discontinuità su metro lineare, siano inferiori rispetto a quelli calcolati analiticamente a partire dai valori di spaziatura dei sistemi di discontinuità riconosciuti ($J_{v1} < J_{v2}$). Nel nostro caso si ritengono più attendibili i valori ricavati col primo metodo, proprio per l'importanza che si è voluto dare ai dati quantitativi raccolti direttamente in sito. Inoltre, e l'importanza di ciò sarà più chiara nel prossimo capitolo, il dato così misurato ci consente di avere, per ogni rilievo, due parametri quantitativi sì legati fra loro, come dimostrato nel paragrafo precedente, ma allo stesso tempo indipendenti, in quanto misurati con modalità differenti.

Per meglio avere un'idea circa la qualità degli ammassi rocciosi studiati è stato condotto un confronto con i più classici e utilizzati metodi classificativi. Innanzitutto è stato calcolato il valore di RQD (*Rock Quality Designation Index*) definito come la percentuale di recupero di carotaggio in roccia di spezzoni con lunghezza superiore ai 10 cm rispetto alla lunghezza totale perforata, secondo la formula

$$RQD (\%) = \frac{\sum \text{Lunghezza spezzoni} \geq 10 \text{ cm}}{\text{Lunghezza totale carotaggio}}$$

In questo caso il valore di RQD (%) è stato calcolato a partire dai valori di J_v , secondo la formula di Palmström (1982)

$$RQD (\%) = 115 - 3,3 * J_v$$

sia utilizzando i dati di J_{v1} che quelli di J_{v2} . Ottenuti i valori di RQD (%) è stato possibile utilizzare la classificazione di Deere (1964) seguendo la tabella riportata in Fig. 4.16. Il grafico di Fig. 4.17 mostra che circa la metà degli ammassi presenta una qualità media (discreta), un numero elevato presenta qualità scadenti o molto scadenti, mentre solo il 15% ha una buona od ottima qualità.

Questa considerazione conferma, seppur solo qualitativamente, quanto osservato in campagna circa la qualità degli ammassi.

R.Q.D. (%)	Qualità della roccia
0 - 25	molto scadente
26 - 50	scadente
51 - 75	discreta
76 - 90	buona
91 - 100	eccellente

Fig. 4.16 – Classificazione degli ammassi rocciosi proposta da Deere (1964) in funzione dell'RQD (%).

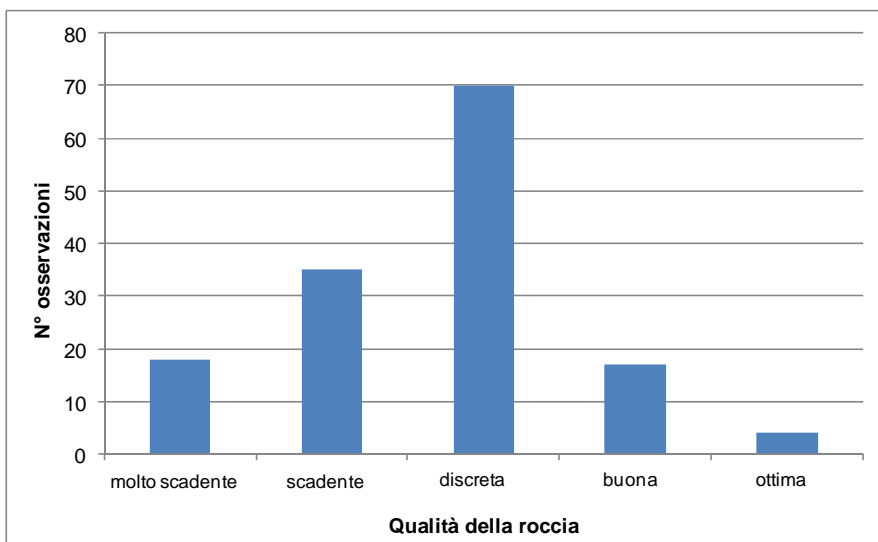


Fig. 4.17 – Diagramma di frequenza per le cinque categorie di ammassi rocciosi proposti nella classificazione di Deere (1964).

Sempre nella Tab. 4.3 sono riportati i punteggi RMR (*Rock Mass Rating*) ricavati secondo la classificazione di Bieniawski (1973 e successive modifiche). In particolare, vengono riportati i valori di RMR_{dry} e RMR_{basic} (BRMR). La classificazione RMR prende in considerazione cinque parametri relativi alle caratteristiche della roccia intatta e dell'ammasso roccioso (BRMR), oltre ad un indice di correzione (I_c) che è funzione dell'orientazione dei giunti in relazione al problema in esame (gallerie, fondazioni, versanti) ($RMR = BRMR - I_c$). I parametri che vengono presi in considerazione in questa classificazione sono:

- 1) resistenza a compressione uniassiale della roccia intatta;
- 2) valore dell'RQD (%);
- 3) spaziatura delle discontinuità;
- 4) condizioni dei giunti;
- 5) condizioni idrauliche dei giunti.

Il valore di BRMR altro non è che la somma dei punteggi attribuiti all'ammasso roccioso per ogni singola voce, secondo quanto riportato nella tabella di Fig. 4.18. Il valore di RMR_{dry} scaturisce dalla somma dei punteggi assegnati solo per i primi quattro parametri. Infine è stato calcolato il valore di GSI (*Geological Strength Index*) (Hoek et alii, 1995; Marinos & Hoek, 2000), secondo la formula

$$GSI = BRMR - 5$$

valida solo per BRMR superiori a 23.

Mediamente i valori di BRMR corrispondono ad una classe di qualità discreta dell'ammasso roccioso. Questi punteggi sono influenzati soprattutto dal fatto che in superficie gli ammassi si presentano asciutti, e pertanto il parametro relativo alle condizioni idrauliche incide positivamente, come dimostrano i valori di RMR_{dry} . Questo indica che, soffermandoci alle caratteristiche di resistenza e fratturazione degli ammassi, questi presentano generalmente qualità da scadenti a discrete, e solo più raramente buone, in accordo con la classificazione di Deere (1964) e con le osservazioni di sito.

PARAMETRI		INTERVALLI DI VALORI							
1	RESISTENZA ROCCIA INTATTA	Carico puntuale(Mpa)	>10	4-10	2-4	1-2	Non applicabile		
		Compressione monoassiale(MPa)	>250	100-250	50-100	25-50	5-25	1-5	<1
	Indice		15	12	7	4	2	1	0
2	RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25		
	Indice		20	17	13	8	3		
3	SPAZIATURA GIUNTI (m)		>2	0,6-2	0,6-0,2	0,06-0,2	<0,06		
	Indice		32	15	10	8	5		
4	CONDIZIONE GIUNTI		Superfici molto scabre non continue. Pareti roccia non alterate	Superfici scabre. Apertura <1mm. Pareti roccia leg.alterate	Superfici scabre. Apertura <1mm. Pareti roccia molto alterate	Superfici lisce o laminate o riempimento <5mm o apertura 1-5mm. Giunti continui	Riempimento tenero con spessore >5mm o giunti aperti >5 mm. Giunti continui		
	Indice		30	25	20	10	0		
5	CONDIZIONI IDRAULICHE	Afflusso per 10m di lunghezza del tunnel (litri/min)	Assente	<10	10-25	25-125	>125		
		Rapporto Pressione acqua nei giunti/Pressione naturale in sito	0	<0,1	0,1-0,2	0,2-0,5	>0,5		
		Condizioni generali	Giunti asciutti	Umidi	Bagnati	Stillicidio	Venute d'acqua		
Indice			15	10	7	4	0		

Fig. 4.18 – Attribuzione dei punteggi per la classificazione di Bieniawski (1979).

ID Stazione	Q. (m s.l.m.)	Longitudine	Latitudine	Litologia	Tipo ammasso	Q _c (MPa)	N° set	l _b (cm)	Spaziatura set minima (cm)	J _{v1}	J _{v2}	RQD ₁ (115-3.3j _{v1})	RQD ₂ (115-3.3j _{v2})	RMR _{dry}	BRMR	GSI (BRMR - 5)
D1	275	565357,1982	4233884,3690	Gneiss	Irregolare	55,3	3	12,7	10,5	14,6	24,4	67	35	43	58	53
D2	280	566017,4447	4234252,0626	Gneiss	Colonnare	116,3	4	17,3	13,4	5,6	21,2	96	45	52	67	62
D3	265	565682,7218	4234188,7945	Gneiss	Irregolare	34,7	3	12,2	10,1	14,2	25,6	68	30	40	55	50
D4	260	566077,4691	4234230,9191	Gneiss	Massiccio	107,0	1	18,3	18,3	12,4	5,5	74	97	52	67	62
D5	527	571965,5684	4237375,4399	Gneiss	Irregolare	24,5	3	13,2	9,9	13,3	24,0	71	36	38	53	48
D6	515	571884,8683	4237572,4862	Gneiss	Irregolare	34,7	3	10,9	10,0	19,3	27,9	51	23	35	50	45
D7	490	571906,2140	4237613,9126	Gneiss	Irregolare	42,3	3	9,8	8,3	11,3	31,2	78	12	35	50	45
D8	515	568615,1790	4235247,6254	Gneiss	Irregolare	24,3	3	8,8	7,3	18,1	35,8	55	0	33	48	43
D9	510	568570,9150	4235285,0098	Gneiss	Irregolare	112,0	3	14,0	11,4	12,9	22,8	72	40	48	63	58
D10	480	568483,5652	4235422,9441	Gneiss	Irregolare	18,2	3	12,8	9,4	25,2	25,3	32	32	38	53	48
D12	440	568686,1126	4235361,6532	Gneiss	Irregolare	69,0	3	13,8	8,5	15,0	25,1	65	32	43	58	53
D13	350	568821,6836	4235922,5999	Gneiss	Irregolare	82,3	3	10,8	8,0	20,6	30,4	47	15	43	58	53
D14	390	570731,4331	4236269,9333	Gneiss	Irregolare	20,5	3	7,9	6,4	30,1	39,0	16	0	33	48	43
D15	385	570699,9860	4236288,4820	Gneiss	Irregolare	104,0	3	11,6	9,1	17,6	26,7	57	27	48	63	58
D16	445	569640,6423	4236137,8048	Gneiss	Irregolare	84,7	3	11,6	9,1	17,6	26,7	57	27	43	58	53
D17	385	569323,0553	4236250,6441	Gneiss	Irregolare	66,0	1	8,0	8,0	19,2	12,5	52	74	38	53	48
D18	482	571425,8617	4237225,8124	Gneiss	Irregolare	30,6	2	17,0	14,4	13,3	12,1	71	75	40	55	50
D19	335	568184,4922	4235112,8128	Gneiss	Massiccio	23,3	2	7,5	5,1	11,1	29,6	78	17	25	40	35
D20	265	565767,3735	4234180,3420	Gneiss	Fratturato	20,0	3	10,3	8,4	25,2	29,9	32	16	33	48	43
D21	585	564442,2734	4232499,8200	Gneiss	Irregolare	30,5	3	9,2	7,3	26,2	33,4	29	5	35	50	45
D22	385	568301,4205	4235220,1266	Gneiss	Massiccio	32,3	3	11,8	7,8	16,9	27,8	59	23	40	55	50
D23	440	568332,6014	4235462,9753	Gneiss	Irregolare	24,5	3	13,3	9,6	24,3	25,2	35	32	38	53	48
D24	460	568451,8644	4235433,6487	Gneiss	Irregolare	33,2	5	9,2	6,8	13,3	48,2	71	0	35	50	45
D25	400	567011,1850	4233505,2437	Gneiss	Blocchi	63,3	4	8,4	5,6	14,8	38,7	66	0	32	47	42
D26	570	564870,7102	4232865,6902	Gneiss	Irregolare	42,7	3	8,8	7,3	23,6	34,9	37	0	35	50	45
D27	560	564813,1788	4233072,5251	Gneiss	Irregolare	46,4	4	5,0	3,8	30,6	67,0	14	0	27	42	37
D28	550	564816,7112	4232979,1025	Gneiss	Irregolare	24,5	3	8,2	5,2	17,3	41,1	58	0	30	45	40
D29	510	564827,1057	4233228,4210	Gneiss	Massiccio	43,5	2	13,9	10,9	11,2	15,1	78	65	40	55	50
D30	45	568318,7157	4236180,8458	Gneiss	Irregolare	64,7	3	11,4	9,3	17,1	27,0	59	26	43	58	53
D31	50	566829,5048	4234971,2388	Gneiss	Irregolare	42,8	3	15,3	10,1	7,7	21,6	90	44	40	55	50
D32	60	566862,0442	4235003,3718	Gneiss	Irregolare	35,7	3	11,3	7,3	12,1	29,4	75	18	40	55	50
D33	140	566960,4043	4235098,4097	Gneiss	Irregolare	17,7	3	7,9	5,0	22,1	46,5	42	0	30	45	40
D34	205	565252,2888	4234113,8255	Gneiss	Irregolare	28,0	4	9,8	9,0	22,0	122,0	42	0	35	50	45
D35	520	564860,3340	4233172,4829	Gneiss	Irregolare	25,0	3	12,2	10,6	16,0	25,1	62	32	40	55	50
D36	530	564857,7426	4233086,0488	Gneiss	Irregolare	38,3	3	12,9	9,4	10,4	24,9	81	33	40	55	50
D37	320	566743,3998	4234288,5711	Gneiss	Irregolare	35,3	3	14,2	8,6	7,3	23,5	91	37	40	55	50

Tab. 4.3A – Sintesi dei dati ricavati dalle stazioni geomeccaniche effettuate su fronti di affioramento in superficie.

ID Stazione	Q. (m s.l.m.)	Longitudine	Latitudine	Litologia	Tipo ammasso	Q _c (MPa)	N° set	l _b (cm)	Spaziatura set minima (cm)	J _{v1}	J _{v2}	RQD ₁ (115-3.3j _{v1})	RQD ₂ (115-3.3j _{v2})	RMR _{dry}	BRMR	GSI (BRMR - 5)
D38	490	565346,0603	4232883,4625	Gneiss	Irregolare	39,5	3	10,3	5,9	19,3	33,2	51	5	32	47	42
D39	510	565373,8770	4232920,0866	Gneiss	Irregolare	70,7	3	19,6	13,8	14,0	16,2	69	62	47	62	57
D40	505	565527,7568	4232994,9695	Gneiss	Irregolare	73,0	2	12,5	10,3	13,9	16,5	69	61	43	58	53
D41	515	565572,4489	4233030,6105	Gneiss	Irregolare	36,7	3	13,0	10,0	15,6	23,9	64	36	40	55	50
D42	145	564714,1671	4233946,6541	Gneiss	Irregolare	20,0	2	12,0	9,1	18,2	17,7	55	57	38	53	48
D43	410	569599,3159	4236198,3108	Gneiss	Irregolare	91,0	3	17,5	10,0	12,0	23,4	75	38	43	58	53
D44	58	562538,6149	4234434,1506	Gneiss	Irregolare	158,3	3	20,7	7,0	13,2	21,7	71	43	52	67	62
D45	65	562566,7100	4233936,9792	Gneiss	Irregolare	19,5	3	7,9	5,9	18,3	39,0	55	0	30	45	40
D46	460	563027,8891	4232543,7591	Gneiss	Irregolare	48,2	3	12,3	7,8	14,1	26,6	68	27	40	55	50
ST1	86	559588,7881	4232458,3071	Gneiss	Irregolare	46,5	4	13,0	10,1	11,9	32,2	76	9	40	55	50
ST2	385	560824,3436	4232683,0995	Gneiss	Irregolare	34,3	4	17,7	11,8	24,1	27,1	36	25	38	53	48
ST3	380	560773,9093	4232562,1887	Gneiss	Irregolare	45,3	3	9,9	8,3	29,9	31,7	16	10	35	50	45
ST4	369	560660,4132	4232620,6673	Gneiss	Irregolare	52,7	3	13,5	11,4	20,8	22,8	46	40	40	55	50
ST5	361	560564,8161	4232620,3690	Gneiss	Irregolare	29,0	3	15,6	14,3	18,8	19,3	53	51	38	53	48
ST6	269	560295,8204	4232931,3203	Gneiss	Irregolare	26,0	3	9,0	6,0	26,9	36,3	26	0	33	48	43
ST7	255	559573,6330	4232194,3010	Gneiss	Irregolare	47,3	3	9,3	7,6	17,8	33,7	56	4	35	50	45
ST8	251	559550,3927	4232227,8130	Gneiss	Irregolare	41,3	3	11,7	6,9	21,3	28,0	45	23	40	55	50
ST9	189	559516,6130	4232341,8624	Gneiss	Irregolare	66,0	3	11,6	8,9	28,9	26,8	19	26	40	55	50
ST10	154	560324,1591	4232268,0570	Gneiss	Irregolare	30,0	3	17,4	10,6	21,9	19,2	43	52	38	53	48
ST25	290	559599,3986	4232104,0118	Gneiss	Irregolare	49,0	3	6,1	4,6	33,7	51,4	4	0	26	41	36
GM1	145	560386,4649	4233228,3699	Gneiss	Irregolare	34,7	4	11,3	5,9	22,8	39,0	40	0	33	48	43
GM2	148	561179,4337	4233711,9986	Gneiss	Irregolare	54,0	5	12,2	1,3	23,3	83,4	38	0	33	48	43
GM3	133	561556,5844	4233801,5337	Gneiss	Irregolare	54,0	4	23,2	15,4	7,0	13,6	92	70	52	67	62
GM4	56	561553,0473	4233987,1831	Gneiss	Irregolare	39,0	2	15,0	8,3	15,0	16,7	66	60	45	60	55
GM5	408	560901,9127	4232729,5372	Gneiss	Irregolare	43,7	5	15,2	3,3	19,0	63,5	52	0	42	57	52
GM6	396	561333,6648	4233284,5073	Gneiss	Irregolare	31,3	3	4,9	3,1	33,3	66,8	5	0	27	42	37
GM7	156	561142,7295	4233672,7898	Gneiss	Irregolare	33,0	4	23,6	10,3	12,0	17,7	75	57	48	63	58
GM8	139	561586,2786	4233819,7115	Gneiss	Irregolare	38,3	3	19,9	7,9	14,0	20,5	69	47	42	57	52
GM9	152	560446,2182	4233202,6252	Gneiss	Irregolare	42,5	3	7,7	4,9	31,1	43,8	12	0	26	41	36
GM10	447	561530,5227	4233232,1479	Gneiss	Irregolare	26,7	3	15,7	8,7	16,3	26,0	61	29	44	59	54
GM11	308	561661,7922	4233379,7962	Gneiss	Irregolare	26,0	3	6,7	6,2	16,3	45,1	61	0	40	55	50
GM12	307	561681,0501	4233392,4459	Gneiss	Irregolare	38,7	4	4,7	4,5	21,3	61,0	45	0	35	50	45
GM13	464	561467,2471	4233149,4506	Gneiss	Irregolare	29,0	3	6,3	3,2	22,7	57,1	40	0	36	51	46
GM14	304	561817,1477	4233474,5090	Gneiss	Irregolare	45,7	3	9,2	6,0	12,0	35,5	75	0	45	60	55
GM15	389	561878,9550	4233040,6618	Gneiss	Irregolare	39,3	2	7,7	5,8	19,6	27,7	50	24	41	56	51
GM16	285	560323,3090	4232893,0882	Gneiss	Irregolare	30,1	3	12,3	11,4	16,5	24,5	60	34	43	58	53

Tab. 4.3B – Sintesi dei dati ricavati dalle stazioni geomeccaniche effettuate su fronti di affioramento in superficie.

ID Stazione	Q. (m s.l.m.)	Longitudine	Latitudine	Litologia	Tipo ammasso	Q _c (MPa)	N° set	l _b (cm)	Spaziatura set minima (cm)	J _{v1}	J _{v2}	RQD ₁ (115-3.3j _{v1})	RQD ₂ (115-3.3j _{v2})	RMR _{dry}	BRMR	GSI (BRMR - 5)
Z1	430	568791,2778	4235519,3758	Gneiss	Irregolare	77,5	/	11,3		16,7	/	60		43	58	53
Z2	420	568833,8500	4235626,3015	Gneiss	Irregolare	67,5	/	13,2		11,9	/	76		47	62	57
Z3	395	568860,7215	4235741,8805	Gneiss	Irregolare	112,0	/	8,4		27,5	/	24		43	58	53
Z4	390	569285,0637	4236274,8185	Gneiss	Irregolare	53,0	/	10,8		18,1	/	55		43	58	53
Z5	500	571480,2813	4237207,4594	Gneiss	Massiccio	17,4	/	12,4		13,8	/	69		38	53	48
Z6	365	568044,9697	4235089,6282	Gneiss	Irregolare	96,0	/	10,4		19,4	/	51		48	63	58
Z7	275	565841,8365	4234090,5756	Gneiss	Irregolare	30,0	/	11,4		16,3	/	61		40	55	50
Z8	270	565800,2505	4234128,0654	Gneiss	Fratturato	83,5	/	8,1		28,7	/	20		33	48	43
Z9	565	564364,8257	4232609,2715	Gneiss	Irregolare	22,4	/	9,2		24,1	/	35		33	48	43
Z10	570	564399,0536	4232554,3711	Gneiss	Irregolare	21,8	/	7,4		32,6	/	7		25	40	35
Z11	392	568186,4385	4235642,8545	Gneiss	Irregolare	34,0	/	7,0		34,9	/	0		27	42	37
Z12	423	568255,2781	4235522,1598	Gneiss	Irregolare	35,0	/	11,6		15,7	/	63		40	55	50
Z13	355	568240,6956	4235167,0797	Gneiss	Irregolare	58,0	/	8,7		26,0	/	29		38	53	48
Z14	452	568388,6427	4235442,1332	Gneiss	Irregolare	72,5	/	7,5		32,1	/	9		30	45	40
Z15	390	567043,7789	4233418,4480	Gneiss	Massiccio	33,1	/	10,2		20,2	/	48		35	50	45
Z16	418	566784,7252	4233512,8449	Gneiss	Irregolare	37,8	/	16,1		7,2	/	91		49	64	59
Z17	450	566753,8653	4233646,1862	Gneiss	Massiccio	36,7	/	11,4		16,3	/	61		40	55	50
Z18	465	566750,3465	4233759,0929	Gneiss	Irregolare	26,3	/	10,4		19,4	/	51		40	55	50
Z19	288	564913,9870	4233878,6448	Gneiss	Fratturato	34,1	/	6,9		35,4	/	0		27	42	37
Z20	53	568354,4639	4236054,3642	Gneiss	Irregolare	95,0	/	10,3		19,9	/	49		35	50	45
Z21	75	566855,5694	4235058,6565	Gneiss	Irregolare	34,5	/	8,7		26,0	/	29		35	50	45
Z22	85	566829,0776	4235087,3809	Gneiss	Irregolare	20,3	/	10,6		18,8	/	53		38	53	48
Z23	170	566972,7818	4234957,8894	Gneiss	Fratturato	38,0	/	9,5		22,6	/	40		35	50	45
Z24	115	566902,5569	4235090,0456	Gneiss	Fratturato	34,3	/	9,7		22,0	/	42		35	50	45
Z25	215	565325,3510	4234131,4639	Gneiss	Fratturato	28,0	/	8,4		27,3	/	25		30	45	40
Z26	178	565264,3380	4234156,9216	Gneiss	Irregolare	30,0	/	9,6		22,4	/	41		35	50	45
Z27	585	564852,9621	4232914,8068	Gneiss	Irregolare	75,5	/	11,7		15,4	/	64		43	58	53
Z28	390	565827,4178	4234007,2103	Gneiss	Irregolare	23,0	/	10,1		20,3	/	48		33	48	43
Z29	495	565464,4581	4232948,4792	Gneiss	Massiccio	70,5	/	12,2		14,2	/	68		43	58	53
Z30	505	566541,6680	4234050,1871	Gneiss	Irregolare	45,1	/	9,3		23,5	/	37		35	50	45
Z31	540	565197,0068	4232790,8818	Gneiss	Irregolare	24,0	/	10,5		19,1	/	52		38	53	48
Z32	140	564646,5520	4233907,4650	Gneiss	Fratturato	39,5	/	6,5		38,4	/	0		39	54	49
Z33	385	569579,6936	4236307,8865	Gneiss	Irregolare	50,5	/	12,6		13,3	/	71		43	58	53
Z34	70	562570,7641	4233969,0931	Gneiss	Fratturato	34,1	/	7,8		30,3	/	15		27	42	37
Z35	180	562710,5461	4233526,3491	Gneiss	Fratturato	18,5	/	8,2		28,4	/	21		28	43	38
Z36	223	563044,6121	4233125,2356	Gneiss	Irregolare	24,6	/	12,2		14,3	/	68		38	53	48

Tab. 4.3C – Sintesi dei dati ricavati dalle stazioni geomeccaniche effettuate su fronti di affioramento in superficie.

ID Stazione	Q. (m s.l.m.)	Longitudine	Latitudine	Litologia	Tipo ammasso	Q _c (MPa)	N° set	l _b (cm)	Spaziatura set minima (cm)	J _{v1}	J _{v2}	RQD ₁ (115-3.3j _{v1})	RQD ₂ (115-3.3j _{v2})	RMR _{dry}	BRMR	GSI (BRMR - 5)
Z37	260	563145,8156	4233103,9796	Gneiss	Irregolare	25,4	/	13,1		12,1	/	75		44	59	54
Z38	285	562963,4802	4232981,9231	Gneiss	Irregolare	21,0	/	12,7		13,1	/	72		38	53	48
Z39	415	562579,7882	4232722,6437	Gneiss	Irregolare	38,9	/	15,2		8,5	/	87		46	61	56
Z40	592	564409,2746	4232411,0738	Gneiss	Irregolare	22,8	/	12,4		13,7	/	70		38	53	48
D11	475	568547,3415	4235416,0808	Gneiss	Irregolare	45,5	/	12,6		13,2	/	71		40	55	50
S1	440	561615,6198	4233141,6738	Gneiss	Irregolare	38,0	/	12,7		13,0	/	72		38	53	48
S2	435	561625,6906	4233092,9354	Gneiss	Irregolare	44,0	/	14,9		8,9	/	86		44	59	54
S3	435	561646,0085	4233075,2165	Gneiss	Irregolare	44,0	/	15,7		7,8	/	89		44	59	54
S4	424	561664,3439	4233086,5320	Gneiss	Irregolare	38,0	/	13,2		12,0	/	75		42	57	52
S5	404	561832,5530	4233188,2797	Gneiss	Irregolare	38,0	/	13,4		11,4	/	77		42	57	52
S6	398	561839,4124	4233158,2582	Gneiss	Irregolare	44,0	/	14,0		10,4	/	81		44	59	54
S7	395	561867,2718	4233072,4906	Gneiss	Irregolare	32,0	/	9,8		21,4	/	44		33	48	43
S8	382	561946,2658	4232987,1859	Gneiss	Irregolare	37,0	/	11,5		16,1	/	62		38	53	48
S9	383	561880,0608	4233068,5414	Gneiss	Irregolare	44,0	/	14,1		10,2	/	81		44	59	54
S10	380	561856,8499	4233133,3578	Gneiss	Irregolare	37,0	/	10,9		17,7	/	57		38	53	48
S11	374	561822,3767	4233281,1109	Gneiss	Irregolare	37,0	/	11,2		16,9	/	59		38	53	48
S12	350	561660,2182	4233307,5709	Gneiss	Irregolare	38,0	/	12,1		14,3	/	68		38	53	48
S13	347	561602,6615	4233381,9243	Gneiss	Irregolare	37,0	/	11,4		16,4	/	61		38	53	48
S14	310	561646,6356	4233401,7106	Gneiss	Irregolare	38,0	/	13,2		12,0	/	75		42	57	52
S15	296	561693,1105	4233422,9806	Gneiss	Irregolare	44,0	/	14,0		10,4	/	81		44	59	54
S16	299	561867,1390	4233455,4262	Gneiss	Irregolare	44,0	/	14,5		9,6	/	83		44	59	54
S17	335	561719,3192	4233379,2933	Gneiss	Irregolare	37,0	/	11,8		15,2	/	65		38	53	48
S18	345	561722,7869	4233330,3945	Gneiss	Irregolare	37,0	/	11,6		15,7	/	63		38	53	48
S19	454	561379,9286	4233116,6050	Gneiss	Irregolare	37,0	/	11,4		16,2	/	62		38	53	48
S20	468	561472,0126	4233116,6453	Gneiss	Irregolare	38,0	/	13,6		11,1	/	78		42	57	52
S21	471	561486,6743	4233086,8737	Gneiss	Irregolare	32,0	/	9,7		22,0	/	42		33	48	43
S22	420	560950,9921	4233096,1999	Gneiss	Irregolare	37,0	/	11,7		15,6	/	64		38	53	48
S23	374	561375,1356	4233344,1469	Gneiss	Irregolare	32,0	/	9,6		22,2	/	42		33	48	43
S24	448	561437,7985	4233147,3977	Gneiss	Irregolare	37,0	/	10,4		19,6	/	50		38	53	48
S25	392	561327,9117	4233317,8001	Gneiss	Irregolare	32,0	/	8,6		26,6	/	27		35	50	45
S26	154	561153,2165	4233712,6746	Gneiss	Irregolare	32,0	/	9,3		23,3	/	38		33	48	43
S27	23	560081,1894	4233450,9930	Gneiss	Irregolare	30,0	/	7,8		30,3	/	15		27	42	37
S28	52	560698,5338	4233749,6194	Gneiss	Irregolare	38,0	/	13,5		11,3	/	78		42	57	52
S29	376	561334,6237	4233343,4283	Gneiss	Irregolare	38,0	/	12,7		13,1	/	72		38	53	48
STZ1	190	559500,7660	4232346,2905	Gneiss	Irregolare	54,5	/	10,1		18,1	/	55		40	55	50
STZ2	69	559331,4460	4232524,6698	Gneiss	Fratturato	21,5	/	9,6		22,9	/	39		33	48	43

Tab. 4.3D – Sintesi dei dati ricavati dalle stazioni geomeccaniche effettuate su fronti di affioramento in superficie.

4.2 I RILIEVI GEOMECCANICI SU FRONTI DI SCAVO IN GALLERIA

Nell'avvicinarmi al presente lavoro, uno dei motivi di maggiore interesse è stata la possibilità di poter svolgere una intensa e costante attività sia di campagna sia di cantiere. Questo mio interesse è stato soddisfatto, ma, come detto nel capitolo introduttivo, non è stato possibile, per diversi motivi, portare a giusto compimento tutti gli spunti di ricerca individuati e perseguiti. Tra questi ultimi, quello che maggiormente mi interessava era la possibilità di effettuare rilievi geomeccanici in affioramento e in galleria e metterne a confronto metodi e risultati. In realtà, pur essendo stati eseguiti numerosi rilievi, non è stato possibile mettere direttamente a confronto i risultati. Questo perché, nonostante la presenza di numerose gallerie in fase di scavo, di fatto è stato possibile eseguire i rilievi solo su un paio di esse. In più, lì dove è stato possibile eseguire i rilievi sui fronti di scavo, non si è invece potuto, per mancanza di affioramenti appropriati, eseguirne anche in superficie. Questo ha reso impossibile definire una diretta corrispondenza superficie-profondità con dati geomeccanici quantitativi ed empirici alla scala del versante. Alla luce di quanto detto è stato però possibile definire una metodologia di indagine in galleria finalizzata all'acquisizione di parametri quantitativi analoga a quella descritta per gli affioramenti. In più, sono state definite, e tra loro messe a confronto, tre diverse metodologie di indagine a seconda delle varie esigenze logistiche, di tempi e di sicurezza presenti in sito. Pertanto questo paragrafo, non presentando dati utilizzati nelle altre parti della tesi, è da intendersi come finalizzato alla descrizione metodologica di tipologie di rilievo appositamente sperimentate e messe a punto nel corso di questi anni.

4.2.1 Le schede geomeccaniche per i fronti di scavo in galleria

La Fig. 4.19 mostra la posizione delle diverse gallerie in fase di scavo presenti nel tratto compreso tra Bagnara Calabria e Scilla. In totale queste gallerie sono nove, ma dei 27 rilievi geomeccanici eseguiti la maggior parte hanno interessato i fronti di scavo delle gallerie Cacciapuiu e Muro. Tranne quella denominata Bagnara, tutte le altre gallerie attraversano esclusivamente la formazione degli gneiss. Lo scavo viene eseguito tramite il metodo tradizionale, tramite l'utilizzo di martelloni demolitori e, più raramente, di esplosivi. Tra i fattori che influenzano lo scavo eseguito in tradizionale, e di conseguenza la stabilità della galleria durante le lavorazioni, i più importanti sono sicuramente gli interventi di consolidamento o stabilizzazione del terreno fatti prima dello scavo; dall'insieme di queste informazioni scaturisce la scelta delle sezioni idonee a garantire la fattibilità dello scavo stesso e la stabilità a breve e a lungo termine della galleria. In funzione del comportamento tenso-deformativo dell'ammasso roccioso (categorie A, B e C dal metodo ADECO-RS) (Lunardi, 2006) si hanno sezioni di scavo caratterizzate da diversi interventi di stabilizzazione. Nelle gallerie in cui sono stati condotti i rilievi geomeccanici, e in particolare nella galleria

Cacciapuiu, le sezioni utilizzate sono state di tipo A1c, B0 e B2. Il tipo di sezione utilizzata è scelto anche in funzione delle caratteristiche geomeccaniche degli ammassi incontrati. Queste vengono determinate in maniera piuttosto qualitativa e vengono di fatto sintetizzate attraverso la classificazione RMR.

Come più volte ricordato, il presente lavoro è finalizzato, invece, ad una caratterizzazione delle proprietà di ammasso di tipo quantitativo, e pertanto sono state messe a punto delle procedure per la loro determinazione come di seguito illustrato.

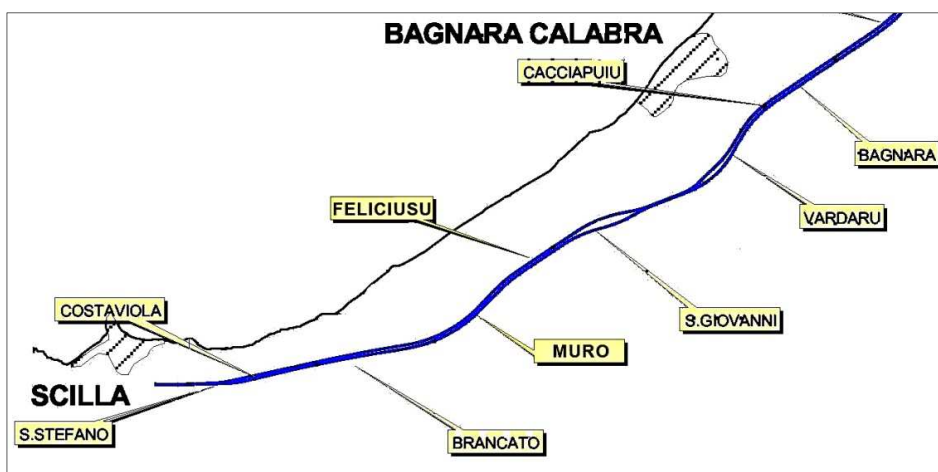


Fig. 4.19 – Ubicazione schematica delle gallerie lungo il futuro tracciato dell'A3 nel tratto Bagnara Calabria – Scilla.

Da quanto detto risulta evidente che la scelta dei fronti di scavo su cui effettuare i rilievi è stata essenzialmente condizionata dalle attività di cantiere, condizionandone di fatto i risultati.

In totale sono stati eseguiti 27 rilievi sui fronti di scavo in galleria, denominati da G1 a G27, e i cui dati di sintesi vengono riportati in Appendice 3.

Per ogni rilievo sono stati innanzitutto riportati i dati informativi generali:

- **data;**
- **ID stazione;**
- **galleria, imbocco e carreggiata** del fronte di scavo;
- **sezione di scavo** utilizzata;
- **quota s.l.m.;**
- **progressiva, relativa ed assoluta** (secondo i progetti dei lavori);
- **area stendimento:** in questo caso si riferisce all'area del fronte pari a circa 140 m²;
- **direzione fronte;**
- **litotipo** (sempre gneiss);
- **tipo di ammasso;**

- **profondità** riferita alla verticale tra il piano della galleria rispetto alla superficie topografica;
- **distanza parietale** misurata lungo l'orizzontale tra la galleria e il punto della superficie topografica più prossimo.

Le metodologie di esecuzione dei rilievi sono state tre:

- 1) misura diretta al fronte;
- 2) misura a distanza tramite distanziometro laser;
- 3) analisi di immagini fotografiche.

I primi due metodi sono stati applicati in sito, mentre il terzo al *computer*.

Per questioni di sicurezza, non sempre è stato possibile accedere direttamente al fronte di scavo. Qualora ciò è stato possibile, l'unico parametro determinato con questa metodologia è stato il J_v . Esso è stato ricavato con le medesime modalità illustrate per i rilievi in superficie, con l'unico accorgimento che le tre misure sono state effettuate al centro e ai due lati del fronte di scavo. In questo modo si è cercato di coprire l'intera area interessata dal rilievo.

La metodologia che ci ha permesso di ottenere il maggior numero di parametri geomeccanici è stata quella in cui è stato utilizzato un distanziometro laser. Il modello utilizzato è il *Leica DISTO™ A8*, la cui scheda tecnica è riportata in Fig. 4.20. Nella stessa figura viene riportata un'immagine di dettaglio dello strumento e una foto dello strumento posizionato su un treppiede, ossia nella posizione in cui è stato utilizzato per i rilievi. Il distanziometro è uno strumento che misura distanze e angoli. Queste caratteristiche hanno consentito di ricavare, tramite semplici relazioni trigonometriche, qualsiasi misura sul fronte di scavo. Di seguito vengono brevemente illustrate le differenti modalità di impiego dello stesso in funzione dei dati che è stato necessario di volta in volta ricavare.

Come primo dato è stata misurata la distanza tra il punto di posizionamento del distanziometro ed il fronte. Successivamente sono stati individuati, così come nei rilievi in superficie, i principali sistemi di discontinuità caratterizzanti l'ammasso, e ne è stata determinata la giacitura (*dip direction/dip*). In funzione di come i piani appartenenti ad ogni singolo sistema intercettavano il fronte, sono state seguite diverse modalità di acquisizione delle spazature tramite distanziometro.

Le funzioni che lo strumento propone per il calcolo delle distanze su un piano (il fronte di scavo) vengono denominate *Pitagora*, proprio perché utilizzano il ben noto teorema e le relazioni sui triangoli. Nel nostro caso sono state utilizzate, per il calcolo della spaziatura dei sistemi di discontinuità, le funzioni denominate *Pitagora 2*, *Pitagora 4* e, più raramente, *Pitagora 5*.

DATI TECNICI	
Power Range Technology™:	
portata (senza piastra segnale)	100 m (330 ft)
Portata (con piastra segnale)	200 m (650 ft)
Precisione di misura fino a 30 m (2 σ , scostamento standard)	tip.: ± 1.5 mm
Unità minima visualizzata	1 mm
Classe laser	II
Tipo di laser	635 nm, ≤ 1 mW
\varnothing punto laser (alla distanza di)	6 / 30 / 60 mm (10 / 50 / 100 m)
Spegnimento automatico del laser	dopo 3 min
Spegnimento automatico dello strumento	dopo 6 min
Visore digitale integrato (zoom 3x)	•
Livella integrata	•
Illuminazione del display	•
Adattatore multifunzione	•
Timer (autoscatto)	•
Misura della distanza	•
Sensore inclinazione:	
precisione	
-rispetto al raggio laser	$\pm 0.15^\circ$
-rispetto all'alloggiamento	$\pm 0.3^\circ$
Misura automatica Orizzontale/ Diagonale, misura continua	•
Memoria storica	30 valori
Memorizzazione della costante	•
Misura indiretta mediante sensore inclinazione	•
Misura indiretta mediante Pitagora	•
Calcolo di superficie/volume	•
Addizione/Sottrazione	•
Filettatura del treppiede	•
Batterie, tipo AA, 2 x 1,5V	Fino a 5.000 misure
Protezione dall'acqua e dalla polvere	IP54 protetto dalla polvere protetto dagli spruzzi d'acqua
Dimensioni	148 x 64 x 36 mm
Peso (con batterie)	280 g
Limiti di temperatura:	
Conservazione	da -25°C a $+70^\circ\text{C}$ (da -13°F a $+158^\circ\text{F}$)
Funzionamento	da -10°C a $+50^\circ\text{C}$ (da -14°F a $+122^\circ\text{F}$)



Fig. 4.20 – Scheda tecnica, immagine di dettaglio e sopra il treppiede del distanziometro Leica DISTO™ A8, utilizzato per i rilievi sui fronti di scavo.

La funzione *Pitagora 4* è stata utilizzata quando si è reso necessario misurare le spazature in direzione orizzontale, come illustrato in Fig. 4.21. Il processo seguito per ottenere questi dati è stato il seguente:

- si punta il laser del distanziometro in un punto qualsiasi del fronte (linea 1) e lo strumento acquisisce automaticamente la misura della distanza;
- si sposta il distanziometro fino a che il raggio laser non sia perpendicolare al fronte (linea 2), ed anche in questo caso lo strumento acquisisce automaticamente la misura della distanza;
- si punta il laser del distanziometro sulla prima discontinuità appartenente al sistema (linea 3); avendo a disposizione queste tre misure, lo strumento calcola automaticamente la misura della distanza D1;
- si cancella l'ultima misura (linea 3) e si sposta il laser su un'altra discontinuità appartenente al medesimo sistema (linea 4); così facendo si ottiene la misura della distanza D2.

Questo procedimento viene ripetuto per tutte le discontinuità appartenenti allo stesso sistema, così da ottenere una serie di misure progressive (D1, D2, D3...Dn). La spaziatura tra due piani successivi è ricavabile dalla formula

$$S_{n-1} = D_n - D_{n-1}$$

dove S è la spaziatura, D la distanza ed n il numero della discontinuità.

E' evidente che la spaziatura così determinata è quella apparente. Da questa, per ricavare quella reale è necessario utilizzare le formule presentate nel paragrafo 4.1.1 a riguardo dell'analisi oggettiva sui fronti di affioramento.

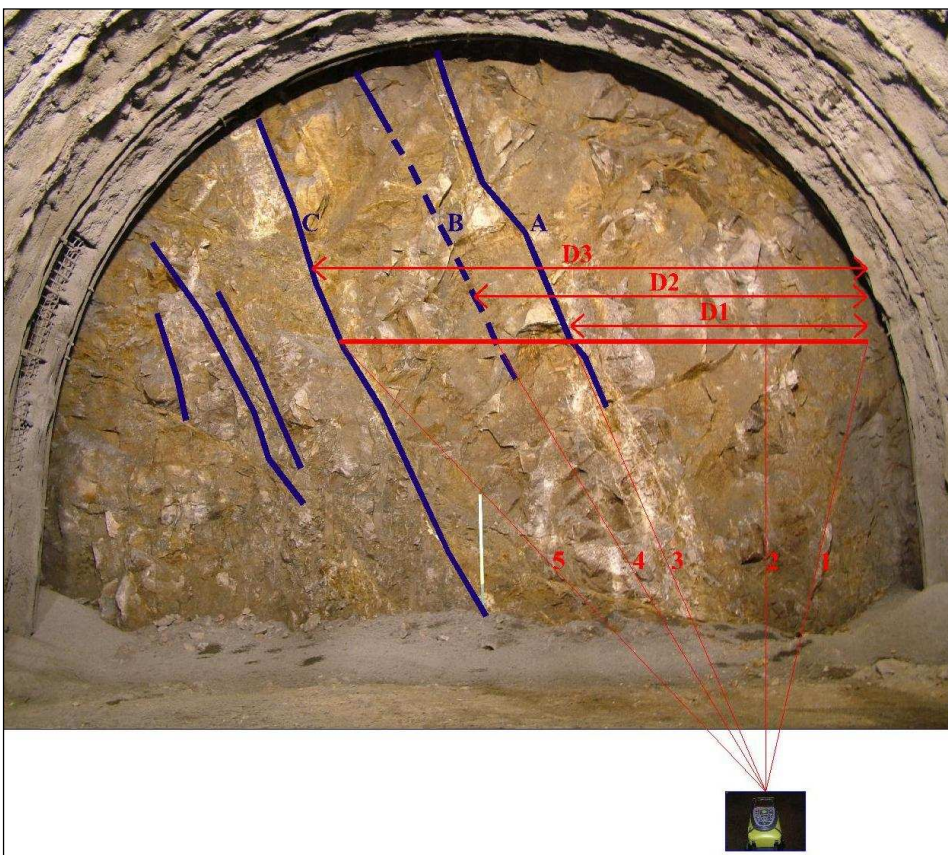


Fig. 4.21 – Schema di utilizzo della funzione Pitagora 4 per il calcolo delle spaziature orizzontali col distanziometro.

La funzione *Pitagora 2* è stata utilizzata quando è stato necessario misurare le spaziature in direzione verticale, come illustrato in Fig. 4.22. Il procedimento di acquisizione delle misure prevede i seguenti passi:

- a) si punta il laser prima su una discontinuità (linea 1, rossa) e lo strumento acquisisce automaticamente la misura della distanza;
- b) si punta il laser su un'altra discontinuità (linea 2, gialla) presente lungo la stessa verticale, ed anche in questo caso lo strumento acquisisce automaticamente la misura della distanza;

una volta ottenute le due misure, lo strumento calcola automaticamente la distanza (S_{1-2}) tra i due punti individuati, che nel nostro caso rappresenta la spaziatura tra i due piani di discontinuità;

- c) successivamente si cancella sullo strumento l'ultima misura e si punta il laser su un'altra discontinuità, ottenendo così un'altra distanza (S_{1-3}), mentre la prima rimane invariata. Per ottenere la spaziatura tra la seconda e la terza discontinuità sarà semplicemente necessario sottrarre S_{1-2} a S_{1-3} .

Con lo stesso procedimento è possibile misurare e calcolare le spaziature per tutti gli altri piani di discontinuità incontrati lungo la verticale. Anche in questo caso parliamo di spaziature apparenti, per cui sarà necessario convertirle in spaziature reali.

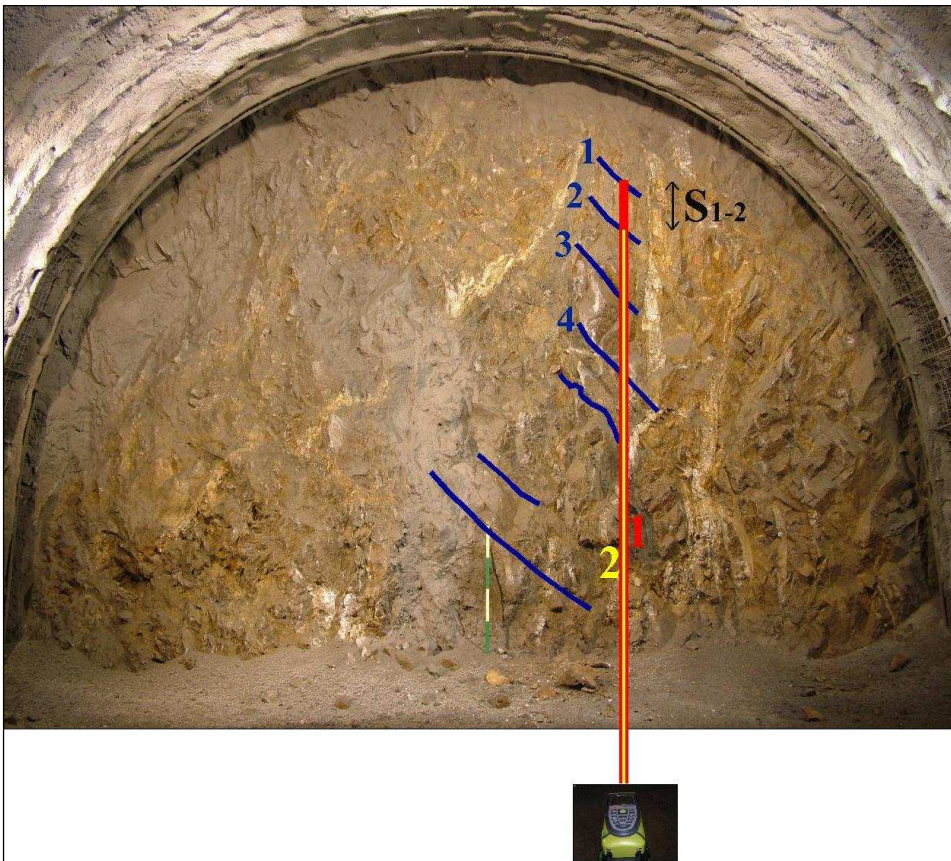


Fig. 4.22 – Schema di utilizzo della funzione Pitagora 2 per il calcolo delle spaziature verticali col distanziometro.

La funzione *Pitagora 5* è stata utilizzata in alternativa, per esigenze logistiche di posizionamento del distanziometro rispetto al fronte, alla funzione *Pitagora 4*, ed anch'essa è servita per la misura delle spaziature in direzione orizzontale, secondo quanto illustrato in Fig. 4.23. Il procedimento adottato è il seguente:

- a) si punta il laser del distanziometro su una prima discontinuità e lo strumento acquisisce automaticamente la misura della distanza;

- b) si punta il laser su un'altra discontinuità appartenente allo stesso sistema, e lo strumento acquisisce in automatico la misura della distanza;
- c) si ruota lo strumento sul piatto del treppiede fino a che il laser non sia ortogonale al fronte, ed anche in questo caso lo strumento acquisisce automaticamente la misura della distanza.

Disponendo di queste tre distanze, il distanziometro calcola automaticamente la spaziatura apparente tra le due discontinuità. La differenza sostanziale rispetto alla funzione *Pitagora 4* sta nel fatto che, per ottenere la spaziatura apparente assoluta tra un'altra discontinuità e la prima, si devono cancellare non più una, ma le ultime due misure della lettura precedente. Considerando che una delle due misure da ripetere è quella ortogonale al fronte, ciò comporta che il margine di errore è sicuramente maggiore. È importante sottolineare che l'errore che si commette facendo la lettura ortogonalmente al fronte è dovuto al fatto che lo strumento non dispone di alcun sensore che ci indica la perpendicolarità del raggio laser rispetto al fronte stesso; a causa di questa mancanza, la lettura si effettua in maniera soggettiva, cosa che porta un errore che è funzione della sensibilità dell'operatore.

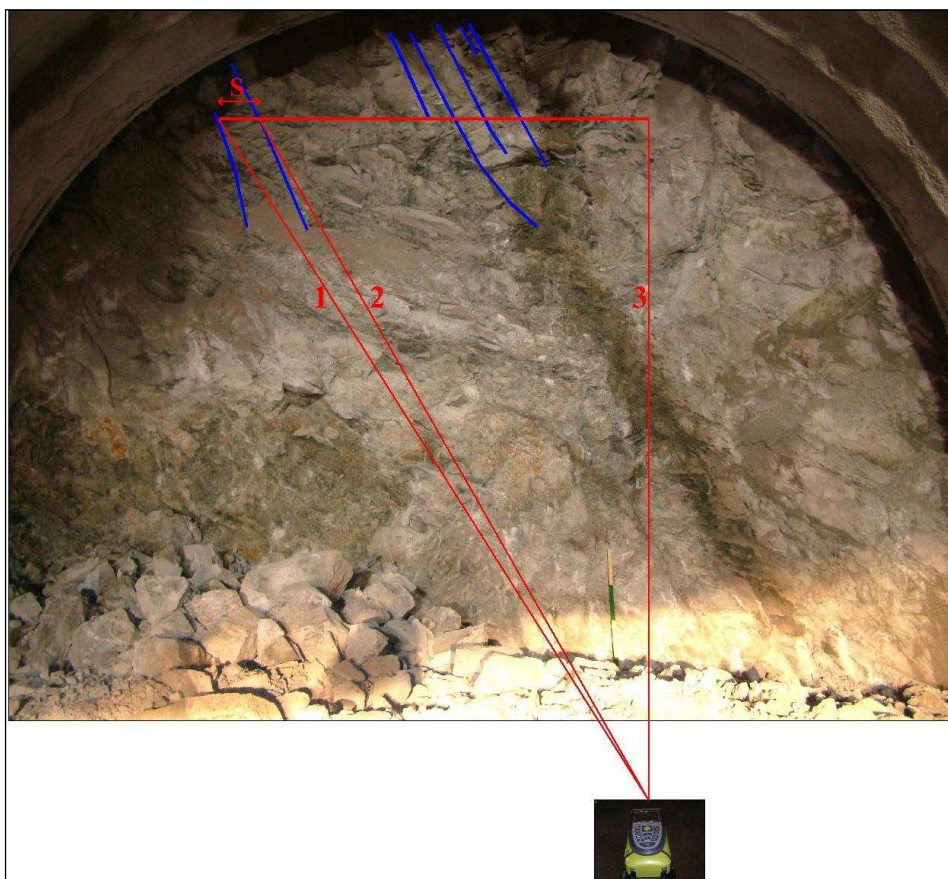


Fig. 4.23 – Schema di utilizzo della funzione *Pitagora 5* per il calcolo delle spaziature orizzontali col distanziometro.

Utilizzando le tre funzioni descritte è stato possibile ottenere, per ciascun rilievo geomeccanico, la spaziatura media di ciascun sistema di discontinuità e da queste il valore di I_b secondo quanto riportato anche per i rilievi di superficie.

Tramite l'utilizzo del distanziometro è stato anche determinato il J_v sull'intero fronte di scavo. In pratica sono state misurate le lunghezze delle *scan-line* orizzontale, verticale e obliqua, e successivamente sono state conteggiate le discontinuità che le intercettavano grazie all'ausilio del puntatore laser. Il J_v volumetrico, analogamente a quanto visto per i rilievi standard (direttamente al fronte o in affioramento), è stato calcolato dalla media dei J_v lineari.

In questo modo sono stati misurati i due indici geomeccanici (J_v e I_b) più significativi ai fini di questo lavoro.

Infine ogni rilievo è stato corredato da uno "schizzo pittorico" del fronte di scavo in cui sono stati riportati, approssimativamente, i principali sistemi e le principali discontinuità individuati, nonché l'eventuale presenza di particolari fasce di intensa fratturazione ed alterazione. Questo ha rappresentato la base indispensabile per poter eseguire, con maggiore cognizione, l'analisi geomeccanica da foto, come di seguito illustrato. La Fig. 4.24 mostra lo "schizzo pittorico" eseguito per il rilievo G21.

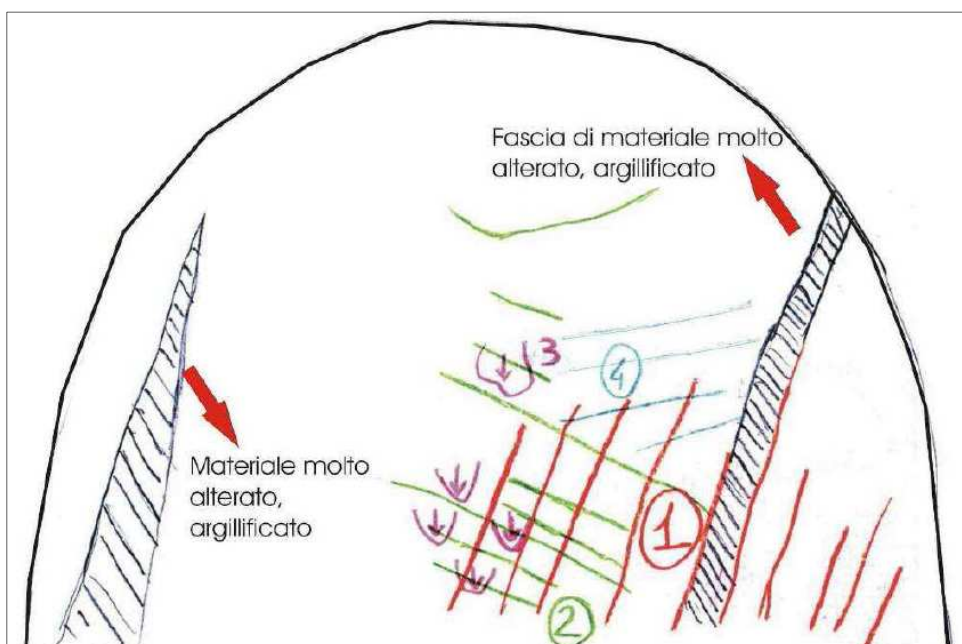


Fig. 4.24 – Esempio di "schizzo pittorico" del fronte di scavo su cui è stato eseguito il rilievo denominato G21.

L'analisi da foto dei fronti di scavo in galleria ha avuto come scopo quello di determinare il valore di J_v e di I_b anche con questa metodologia, per poter metterne a confronto i risultati con quanto

ricavato dai rilievi effettuati direttamente in sito con la metodologia *standard* e con quella che ha previsto l'utilizzo del distanziometro.

In sito è stata misurata la distanza tra il punto di scatto delle foto e il fronte di scavo (generalmente 10 m). In un secondo momento al *computer* la foto utilizzata è stata opportunamente riportata in scala tramite l'utilizzo del *software Autocad Map*. Sempre grazie a questo *software* sono state costruite tre *scan-line* (orizzontale, verticale e obliqua) e sono state conteggiate le discontinuità che le intersecavano (Fig. 4.25). In questo modo è stato ottenuto il valore di J_v .

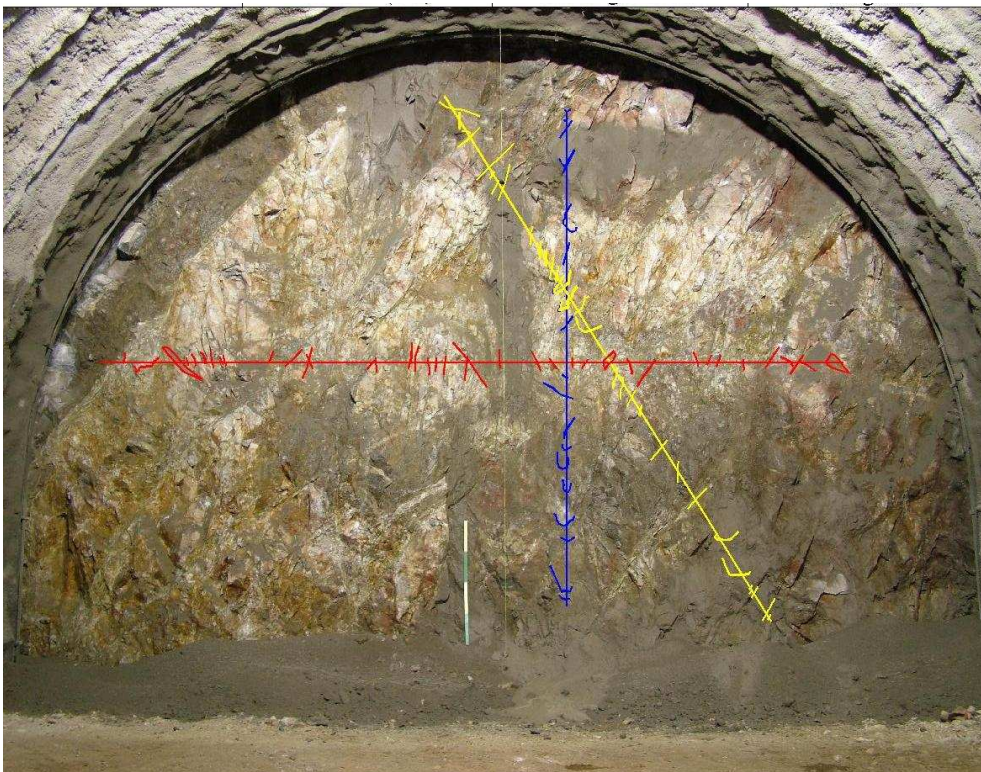


Fig. 4.25 – Esempio di calcolo del J_v da immagine fotografica eseguito per il rilievo denominato G21.

Il valore dell' I_b da foto è stato ricavato riportando su ogni foto tutte le discontinuità riconosciute sia in sito (riportate sullo “schizzo pittorico”) che direttamente da foto. Le discontinuità sono state riportate con un colore differente in funzione del sistema di discontinuità di appartenenza, e con l'ausilio del *software Autocad Map* sono state misurate le spazature apparenti (Fig. 4.26). Conoscendo la giacitura dei sistemi di discontinuità opportunamente misurata in sito e riportata sullo “schizzo pittorico”, nonché la direzione del fronte di scavo, è stato possibile, come già più volte visto, risalire ai valori di spaziatura reale. Da questi è stato poi calcolato l' I_b tramite la ormai nota formula.

In definitiva, i rilievi condotti con le differenti metodologie hanno consentito di ricavare tre differenti valori di J_v ($J_{v\ standard}$, $J_{v\ disto}$ e $J_{v\ foto}$) e due differenti valori di I_b ($I_{b\ disto}$ e $I_{b\ foto}$).

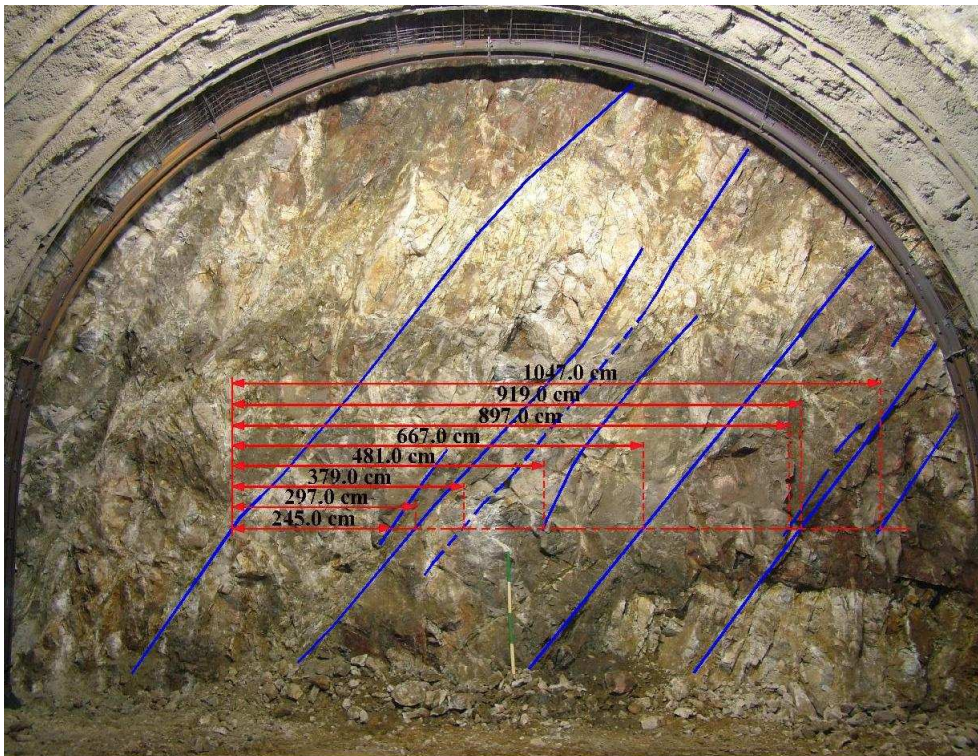


Fig. 4.26 – Esempio di calcolo della spaziatura apparente di un sistema di discontinuità attraverso l'analisi fotografica.

4.2.2 Confronto tra le diverse metodologie di rilievo utilizzate

L'acquisizione dei parametri geomeccanici attraverso le diverse metodologie precedentemente descritte ha consentito di metterne in relazione i risultati e di fare una preliminare analisi dei vantaggi e degli svantaggi che ogni singolo metodo comporta. Il parametro che meglio si presta allo scopo è, senza dubbio, il J_v . La Tab. 4.4 mostra i valori di J_v ricavati coi tre differenti metodi (*standard*, *disto* e *foto*) per i singoli fronti rilevati. Come si può notare alcuni valori sono mancanti, e ciò a causa sia delle difficoltà operative in sito, per quel che riguarda le misure dirette e con distanziometro, sia della scarsa qualità delle immagini fotografiche (molto più raramente). Nelle Tabb. 4.5, 4.6 e 4.7 viene invece riportato il confronto tra le singole coppie di metodi utilizzati, e rispettivamente: *disto-standard*, *foto-standard* e *foto-disto*. In più, vengono riportati i valori medi di J_v per ogni singola metodologia utilizzata e la relativa deviazione *standard*. I grafici di Fig. 4.27 mostrano la distribuzione dei valori di J_v a seconda dei differenti metodi utilizzati. In essi viene anche riportata la media e la deviazione *standard* dei valori di J_v , calcolate per ogni singolo metodo. A partire da questi dati è stato possibile ricavare i rapporti tra i risultati ottenuti coi diversi metodi. Questi rapporti rappresentano di fatto dei fattori correttivi che ci consentono di ricavare il valore mancante di J_v partendo dal valore misurato con un'altra metodologia di rilievo. Questi fattori correttivi sono facilmente definibili attraverso le seguenti formule

$$FC_{J_v \text{ disto} - J_v \text{ standard}} = J_v \text{ standard} / J_v \text{ disto} = 1 / FC_{J_v \text{ standard} - J_v \text{ disto}}$$

$$FC_{J_v \text{ foto} - J_v \text{ standard}} = J_v \text{ standard} / J_v \text{ foto} = 1 / FC_{J_v \text{ standard} - J_v \text{ foto}}$$

$$FC_{J_v \text{ foto} - J_v \text{ disto}} = J_v \text{ disto} / J_v \text{ foto} = 1 / FC_{J_v \text{ disto} - J_v \text{ foto}}$$

dove i valori di J_v si riferiscono alle medie riportate nelle Tabb. 4.4, 4.6 e 4.7. I valori di tutti i fattori correttivi vengono riportati nella Tab. 4.8. L'importanza di questi fattori correttivi risiede nel poter ricavare, seppur indirettamente, il valore di $J_v \text{ standard}$, ossia quello misurato direttamente sul fronte di scavo. Ciò risulta estremamente importante nel momento in cui, o per motivi di tempo, o per motivi di sicurezza, non è possibile accedere direttamente al fronte.

Sono stati anche ricavati, con lo stesso procedimento, anche i fattori correttivi relativi alle misure di J_v in direzione orizzontale (J_{vH}) e in direzione verticale (J_{vV}). Questi sono riportati rispettivamente nelle Tabb. 4.9 e 4.10 e, come vedremo, sono stati utilizzati per le correlazioni riguardanti l' I_b . Come prevedibile, i valori dei fattori correttivi dei J_v lineari sono del tutto simili a quelli ricavati per il J_v volumetrico.

Jv reale			
Rilievo	Jv foto	Jv disto	Jv standard
G1	-	4,8	10,3
G2	3,2	-	8,7
G3	4,2	-	-
G4	-	-	12,2
G5	-	-	-
G6	3,9	-	-
G7	3,3	-	-
G8	-	-	12,3
G9	3,2	-	-
G10	2,1	-	-
G11	2,7	-	10,9
G12	2,4	4,5	9,0
G13	4,6	4,9	10,6
G14	3,2	4,4	-
G15	3,9	5,5	12,4
G16	3,5	6,9	10,5
G17	3,2	3,3	12,1
G18	2,8	5,3	9,0
G19	3,6	5,0	12,1
G20	3,5	3,8	-
G21	3,2	4,0	13,0
G22	3,5	4,0	-
G23	3,0	5,1	14,8
G24	4,2	4,5	-
G25	4,5	5,9	-
G26	4,1	-	-
G27	2,7	2,5	-

Tab. 4.4 – Valori di J_v ricavati coi differenti metodi di rilievo applicati ai fronti di scavo in galleria (rilievo standard, con distanziometro e da immagine fotografica).

Rilievo	J _v disto	J _v standard
G1	4,8	10,3
G12	4,5	9,0
G13	4,9	10,6
G15	5,5	12,4
G16	6,9	10,5
G17	3,3	12,1
G18	5,3	9,0
G19	5,0	12,1
G21	4,0	13,0
G23	5,1	14,8
Media	5,0	11,4
Dev. Stand.	1,0	1,8

Rilievo	J _v foto	J _v disto
G12	2,4	4,5
G13	4,6	4,9
G14	3,2	4,4
G15	3,9	5,5
G16	3,5	6,9
G17	3,2	3,3
G18	2,8	5,3
G19	3,6	5,0
G20	3,5	3,8
G21	3,2	4,0
G22	3,5	4,0
G23	3,0	5,1
G24	4,2	4,5
G25	4,5	5,9
G27	2,7	2,5
Media	3,4	4,7
Dev. Stand.	0,6	1,1

Rilievo	J _v foto	J _v standard
G2	3,2	8,7
G11	2,7	10,9
G12	2,4	9,0
G13	4,6	10,6
G15	3,9	12,4
G16	3,5	10,5
G17	3,2	12,1
G18	2,8	9,0
G19	3,6	12,1
G21	3,2	13,0
G23	3,0	14,8
Media	3,3	11,2
Dev. Stand.	0,6	1,9

Tabb. 4.5, 4.6, 4.7 – Confronto tra i valori di J_v ricavati coi differenti metodi di rilievo applicati ai fronti di scavo in galleria (rilievo standard, con distanziometro e da immagine fotografica). Vengono riportate la media e la deviazione standard relative ai singoli metodi di misura.

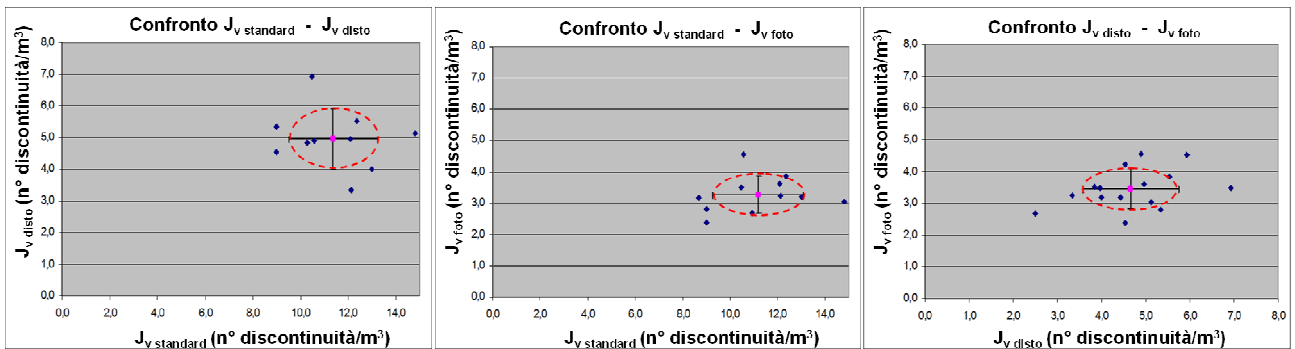


Fig. 4.27 – Distribuzione dei valori di J_v , in funzione dei differenti metodi di rilievo applicati ai fronti di scavo in galleria (standard, disto e foto). In magenta vengono riportati i valori medi, mentre l'area in rosso è stata delimitata utilizzando la deviazione standard come riportato nelle Tabb. 4.5, 4.6 e 4.7.

J _v	J _v foto	J _v standard	J _v disto
J _v foto		3,4	1,4
J _v standard	0,3		0,4
J _v disto	0,7	2,3	

Tab. 4.8 – Fattori correttivi di J_v in relazione ai differenti metodi di rilievo utilizzati (standard, disto e foto).

J _v H	J _v H foto	J _v H standard	J _v H disto
J _v H foto		3,4	1,3
J _v H standard	0,3		0,5
J _v H disto	0,8	2,2	

Tab. 4.9 – Fattori correttivi di J_{vH} in relazione ai differenti metodi di rilievo utilizzati (standard, disto e foto).

J _v V	J _v V foto	J _v V standard	J _v V disto
J _v V foto		3,3	1,5
J _v V standard	0,3		0,5
J _v V disto	0,7	2,1	

Tab. 4.10 – Fattori correttivi di J_{vV} in relazione ai differenti metodi di rilievo utilizzati (standard, disto e foto).

Per quanto concerne le correlazioni tra i valori di I_b ricavati coi diversi metodi è stato preliminarmente necessario ricavare i valori di $I_{b \text{ standard}}$ a partire dai dati di spaziatura ricavati dalle misure col distanziometro. Ricordiamo infatti che a causa di esigenze logistiche, di tempo e soprattutto di sicurezza personale, non è stato possibile ricavare il valore di I_b direttamente sul fronte di scavo. Il procedimento messo a punto per ricavare l' $I_{b \text{ standard}}$ prevede i seguenti passaggi:

- a) somma delle singole spaziate apparenti, misurate in sito con il distanziometro, ottenendo così una lunghezza totale (L_{tot});
- b) conteggio delle discontinuità che ricadono all'interno della lunghezza totale che, naturalmente, sono quelle prese in considerazione durante la misura in sito;
- c) dal rapporto tra il numero di discontinuità e la somma delle spaziate appartenenti allo stesso sistema si ricava il valore di $J_{v \text{ disto}}$, relativo esclusivamente a quel *set* e inteso come numero di discontinuità per metro lineare, secondo la formula:

$$J_{v \text{ disto}} (\text{sistema 1}) = n^\circ \text{ discontinuità (sistema 1)} / L_{tot} (\text{sistema 1});$$

- d) utilizzando il fattore correttivo, come precedentemente descritto, si può ricavare il $J_{v \text{ standard}}$ a partire dal $J_{v \text{ disto}}$. In particolare, si utilizzerà il fattore correttivo per il J_v in direzione orizzontale o quello per il J_v in direzione verticale in relazione alla direzione di misura delle spaziate tramite distanziometro (rispettivamente Tab. 4.9 e Tab. 4.10);
- e) il $J_{v \text{ standard}}$ così ricavato rappresenta il numero di discontinuità per metro lineare relativo ad una singola famiglia di discontinuità. Pertanto è possibile ricavare la spaziatura media apparente per ciascun sistema, assumibile come se fosse stata misurata in sito con l'ausilio della cordella metrica, tramite la relazione:

$$S_{\text{standard}} (\text{sistema 1}) = 1 \text{ m} / J_{v \text{ standard}} (\text{sistema 1});$$

- f) calcolate le spaziate apparenti standard per tutti i sistemi riconosciuti, è possibile ricavare le spaziate medie reali utilizzando le già viste relazioni trigonometriche;
- g) infine, disponendo delle spaziate reali medie di tutti i sistemi, è possibile calcolare il valore dell' $I_{b \text{ standard}}$ dell'ammasso roccioso analizzato dalla relazione:

$$I_{b \text{ standard}} = (S_{1 \text{ standard}} + S_{2 \text{ standard}} + S_{3 \text{ standard}}) / 3.$$

Una volta ricavato il valore di $I_{b \text{ standard}}$ per i diversi rilievi geomeccanici effettuati, è stato possibile, analogamente a quanto fatto per il J_v , ricavare i fattori correttivi per l' I_b ricavato con le differenti metodologie. La Tab. 4.11 mostra tutti i valori di I_b relativi ai 27 fronti rilevati. Le Tab. 4.12, 4.13 e 4.14 mostrano invece i confronti tra le coppie di metodi, nonché le medie e le deviazioni *standard* dei valori di I_b . Nella Tab. 4.15 vengono riportati i valori dei fattori correttivi, calcolati secondo le formule già descritte per il J_v .

I _b			
Rilievo	I _b foto	I _b disto	I _b standard
G1	-	37,5	14,1
G2	-	27,3	15,9
G3	54,3	40,2	15,1
G4	-	26,6	11,0
G5	-	53,8	21,3
G6	39,5	32,4	12,4
G7	-	42,9	17,5
G8	-	-	-
G9	69,6	66,3	26,3
G10	-	56,6	21,6
G11	53,2	45,2	17,2
G12	33,8	44,2	16,4
G13	74,7	66,6	27,4
G14	60,1	48,3	19,3
G15	-	55,5	22,3
G16	61,3	64,5	25,1
G17	68,3	75,8	30,4
G18	-	48,4	18,7
G19	38,3	33,0	13,5
G20	-	63,9	30,7
G21	30,2	40,4	16,1
G22	45,5	68,4	27,3
G23	41,3	40,1	16,6
G24	63,5	56,5	23,2
G25	30,0	28,7	11,7
G26	53,8	60,0	24,1
G27	55,6	46,6	16,9

Tab. 4.11 – Valori di I_b ricavati coi differenti metodi di rilievo applicati ai fronti di scavo in galleria (rilievo standard, con distanziometro e da immagine fotografica).

Stazione	I _b disto	I _b standard
G1	37,5	14,1
G2	27,3	15,9
G3	40,2	15,1
G4	26,6	11,0
G5	53,8	21,3
G6	32,4	12,4
G7	42,9	17,5
G9	66,3	26,3
G10	56,6	21,6
G11	45,2	17,2
G12	44,2	16,4
G13	66,6	27,4
G14	48,3	19,3
G15	55,5	22,3
G16	64,5	25,1
G17	75,8	30,4
G18	48,4	18,7
G19	33,0	13,5
G20	63,9	30,7
G21	40,4	16,1
G22	68,4	27,3
G23	40,1	16,6
G24	56,5	23,2
G25	28,7	11,7
G26	60,0	24,1
G27	46,6	16,9
Media	48,8	19,7
Dev. Stand.	13,9	5,7

Stazione	I _b da foto	I _b standard
G3	54,3	15,1
G6	39,5	12,4
G9	69,6	26,3
G11	53,2	17,2
G12	33,8	16,4
G13	74,7	27,4
G14	60,1	19,3
G16	61,3	25,1
G17	68,3	30,4
G19	38,3	13,5
G21	30,2	16,1
G22	45,5	27,3
G23	41,3	16,6
G24	63,5	23,2
G25	30,0	11,7
G26	53,8	24,1
G27	55,6	16,9
Media	51,4	19,9
Dev. Stand.	14,1	5,9

Stazione	I _b disto	I _b da foto
G3	40,2	54,3
G6	32,4	39,5
G9	66,3	69,6
G11	45,2	53,2
G12	44,2	33,8
G13	66,6	74,7
G14	48,3	60,1
G16	64,5	61,3
G17	75,8	68,3
G19	33,0	38,3
G21	40,4	30,2
G22	68,4	45,5
G23	40,1	41,3
G24	56,5	63,5
G25	28,7	30,0
G26	60,0	53,8
G27	46,6	55,6
Media	50,4	51,4
Dev. Stand.	14,4	14,1

Tabb. 4.12, 4.13, 4.14 – Confronto tra i valori di I_b ricavati coi differenti metodi di rilievo applicati ai fronti di scavo in galleria (rilievo standard, con distanziometro e da immagine fotografica). Vengono riportate la media e la deviazione standard relative ai singoli metodi di misura.

I_b	lb foto	lb standard	lb disto
lb foto		0,4	1,0
lb standard	2,6		2,5
lb disto	1,0	0,4	

Tab. 4.15 – Fattori correttivi di I_b in relazione ai differenti metodi di rilievo utilizzati (standard, disto e foto).

Utilizzando i fattori correttivi ricavati per i due parametri presi in considerazione (J_v e I_b), è stato possibile ricavare i valori mancanti degli stessi, andando così ad incrementare il data base dei parametri geomeccanici determinati sui fronti di scavo in galleria. In Tab. 4.16 vengono riportati tutti questi dati, distinti in base alle modalità di acquisizione (misura diretta o calcolo tramite FC). Questi dati sono stati utilizzati per operare un'analisi comparata dei valori relativi ai parametri I_b e J_v ottenuti con metodologie differenti, così da determinare le classi di ammasso in profondità in funzione di tali valori.

Il grafico di Fig. 4.28 mostra la relazione tra I_b e J_v per le tre metodologie di rilievo utilizzate. Questo grafico ci consente di fare varie considerazioni. Innanzitutto si vede come i valori sia di I_b che di J_v ottenuti tramite distanziometro e da immagine fotografica sono del tutto simili, con un buon grado di sovrapponibilità tra i relativi valori. Ciò è riconducibile al fatto che i due metodi presuppongono un rilievo da una certa distanza dal fronte. Questa, in genere di circa 10 m, è analoga per entrambi i metodi, e, non a caso, i risultati sono così confrontabili. Molto diversi sono invece i valori ottenuti in maniera *standard*, ossia con misure dirette sul fronte di scavo. Ad esempio i valori di J_v *standard* variano tra 8 e 15, mentre quelli di J_v *disto* presentano valori compresi tra 3 e 6. A valle di ciò si può affermare che l'utilizzo dei metodi alternativi (disto e foto) al rilievo *standard* si commette un errore quantificabile circa nel 300% per entrambi i parametri (I_b e J_v). In altre parole se si effettua una misura col distanziometro secondo le modalità precedentemente descritte e ad una distanza di circa 10 m dal fronte, si tenderà a sottostimare, in linea generale, il valore di J_v di circa tre volte. Analogamente il valore che si ottiene per l' I_b sarà tre volte quello che si otterrebbe da un rilievo *standard*.

Un' ultima osservazione riguarda il confronto tra i valori ottenuti con la medesima metodologia, qualunque essa sia. Dal grafico di Fig. 4.28 si nota che i valori di I_b e J_v per la stessa metodologia utilizzata si concentrano attorno al valore medio, senza presentare alcuna tendenza. Questo porta a concludere che tutti i rilievi eseguiti in galleria (in tutte le gallerie cui si è avuto accesso) hanno riguardato gneiss aventi un grado di fratturazione molto simile tra loro. In pratica possiamo dire che i rilievi sono stati effettuati su fronti appartenenti ad una stessa classe geomeccanica. Questo fatto è spiegabile considerando che i rilievi sono stati svolti su fronti di scavo non sprizzati (ossia senza utilizzo di *spritz beton* tra uno scavo e il successivo), poiché ritenuti stabili a breve termine. Da ciò

consegue che questi fronti di scavo presentano una buona qualità di ammasso, come confermato dai relativamente bassi valori di J_v standard e alti valori di I_b standard.

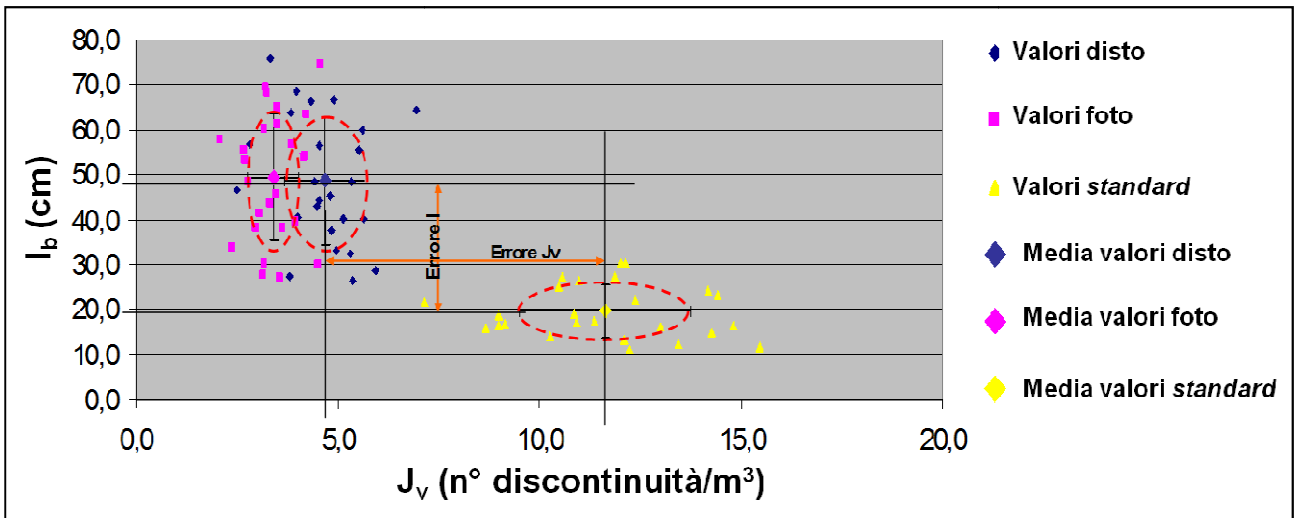


Fig. 4.28 – Grafico di correlazione tra I_b e J_v per le tre differenti metodologie di rilievo effettuate.

Rilievo	Jv H foto	Jv V foto	Jv O foto	Jv foto medio	Jv H disto	Jv V disto	Jv O disto	Jv disto medio	Jv H standard	Jv V standard	Jv O standard	Jv standard medio	lb standard	lb disto	lb da foto
G1	4,15	1,86	-	3,0	7,3	2,3	4,9	4,8	14,3	6,2	10,3	10,3	14,1	37,5	38,3
G2	3,1	2,9	3,5	3,2	4,5	3,52	-	3,8	10,0	7,3	-	8,7	15,9	27,3	27,8
G3	4,1	3,6	4,8	4,2	5,45	5,55	-	5,6	14,1	12,0	-	14,3	15,1	40,2	54,3
G4	3,86	3,21	-	3,5	5,99	5,14	-	5,4	13,3	10,7	12,7	12,2	11,0	26,6	27,1
G5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21,3	53,8	54,9
G6	4,3	2,5	5,0	3,9	5,72	3,83	-	5,3	14,7	8,3	-	13,5	12,4	32,4	39,5
G7	4,2	2,9	2,9	3,3	5,59	4,40	-	4,5	14,4	9,5	-	11,4	17,5	42,9	43,8
G8	4,35	3,75	-	3,6	6,75	6,00	-	5,4	15,0	12,5	9,5	12,3	-	-	-
G9	2,9	3,1	3,6	3,2	3,86	4,81	-	4,3	9,9	10,4	-	11,0	26,3	66,3	69,6
G10	2,1	1,9	2,3	2,1	2,79	2,87	-	2,8	7,2	6,2	-	7,2	21,6	56,6	57,7
G11	2,4	2,8	2,9	2,7	6,08	3,84	-	4,8	13,5	8,0	11,3	10,9	17,2	45,2	53,2
G12	2,4	2,3	2,5	2,4	5,00	4,90	3,70	4,5	11,0	7,3	8,7	9,0	16,4	44,2	33,8
G13	5,1	4,4	4,2	4,6	6,20	4,80	3,70	4,9	13,3	7,7	10,7	10,6	27,4	66,6	74,7
G14	3,5	2,6	3,4	3,2	4,50	4,40	4,40	4,4	10,0	9,2	-	10,9	19,3	48,3	60,1
G15	4,3	3,8	3,5	3,9	5,20	6,90	4,50	5,5	10,8	16,0	10,3	12,4	22,3	55,5	56,6
G16	3,4	3,4	3,7	3,5	6,60	5,70	8,50	6,9	10,2	8,2	13,0	10,5	25,1	64,5	61,3
G17	4,0	2,0	3,7	3,2	3,20	3,50	3,30	3,3	11,7	12,0	12,7	12,1	30,4	75,8	68,3
G18	3,2	2,3	2,9	2,8	5,70	5,80	4,50	5,3	8,9	5,1	13,0	9,0	18,7	48,4	49,4
G19	4,0	3,1	3,7	3,6	5,40	5,20	4,30	5,0	13,7	8,3	14,3	12,1	13,5	33,0	38,3
G20	3,7	3,4	3,5	3,5	3,80	3,80	3,90	3,8	8,5	7,9	-	12,0	30,7	63,9	65,2
G21	3,3	2,6	3,6	3,2	5,00	2,30	4,70	4,0	15,7	10,3	13,0	13,0	16,1	40,4	30,2
G22	4,0	2,5	3,9	3,5	5,20	3,00	3,70	4,0	11,6	6,3	-	11,9	27,3	68,4	45,5
G23	3,3	2,0	3,8	3,0	5,80	4,00	5,60	5,1	13,7	14,0	16,7	14,8	16,6	40,1	41,3
G24	4,6	3,9	4,2	4,2	4,80	5,60	3,20	4,5	10,7	11,7	-	14,4	23,2	56,5	63,5
G25	5,0	3,6	5,0	4,5	6,60	5,80	5,40	5,9	14,7	12,1	-	15,5	11,7	28,7	30,0
G26	5,0	3,7	3,7	4,1	6,65	5,71	-	5,6	17,2	12,4	-	14,2	24,1	60,0	53,8
G27	2,7	2,8	2,6	2,7	1,90	2,40	3,20	2,5	4,2	5,0	-	9,1	16,9	46,6	55,6

- Dato misurato
- Dato ottenuto tramite procedimento $Jv\ disto - Jv\ standard - Spaziatura\ standard - lb\ standard$
- Dato ottenuto tramite FC (dato originario standard)
- Dato ottenuto tramite FC (dato originario foto)
- Dato ottenuto tramite FC (dato originario disto)

Tab. 4.16 – Sintesi dei dati ricavati dalle stazioni geomeccaniche effettuate su fronti di scavo in galleria, distinti in base al metodo di acquisizione e della modalità (dato misurato o ricavato tramite fattore correttivo).

5. LA CLASSIFICAZIONE DEGLI AMMASSI ROCCIOSI

I numerosi dati raccolti in campagna circa lo stato di fratturazione degli ammassi rocciosi, unitamente ai risultati della prove di laboratorio, ci consentono ora di definire una classificazione degli ammassi rocciosi fratturati su basi quantitative. Come più volte ricordato, questo rappresenta uno dei principali obiettivi del presente lavoro di ricerca, ma esso assume un valore più concreto solo nel momento in cui tali informazioni trovano corrispondenza nel confronto con le osservazioni, di tipo più qualitativo, riguardanti l'assetto geologico dell'area considerata. Più semplicemente, se prendo in considerazione unicamente i dati di fratturazione degli ammassi, potrò definire solo un modello geomeccanico di un determinato versante. Per ottenere un modello geologico-tecnico dello stesso versante dovrò integrare queste informazioni col le osservazioni più prettamente geologiche (litologia, stratigrafia, assetto tettonico, ecc.), secondo una semplice ma imprescindibile relazione:

modello geologico + modello geomeccanico = modello geologico-tecnico.

Dei modelli geologici dei tre versanti interessati da movimenti franosi si è già discusso nel secondo capitolo, ora ci concentriamo sui modelli geomeccanici, iniziando dalla definizione delle classi di ammasso e della loro parametrizzazione sia in termini di resistenza che di deformabilità.

Nel capitolo introduttivo si è messo in evidenza come la letteratura scientifica presenti diversi lavori che hanno avuto come tema principale la classificazione degli ammassi rocciosi, rappresentando questo uno dei temi di più difficile omogeneizzazione all'interno della geotecnica. Nel precedente capitolo, riguardante la metodologia di acquisizione dei dati geomeccanici in sito, sono stati ribaditi i principi che hanno guidato nelle scelte man mano compiute nel corso di tale lavoro. La procedura di classificazione di ammasso di seguito proposta rappresenta dunque una prosecuzione sequenziale di quanto già esplicitato.

La procedura messa a punto ha consentito di trattare i dati geomeccanici secondo severi criteri statistici. Ciò è stato possibile grazie alla collaborazione col dott. Alessandro Zini, ricercatore presso il Centro Ricerche ENEA di Frascati. I risultati preliminari di tale procedura sono stati presentati al Convegno AIGA dei Giovani Ricercatori in Geologia Applicata tenutosi a Perugia nel Febbraio 2010.

Con tale procedura si è scelto di rappresentare il grado di fratturazione degli ammassi rocciosi attraverso quei parametri rappresentativi dell'intero ammasso, o perlomeno della porzione analizzata in sito attraverso i punti di rilievo. Per questo motivo è stato deciso di concentrare l'attenzione sul J_v e sull' I_b , di cui si è già ampiamente discusso nel precedente capitolo.

Analogamente è stato deciso di tralasciare, in questa sede, altri parametri come ad esempio il Q_c ricavato dalle prove sclerometriche. Questo dato, pur rappresentando un importante indice distintivo delle qualità degli ammassi rocciosi (ne è testimone il fatto che esso sia utilizzato nei più importanti sistemi classificativi), è però fortemente influenzato dalle condizioni particolari dei singoli punti di misura, ed è quindi funzione, ad esempio, delle scelte del singolo operatore. Ciò ne compromette fortemente l'oggettività e la ripetitività della misura. Questo problema, seppur presente anche nella determinazione degli altri due indici, risulta in questi casi comunque più contenuto, come già discusso precedentemente.

Nel dover trattare statisticamente i dati geomeccanici la maggiore difficoltà è stata quella di integrare le regole della statistica con quelle della geologia. Così come il modello geologico-tecnico di un versante scaturisce dalla fusione tra modello geologico e geomeccanico, quest'ultimo è scaturito dalla sintesi tra il significato fisico e meccanico dei parametri studiati e la distribuzione statistica del totale delle osservazioni effettuate. In questo modo è stato quindi interpretato il lavoro svolto insieme al dott. Zini, col quale abbiamo affrontato l'argomento da due diversi punti di osservazione, funzione delle differenti formazioni scientifiche.

Ne è scaturita, a mio avviso, una procedura rigorosa ma non complessa, sicuramente migliorabile, il cui pregio principale è quello di produrre un risultato chiaro, essenziale e di immediata comprensione. Se infatti l'obiettivo iniziale era quello di attribuire un valore al grado di fratturazione di un ammasso roccioso, questo è stato ottenuto grazie alla determinazione di un indice che prende in considerazione entrambi i parametri fondamentali ricavati in sito, il J_v e l' I_b . Proprio per le sue caratteristiche questo è stato denominato Indice Sintetico di Discontinuità (ISD) ed è adimensionale.

5.1 L'INDICE SINTETICO DI DISCONTINUITA'

La procedura messa a punto per definire l'Indice Sintetico di Discontinuità (ISD) è costituita dai seguenti passaggi:

- 1) determinazione degli z_score ;
- 2) processo di *clustering* (definizione delle classi di ammasso);
- 3) analisi fattoriale (definizione dell'ISD).

Come detto i parametri utilizzati per definire l'ISD sono stati il J_v e l' I_b . Al fine di ricondurre i dati a disposizione per questi due parametri a quelli appartenenti ad una distribuzione normale (z_score) con media zero e varianza 1, sono stati standardizzati i valori applicando la seguente formula:

$$z_i = \frac{x_i - \mu}{\sigma}$$

dove x è il valore di J_v (o I_b) relativo alla singola stazione geomeccanica, μ è la media aritmetica del numero totale delle osservazioni, mentre σ è la deviazione standard, definita come la radice quadrata della varianza attraverso la formula

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \mu)^2}$$

dove N è il numero di osservazioni a disposizione.

In questo modo i dati vengono misurati in unità di deviazione standard e possono essere utilizzati per prevedere la probabilità di ottenere un certo valore a partire dall'area sottesa da un determinato z_score nella curva di distribuzione normale (Ciotoli, 2005). Per meglio comprendere il significato dello z_score prendiamo ad esempio i valori di J_v . Di tutte le 144 osservazioni disponibili è necessario calcolare la media e la deviazione *standard*. Queste risultano rispettivamente pari a 18,4 e 6,8. Se il valore della singola osservazione sarà pari a 18,4, ossia perfettamente uguale alla media aritmetica, allora il valore di z_score sarà pari a zero, mentre se il valore misurato sarà superiore alla media, ad esempio 22, lo z_score sarà positivo (in questo caso pari a 0,52). In più, lo z_score assumerà valore unitario nel caso in cui il valore di J_v sarà pari alla media più la deviazione *standard*, in questo caso pari a 25,2. Analogamente se il valore empirico sarà inferiore alla media lo z_score assumerà valore negativo, e sarà pari a -1 quando il valore empirico sarà pari alla media meno la deviazione *standard* (11,6). In questo modo i valori elevati, in termini assoluti, di z_score indicano valori di J_v distanti, in positivo o in negativo, rispetto alla media dei valori empirici ricavati in campagna. Nella Tab. 5.1 vengono riportati i valori di z_score relativi al J_v e all' I_b di tutte le stazioni geomeccaniche effettuate. Si evidenzia come i valori di z_score relativi al J_v varino tra -1,88 e 2,92. Questo testimonia come la distribuzione dei valori reali di J_v presenti un allungamento verso destra (valori alti) congruentemente con quanto visto nel Capitolo 4. Inoltre, attraverso l'utilizzo di tabelle dei valori di z presenti in qualsiasi trattato di statistica, è possibile ricavare la probabilità (p) che un certo valore sia minore o uguale al valore calcolato di z . Ad esempio, se volessi stimare la probabilità di trovare un affioramento con J_v minore di 5 è necessario calcolare innanzitutto il valore di z , che sarà pari a

$$z = \frac{5 - 18,4}{6,4} = -1,97$$

Il valore corrispondente a -1,97, nella suddetta tabella, è di 0,4756. Per ottenere la corrispondente probabilità sarà necessario sottrarre a 0,5 il valore ricavato (0,4756). Pertanto la probabilità di trovare un affioramento così poco fratturato da avere non più di 5 discontinuità su metro cubo sarà pari al 2,44%, e quindi molto bassa. Considerando le caratteristiche di fratturazione di cui molto si è già discusso, un simile risultato non stupisce affatto.

L'aspetto più importante della determinazione degli z_score è però quello di consentire di poter trattare unitariamente il J_v e l' I_b . In pratica, se prima questi due parametri avevano due differenti unità di misura (rispettivamente n° di discontinuità per metro cubo e cm), col passaggio allo spazio z ne hanno una sola, l'unità di deviazione *standard*. La Fig. 5.1 mostra la distribuzione dei valori di J_v ed I_b nello spazio z , per tutte le 144 stazioni geomeccaniche effettuate. A partire da tale grafico è stato possibile procedere ad una classificazione di tipo statistico mediante tecniche di *clustering* basate sulla nozione di densità delle osservazioni nello spazio bivariato J_v - I_b .

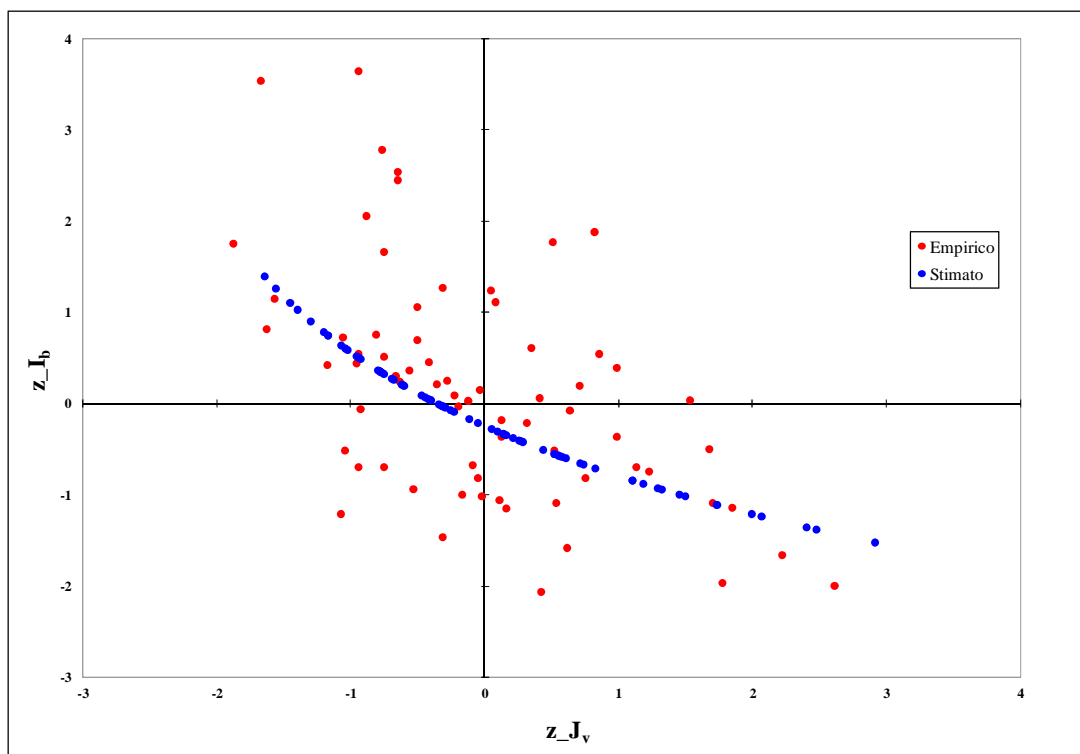


Fig. 5.1 – Grafico a dispersione dei valori di J_v ed I_b nello spazio z . In rosso sono riportati i punti di misura in cui anche l' I_b è stato misurato in sito (dato empirico), mentre in blu sono indicate le stazioni per cui il valore di I_b è stato ricavato analiticamente (dato stimato) come illustrato nel Capitolo 4.

Nr	ID	Jv (n° disc/m ³)	Ib (cm)	z_Jv	z_Ib	Nr	ID	Jv (n° disc/m ³)	Ib (cm)	z_Jv	z_Ib	Nr	ID	Jv (n° disc/m ³)	Ib (cm)	z_Jv	z_Ib	Nr	ID	Jv (n° disc/m ³)	Ib (cm)	z_Jv	z_Ib
1	D1	14,6	12,7	-0,56	0,36	37	D38	19,3	10,3	0,13	-0,37	73	D11	13,2	12,6	-0,77	0,34	109	Z36	14,3	12,2	-0,61	0,20
2	D2	5,6	17,3	-1,88	1,75	38	D39	14	19,6	-0,65	2,45	74	Z1	16,7	11,3	-0,25	-0,07	110	Z37	12,1	13,1	-0,93	0,49
3	D3	14,2	12,2	-0,62	0,21	39	D40	13,9	12,5	-0,66	0,30	75	Z2	11,9	13,2	-0,96	0,52	111	Z38	13,1	12,7	-0,78	0,35
4	D4	12,4	18,3	-0,88	2,05	40	D41	15,6	13,0	-0,42	0,45	76	Z3	27,5	8,4	1,32	-0,94	112	Z39	8,5	15,2	-1,45	1,10
5	D5	13,3	13,2	-0,75	0,51	41	D42	18,2	12,0	-0,04	0,15	77	Z4	18,1	10,8	-0,05	-0,21	113	Z40	13,7	12,4	-0,69	0,27
6	D6	19,3	10,9	0,13	-0,18	42	D43	12	13,3	-0,94	0,54	78	Z5	13,8	12,4	-0,68	0,26	114	S1	13	12,7	-0,80	0,36
7	D7	11,3	9,8	-1,04	-0,52	43	D44	13,2	20,7	-0,77	2,78	79	Z6	19,4	10,4	0,14	-0,34	115	S2	8,88	14,9	-1,40	1,03
8	D8	18,1	8,8	-0,05	-0,82	44	D45	18,3	8,1	-0,02	-1,02	80	Z7	16,3	11,4	-0,31	-0,03	116	S3	7,77	15,7	-1,56	1,26
9	D9	12,9	14,0	-0,81	0,75	45	D46	14,1	12,3	-0,63	0,24	81	Z8	28,7	8,1	1,50	-1,02	117	S4	12	13,2	-0,94	0,50
10	D10	25,2	12,8	0,99	0,39	46	GM1	22,8	11,3	0,64	-0,08	82	Z9	24,1	9,2	0,83	-0,71	118	S5	11,44	13,4	-1,02	0,58
11	D12	15	13,8	-0,50	0,69	47	GM2	23,3	12,2	0,71	0,19	83	Z10	32,6	7,4	2,07	-1,24	119	S6	10,44	14,0	-1,17	0,74
12	D13	20,6	10,8	0,32	-0,21	48	GM3	7	23,2	-1,67	3,54	84	Z11	34,9	7,0	2,40	-1,36	120	S7	21,44	9,8	0,44	-0,51
13	D14	30,1	7,9	1,70	-1,09	49	GM4	15	15,0	-0,50	1,06	85	Z12	15,7	11,6	-0,40	0,03	121	S8	16,1	11,5	-0,34	-0,01
14	D15	17,6	11,6	-0,12	0,03	50	GM5	19	15,2	0,08	1,11	86	Z13	26	8,7	1,10	-0,85	122	S9	10,22	14,1	-1,20	0,78
15	D16	17,6	11,6	-0,12	0,03	51	GM6	36,33	4,9	2,61	-2,00	87	Z14	32,1	7,5	1,99	-1,21	123	S10	17,66	10,9	-0,11	-0,17
16	D17	19,2	8,0	0,11	-1,06	52	GM7	12	23,6	-0,94	3,64	88	Z15	20,2	10,2	0,26	-0,41	124	S11	16,88	11,2	-0,23	-0,09
17	D18	13,3	17,0	-0,75	1,66	53	GM8	14	19,9	-0,65	2,54	89	Z16	7,2	16,1	-1,64	1,39	125	S12	14,33	12,1	-0,60	0,19
18	D19	11,1	7,5	-1,07	-1,21	54	GM9	31,1	7,7	1,85	-1,14	90	Z17	16,3	11,4	-0,31	-0,03	126	S13	16,44	11,4	-0,29	-0,05
19	D20	25,2	10,3	0,99	-0,37	55	GM10	16,3	15,7	-0,31	1,27	91	Z18	19,4	10,4	0,14	-0,34	127	S14	12	13,2	-0,94	0,50
20	D21	26,2	9,2	1,13	-0,70	56	GM11	16,3	6,7	-0,31	-1,47	92	Z19	35,4	6,9	2,48	-1,38	128	S15	10,44	14,0	-1,17	0,74
21	D22	16,9	11,8	-0,23	0,09	57	GM12	21,33	4,7	0,42	-2,07	93	Z20	19,9	10,3	0,21	-0,38	129	S16	9,55	14,5	-1,30	0,90
22	D23	24,3	13,3	0,86	0,54	58	GM13	22,66	6,3	0,62	-1,58	94	Z21	26	8,7	1,10	-0,85	130	S17	15,22	11,8	-0,47	0,09
23	D24	13,3	9,2	-0,75	-0,70	59	GM14	12	9,2	-0,94	-0,70	95	Z22	18,8	10,6	0,05	-0,28	131	S18	15,66	11,6	-0,41	0,04
24	D25	14,8	8,4	-0,53	-0,94	60	GM15	19,55	7,7	0,16	-1,15	96	Z23	22,6	9,5	0,61	-0,60	132	S19	16,22	11,4	-0,32	-0,02
25	D26	23,6	8,8	0,75	-0,82	61	GM16	16,53	12,3	-0,28	0,25	97	Z24	22	9,7	0,52	-0,55	133	S20	11,11	13,6	-1,07	0,64
26	D27	30,6	5,0	1,78	-1,97	62	ST1	11,9	13,0	-0,96	0,44	98	Z25	27,3	8,4	1,29	-0,93	134	S21	22	9,7	0,52	-0,55
27	D28	17,3	8,2	-0,17	-1,00	63	ST2	24,06	17,7	0,82	1,88	99	Z26	22,4	9,6	0,58	-0,59	135	S22	15,55	11,7	-0,42	0,05
28	D29	11,2	13,9	-1,06	0,72	64	ST3	29,93	9,9	1,68	-0,50	100	Z27	15,4	11,7	-0,44	0,07	136	S23	22,2	9,6	0,55	-0,57
29	D30	17,1	11,4	-0,20	-0,03	65	ST4	20,83	13,5	0,35	0,61	101	Z28	20,3	10,1	0,27	-0,41	137	S24	19,55	10,4	0,16	-0,35
30	D31	7,7	15,3	-1,57	1,15	66	ST5	18,76	15,6	0,05	1,24	102	Z29	14,2	12,2	-0,62	0,21	138	S25	26,55	8,6	1,18	-0,88
31	D32	12,1	11,3	-0,93	-0,06	67	ST6	26,85	9,0	1,23	-0,75	103	Z30	23,5	9,3	0,74	-0,67	139	S26	23,33	9,3	0,71	-0,66
32	D33	22,1	7,9	0,53	-1,09	68	ST7	17,83	9,3	-0,09	-0,68	104	Z31	19,1	10,5	0,10	-0,31	140	S27	30,33	7,8	1,74	-1,11
33	D34	22	9,8	0,52	-0,52	69	ST8	21,26	11,7	0,41	0,06	105	Z32	38,4	6,5	2,92	-1,53	141	S28	11,33	13,5	-1,04	0,60
34	D35	16	12,2	-0,36	0,21	70	ST9	28,94	11,6	1,53	0,03	106	Z33	13,3	12,6	-0,75	0,32	142	S29	13,1	12,7	-0,78	0,35
35	D36	10,4	12,9	-1,17	0,42	71	ST10	21,93	17,4	0,51	1,77	107	Z34	30,3	7,8	1,73	-1,11	143	STZ1	20,4	10,1	0,29	-0,42
36	D37	7,3	14,2	-1,63	0,81	72	ST25	33,65	6,0	2,22	-1,66	108	Z35	28,4	8,2	1,45	-1,00	144	STZ2	22,3	9,6	0,56	-0,58

Tab. 5.1 – Tabella riassuntiva dei valori di J_v , I_b e relativi valori nel campo z per tutte le 144 stazioni geomeccaniche effettuate.

La *cluster analysis* consiste in un insieme di tecniche statistiche atte ad individuare gruppi di unità tra loro simili rispetto ad un insieme di caratteri presi in considerazione, e secondo uno specifico criterio. In pratica, le unità statistiche (nel nostro caso le stazioni geomeccaniche) vengono suddivise in un certo numero di gruppi a secondo del loro livello di “somiglianza” valutata a partire dai valori che le variabili (J_v e I_b) assumono in ciascuna unità. La *cluster analysis* consente di pervenire ai seguenti obiettivi (Fabbris, 1997):

- 1) la generazione di ipotesi di ricerca, in quanto per effettuare una analisi di raggruppamento non è necessario avere in mente alcun modello interpretativo;
- 2) la riduzione dei dati in forma (anche grafica) tale da rendere facile la lettura delle informazioni rilevate, e parsimoniosa la presentazione dei risultati;
- 3) la ricerca tipologica per individuare gruppi di unità statistiche con caratteristiche distintive che facciano risaltare la fisionomia del sistema osservato;
- 4) la costruzione di sistemi di classificazione automatica;
- 5) la ricerca di classi omogenee, dentro le quali si può supporre che i membri siano mutuamente surrogabili.

In particolare il primo punto mette in evidenza come la *cluster analysis*, a differenza di altre tecniche statistiche multivariate, non compie alcuna assunzione “a priori” sulle tipologie fondamentali esistenti, in quanto si tratta di un metodo puramente empirico di classificazione e quindi una tecnica induttiva. In pratica la tecnica ha un ruolo esplorativo di ricerca di strutture latenti, al fine di desumere la partizione più probabile. La scelta di effettuare questo tipo di analisi è stata dettata innanzitutto da queste sue peculiarità.

L'applicazione della *cluster analysis* prevede tre distinte fasi:

- 1) la scelta delle variabili di classificazione;
- 2) la scelta di una adeguata misura della dissomiglianza esistente tra le unità statistiche;
- 3) la scelta dell'algoritmo di raggruppamento.

Per quanto concerne il primo punto è importante sottolineare che qualora le variabili quantitative sono espresse in unità di misura diverse o hanno ordini di grandezza diversi, è opportuno standardizzare tali variabili, ed è esattamente quanto fatto con la determinazione degli z_score .

La tecnica di raggruppamento adottata è stata quella della *cluster* gerarchica associativa. In un primo momento era stata intrapresa la strada dei metodi di *clustering* non parametrici, ed in particolare quello noto come *kernel density*. Questo si fonda sulla nozione di densità dei punti

(osservazioni) nello spazio multivariato (nel nostro caso bi-variato). In un secondo momento questa via è stata però abbandonata poiché aveva dato luogo ad un numero troppo alto di *cluster* piccoli, al limite formati da una sola osservazione. Questo rappresenta, infatti, allo stesso tempo un pregio e un difetto della *cluster* fondata sulla nozione di densità, in quanto tende ad isolare le formazioni poco “dense”, ovvero gli *outlier*. Ai nostri fini, invece, rimane fondamentale raggruppare le unità in un numero di *cluster* abbastanza bilanciato, ovvero non eccessivamente elevato, anche se ciò potrebbe comportare il rischio di comprendere qualche elemento “spurio”. Per tale motivo si è successivamente deciso di intraprendere la strada tradizionale della *clustering* gerarchica fondata sul concetto di distanza euclidea. In questa tecnica ogni gruppo fa parte di una classe più ampia, la quale è contenuta a sua volta in una classe di ampiezza superiore, e così via fino al gruppo che contiene tutte le unità. In pratica il *clustering* gerarchico porta ad ottenere non una singola partizione delle n osservazioni, bensì una serie di partizioni che possono essere rappresentate graficamente attraverso un dendrogramma o diagramma ad albero. Per tale motivo in questo processo un aspetto fondamentale è rivestito dalla scelta del numero ottimale di *cluster* in cui suddividere l’insieme delle osservazioni. Il numero ottimale è stato individuato in corrispondenza del miglioramento più grande dei valori di R^2 e dell’indice Pseudo-F. In particolare l’indice Pseudo-F, conosciuto anche come indice di Calinski e Harabasz (1974), per ogni numero di *cluster* $k \geq 2$ è definito come

$$CH(k) = \frac{\text{tr}B_k/(k-1)}{\text{tr}W_k/(n-k)}$$

dove n e k sono rispettivamente il numero totale di osservazioni e il numero di *cluster*. $\text{tr}B_k$ è la traccia della matrice dei *cluster* tra i diversi gruppi (*Between groups*), mentre $\text{tr}W_k$ è la traccia della matrice dei *cluster* all’interno dei singoli gruppi (*Within groups*). La traccia di una matrice è data dalla somma dei valori che si trovano sulla diagonale della matrice stessa, e rappresenta la varianza totale dei dati, in quanto è pari alla somma delle varianze delle variabili originarie. Pertanto un valore elevato di $\text{tr}B_k$ indica grande dissimilarità tra i diversi *cluster*, mentre un basso valore di $\text{tr}W_k$ indica una forte similarità all’interno di ogni singolo *cluster* e quindi tra le osservazioni che ne fanno parte. Il verificarsi di queste condizioni presuppone quindi che vi sia una per quanto possibile marcata distinzione tra i diversi *cluster* cui si associa una piuttosto forte omogeneità tra le osservazioni che ricadono all’interno di un singolo gruppo senza però arrivare ai casi limite scaturiti dalla *kernel density*. Questa situazione rappresenta pertanto quella ottimale in relazione alle finalità con cui è stata condotta la *cluster analysis*. Il verificarsi di ciò comporta quindi che il numero ottimale di cluster si ha per il valore di k che massimizza $CH(k)$. Nel nostro caso il numero ottimale

di *cluster* è risultato essere pari a 15. La Fig. 5.2 mostra la suddivisione nei 15 cluster individuati dei valori di J_v e I_b delle 144 osservazioni nel campo z . Il numero di gruppi, pari a 15, è piuttosto elevato in relazione al numero delle osservazioni costituenti il *dataset* (144). Ciò può essere evidentemente attribuibile all'alta eterogeneità nella diffusione delle variabili J_v e I_b nello spazio bi-variato. La *cluster analysis*, così come la successiva analisi fattoriale, è stata condotta attraverso l'utilizzo del *software* SAS/STAT 9.2, prodotto dalla SAS Institute Inc..

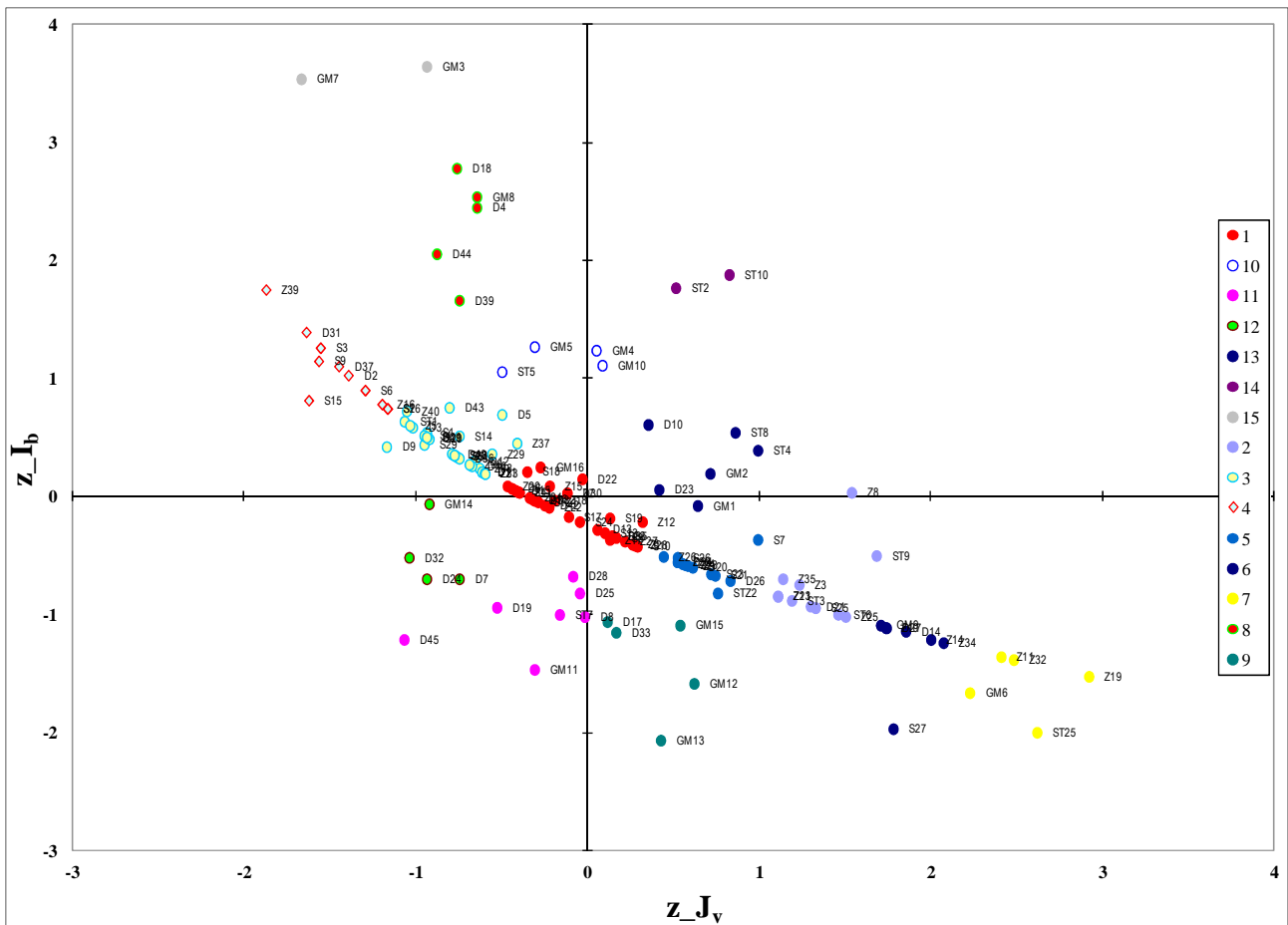


Fig. 5.2 – *Suddivisione in cluster delle 144 osservazioni in funzione dei valori di J_v ed I_b nello spazio z . Tramite la cluster analysis di tipo gerarchico sono stati individuati 15 differenti gruppi*

La *cluster analysis* ci ha dunque consentito di classificare, su basi prettamente statistiche, gli ammassi rocciosi in funzione di due parametri descrittivi del loro grado di fratturazione. Come detto inizialmente, un ulteriore scopo del presente lavoro è quello di far corrispondere al grado di fratturazione di un ammasso roccioso, dato evidentemente descrittivo, un dato quantitativo facilmente ricavabile e di immediata comprensione. Questo è stato ottenuto tramite l'analisi fattoriale che ha consentito di fondere le due variabili originali (J_v e I_b) in una sola dimensione.

L'analisi fattoriale viene genericamente definita come la ricerca di variabili latenti a partire da alcuna variabili osservate. Una variabile osservata è una variabile che è stata effettivamente

misurata (J_v e I_b nel nostro caso), mentre una variabile latente è un tipo di variabile che non è stata misurata, che forse non è neppure misurabile e che perciò viene ipotizzata e analizzata a partire dai suoi effetti. Nel nostro caso la variabile latente, definita anche “fattore”, è l’Indice Sintetico di Discontinuità (ISD), che, come sarà chiaro da quanto in seguito riportato, non è certamente misurabile in sito. Per ottenere ciò è necessario che le variabili osservate siano in grado di descrivere un identico fenomeno (il grado di fratturazione di un ammasso roccioso), avendo con esso un forte grado di correlazione. Da quanto detto finora sia il J_v che l’ I_b rispecchiano bene tali condizioni.

L’analisi messa a punto ha consentito di definire l’Indice Sintetico di Discontinuità attraverso la seguente relazione

$$ISD = (0,911 * z_{J_v}) + (-0,911 * z_{I_b})$$

dove $\pm 0,911$ rappresentano i *factor loading* (pesi fattoriali) associati alle due variabili prescelte. Il loro valore indica il coefficiente di correlazione tra la variabile originaria e il fattore. Il loro identico valore assoluto testimonia che queste due variabili hanno lo stesso peso nel descrivere le condizioni di fratturazione dell’ammasso, senza una prevalenza dell’una sull’altra. Soffermandoci sull’equazione costitutiva dell’ISD possiamo vedere come esso sia direttamente proporzionale al J_v (attraverso il suo valore di z_score) ed inversamente proporzionale all’ I_b (sempre attraverso il corrispettivo valore di z_score). Sulla base del significato fisico dei due parametri possiamo concludere che il valore di ISD cresce all’aumentare del grado di fratturazione degli ammassi rocciosi. La Tab. 5.2 mostra i valori di ISD calcolati per ognuna delle 144 stazioni geomeccaniche effettuate in campagna. Da esse vediamo che i valori di ISD variano da -4,7 per la stazione GM3 a 4,2 per la stazione GM6 che quindi risulta essere quella con il grado di fratturazione più elevato.

Al fine di determinare il grado di affidabilità statistica dell’analisi fattoriale che ha portato alla definizione dell’ISD sono stati condotti due differenti *test*: il *test* di sfericità di Bartlett (Snedecor & Cochran, 1989) e la determinazione dell’indice di Kaiser-Meyer-Olkin (KMO). Il *test* di sfericità di Bartlett cerca di verificare se la matrice di correlazione sia una matrice identità, ovvero se i valori fuori dalla diagonale principale sono 0 e quelli lungo la diagonale sono 1. Infatti, se avessimo una matrice identità non avrebbe senso ricorrere all’analisi fattoriale. Il valore di significatività inferiore all’1% indica che la matrice di correlazione è significativamente diversa da una matrice identità. L’indice KMO si basa sulle correlazioni parziali di ogni variabile con ogni altra, parzializzando su tutte le restanti. Il valore ottenuto per la nostra analisi è pari a 0,5 che non è un valore

particolarmente elevato, ma lascia intendere che la scelta della riduzione delle variabili in pochi fattori è comunque sostenibile.

Naturalmente non c'è stato bisogno di effettuare alcuna rotazione ortogonale dei fattori poiché la dimensione è una soltanto (z_score).

Nr	ID	z_J_v	z_I_b	ISD	Nr	ID	z_J_v	z_I_b	ISD	Nr	ID	z_J_v	z_I_b	ISD	Nr	ID	z_J_v	z_I_b	ISD
1	D1	-0,56	0,36	-0,84	37	D38	0,13	-0,37	0,45	73	D11	-0,77	0,34	-1,00	109	Z36	-0,61	0,20	-0,73
2	D2	-1,88	1,75	-3,31	38	D39	-0,65	2,45	-2,82	74	Z1	-0,25	-0,07	-0,16	110	Z37	-0,93	0,49	-1,29
3	D3	-0,62	0,21	-0,76	39	D40	-0,66	0,30	-0,88	75	Z2	-0,96	0,52	-1,34	111	Z38	-0,78	0,35	-1,03
4	D4	-0,88	2,05	-2,68	40	D41	-0,42	0,45	-0,79	76	Z3	1,32	-0,94	2,06	112	Z39	-1,45	1,10	-2,33
5	D5	-0,75	0,51	-1,15	41	D42	-0,04	0,15	-0,17	77	Z4	-0,05	-0,21	0,15	113	Z40	-0,69	0,27	-0,88
6	D6	0,13	-0,18	0,28	42	D43	-0,94	0,54	-1,35	78	Z5	-0,68	0,26	-0,85	114	S1	-0,80	0,36	-1,05
7	D7	-1,04	-0,52	-0,48	43	D44	-0,77	2,78	-3,23	79	Z6	0,14	-0,34	0,43	115	S2	-1,40	1,03	-2,21
8	D8	-0,05	-0,82	0,70	44	D45	-0,02	-1,02	0,91	80	Z7	-0,31	-0,03	-0,26	116	S3	-1,56	1,26	-2,57
9	D9	-0,81	0,75	-1,42	45	D46	-0,63	0,24	-0,80	81	Z8	1,50	-1,02	2,29	117	S4	-0,94	0,50	-1,31
10	D10	0,99	0,39	0,54	46	GM1	0,64	-0,08	0,65	82	Z9	0,83	-0,71	1,40	118	S5	-1,02	0,58	-1,46
11	D12	-0,50	0,69	-1,09	47	GM2	0,71	0,19	0,47	83	Z10	2,07	-1,24	3,01	119	S6	-1,17	0,74	-1,74
12	D13	0,32	-0,21	0,48	48	GM3	-1,67	3,54	-4,74	84	Z11	2,40	-1,36	3,43	120	S7	0,44	-0,51	0,86
13	D14	1,70	-1,09	2,55	49	GM4	-0,50	1,06	-1,42	85	Z12	-0,40	0,03	-0,40	121	S8	-0,34	-0,01	-0,30
14	D15	-0,12	0,03	-0,14	50	GM5	0,08	1,11	-0,94	86	Z13	1,10	-0,85	1,78	122	S9	-1,20	0,78	-1,81
15	D16	-0,12	0,03	-0,14	51	GM6	2,61	-2,00	4,20	87	Z14	1,99	-1,21	2,92	123	S10	-0,11	-0,17	0,05
16	D17	0,11	-1,06	1,07	52	GM7	-0,94	3,64	-4,18	88	Z15	0,26	-0,41	0,60	124	S11	-0,23	-0,09	-0,12
17	D18	-0,75	1,66	-2,20	53	GM8	-0,65	2,54	-2,90	89	Z16	-1,64	1,39	-2,76	125	S12	-0,60	0,19	-0,72
18	D19	-1,07	-1,21	0,13	54	GM9	1,85	-1,14	2,73	90	Z17	-0,31	-0,03	-0,26	126	S13	-0,29	-0,05	-0,22
19	D20	0,99	-0,37	1,23	55	GM10	-0,31	1,27	-1,44	91	Z18	0,14	-0,34	0,43	127	S14	-0,94	0,50	-1,31
20	D21	1,13	-0,70	1,67	56	GM11	-0,31	-1,47	1,05	92	Z19	2,48	-1,38	3,52	128	S15	-1,17	0,74	-1,74
21	D22	-0,23	0,09	-0,29	57	GM12	0,42	-2,07	2,27	93	Z20	0,21	-0,38	0,54	129	S16	-1,30	0,90	-2,00
22	D23	0,86	0,54	0,29	58	GM13	0,62	-1,58	2,01	94	Z21	1,10	-0,85	1,78	130	S17	-0,47	0,09	-0,51
23	D24	-0,75	-0,70	-0,05	59	GM14	-0,94	-0,70	-0,22	95	Z22	0,05	-0,28	0,30	131	S18	-0,41	0,04	-0,40
24	D25	-0,53	-0,94	0,37	60	GM15	0,16	-1,15	1,20	96	Z23	0,61	-0,60	1,10	132	S19	-0,32	-0,02	-0,27
25	D26	0,75	-0,82	1,43	61	GM16	-0,28	0,25	-0,48	97	Z24	0,52	-0,55	0,98	133	S20	-1,07	0,64	-1,56
26	D27	1,78	-1,97	3,41	62	ST1	-0,96	0,44	-1,27	98	Z25	1,29	-0,93	2,03	134	S21	0,52	-0,55	0,98
27	D28	-0,17	-1,00	0,76	63	ST2	0,82	1,88	-0,96	99	Z26	0,58	-0,59	1,06	135	S22	-0,42	0,05	-0,43
28	D29	-1,06	0,72	-1,62	64	ST3	1,68	-0,50	1,99	100	Z27	-0,44	0,07	-0,47	136	S23	0,55	-0,57	1,02
29	D30	-0,20	-0,03	-0,15	65	ST4	0,35	0,61	-0,24	101	Z28	0,27	-0,41	0,62	137	S24	0,16	-0,35	0,47
30	D31	-1,57	1,15	-2,47	66	ST5	0,05	1,24	-1,09	102	Z29	-0,62	0,21	-0,75	138	S25	1,18	-0,88	1,88
31	D32	-0,93	-0,06	-0,79	67	ST6	1,23	-0,75	1,80	103	Z30	0,74	-0,67	1,28	139	S26	0,71	-0,66	1,25
32	D33	0,53	-1,09	1,48	68	ST7	-0,09	-0,68	0,54	104	Z31	0,10	-0,31	0,37	140	S27	1,74	-1,11	2,60
33	D34	0,52	-0,52	0,94	69	ST8	0,41	0,06	0,32	105	Z32	2,92	-1,53	4,05	141	S28	-1,04	0,60	-1,49
34	D35	-0,36	0,21	-0,52	70	ST9	1,53	0,03	1,37	106	Z33	-0,75	0,32	-0,98	142	S29	-0,78	0,35	-1,03
35	D36	-1,17	0,42	-1,45	71	ST10	0,51	1,77	-1,15	107	Z34	1,73	-1,11	2,59	143	STZ1	0,29	-0,42	0,65
36	D37	-1,63	0,81	-2,22	72	ST25	2,22	-1,66	3,54	108	Z35	1,45	-1,00	2,24	144	STZ2	0,56	-0,58	1,04

Tab. 5.2 – Valori di z_J_v , z_I_b e ISD per le 144 stazioni geomeccaniche effettuate

A questo punto è possibile attribuire ad ogni singolo *cluster* individuato tramite la *cluster analysis* un determinato valore di ISD secondo la relazione individuata nell'analisi fattoriale. Nella Tab. 5.3 vengono riassunte le caratteristiche di ogni *cluster* individuato (J_v , I_b e ISD). Il valore di ISD relativo ad ogni singolo cluster è stato calcolato dalla media degli ISD delle stazioni geomeccaniche appartenenti a quel singolo cluster. Dagli stessi valori sono stati ricavati anche i valori di deviazione standard e del coefficiente di variazione dell'ISD. Infine nell'ultima colonna viene riportata la classe di ammasso in cui dalla numerazione attribuita precedentemente ai cluster si passa ad un elenco alfanumerico dalla A alla Q. Alla classe A corrisponde il minor grado di fratturazione degli

ammassi rocciosi, mentre alla classe Q corrispondono quegli affioramenti aventi un grado di fratturazione estremamente elevato. Infine in Tab. 5.4 vengono riportati tutti i dati relativi alle singole stazioni geomeccaniche suddivise per classi di ammasso di appartenenza.

CLUSTER	J_v	I_b (cm)	ISD	N° osservazioni	Deviazione standard ISD	Coeff. Variaz. ISD	CLASSE di AMMASSO
7	35,7	6,3	3,75	5	0,35	9	Q
6	31,0	7,3	2,83	7	0,31	11	P
2	27,5	9,0	1,90	11	0,26	14	O
9	21,0	6,9	1,60	5	0,52	33	N
5	22,8	9,6	1,12	13	0,18	16	M
11	16,2	8,1	0,64	7	0,32	50	L
13	22,9	12,5	0,34	6	0,31	91	I
1	17,7	11,1	0,00	33	0,39	8337	H
12	12,2	9,9	-0,38	4	0,32	-84	G
14	23,0	17,5	-1,06	2	0,13	-12	F
3	13,0	12,9	-1,11	29	0,28	-25	E
10	17,3	15,4	-1,22	4	0,25	-20	D
4	8,5	15,0	-2,29	11	0,48	-21	C
8	13,4	19,1	-2,77	5	0,38	-14	B
15	9,5	23,4	-4,46	2	0,40	-9	A

Tab. 5.3 – Valori di J_v , I_b (valori medi delle stazioni appartenenti ad ogni singola classe) e ISD per le 15 classi di ammasso individuate e denominate dalla A alla Q.

ID	Jv	Ib (cm)	z_Jv	z_Ib	ISD	Cluster	CLASSE di AMMASSO	ID	Jv	Ib (cm)	z_Jv	z_Ib	ISD	Cluster	CLASSE di AMMASSO	ID	Jv	Ib (cm)	z_Jv	z_Ib	ISD	Cluster	CLASSE di AMMASSO
GM6	36,3	4,9	2,61	-2,00	4,20	7	Q	D10	25,2	12,8	0,99	0,39	0,54	13	I	D1	14,6	12,7	-0,56	0,36	-0,84	3	E
ST25	33,7	6,0	2,22	-1,66	3,54	7		D23	24,3	13,3	0,86	0,54	0,29	13		D3	14,2	12,2	-0,62	0,21	-0,76	3	
Z11	34,9	7,0	2,40	-1,36	3,43	7		GM1	22,8	11,3	0,64	-0,08	0,65	13		D5	13,3	13,2	-0,75	0,51	-1,15	3	
Z19	35,4	6,9	2,48	-1,38	3,52	7		GM2	23,3	12,2	0,71	0,19	0,47	13		D9	12,9	14,0	-0,81	0,75	-1,42	3	
Z32	38,4	6,5	2,92	-1,53	4,05	7		ST4	20,8	13,5	0,35	0,61	-0,24	13		D12	15,0	13,8	-0,50	0,69	-1,09	3	
D14	30,1	7,9	1,70	-1,09	2,55	6	ST8	21,3	11,7	0,41	0,06	0,32	13	D29	11,2	13,9	-1,06	0,72	-1,62	3			
D27	30,6	5,0	1,78	-1,97	3,41	6	D6	19,3	10,9	0,13	-0,18	0,28	1	D36	10,4	12,9	-1,17	0,42	-1,45	3			
GM9	31,1	7,7	1,85	-1,14	2,73	6	D13	20,6	10,8	0,32	-0,21	0,48	1	D40	13,9	12,5	-0,66	0,30	-0,88	3			
Z10	32,6	7,4	2,07	-1,24	3,01	6	D15	17,6	11,6	-0,12	0,03	-0,14	1	D41	15,6	13,0	-0,42	0,45	-0,79	3			
Z14	32,1	7,5	1,99	-1,21	2,92	6	D16	17,6	11,6	-0,12	0,03	-0,14	1	D43	12,0	13,3	-0,94	0,54	-1,35	3			
Z34	30,3	7,8	1,73	-1,11	2,59	6	D22	16,9	11,8	-0,23	0,09	-0,29	1	D46	14,1	12,3	-0,63	0,24	-0,80	3			
S27	30,3	7,8	1,74	-1,11	2,60	6	D30	17,1	11,4	-0,20	-0,03	-0,15	1	ST1	11,9	13,0	-0,96	0,44	-1,27	3			
D21	26,2	9,2	1,13	-0,70	1,67	2	D35	16,0	12,2	-0,36	0,21	-0,52	1	D11	13,2	12,6	-0,77	0,34	-1,00	3			
ST3	29,9	9,9	1,68	-0,50	1,99	2	D38	19,3	10,3	0,13	-0,37	0,45	1	Z2	11,9	13,2	-0,96	0,52	-1,34	3			
ST6	26,9	9,0	1,23	-0,75	1,80	2	D42	18,2	12,0	-0,04	0,15	-0,17	1	Z5	13,8	12,4	-0,68	0,26	-0,85	3			
ST9	28,9	11,6	1,53	0,03	1,37	2	GM16	16,5	12,3	-0,28	0,25	-0,48	1	Z29	14,2	12,2	-0,62	0,21	-0,75	3			
Z3	27,5	8,4	1,32	-0,94	2,06	2	Z1	16,7	11,3	-0,25	-0,07	-0,16	1	Z33	13,3	12,6	-0,75	0,32	-0,98	3			
Z8	28,7	8,1	1,50	-1,02	2,29	2	Z4	18,1	10,8	-0,05	-0,21	0,15	1	Z36	14,3	12,2	-0,61	0,20	-0,73	3			
Z13	26,0	8,7	1,10	-0,85	1,78	2	Z6	19,4	10,4	0,14	-0,34	0,43	1	Z37	12,1	13,1	-0,93	0,49	-1,29	3			
Z21	26,0	8,7	1,10	-0,85	1,78	2	Z7	16,3	11,4	-0,31	-0,03	-0,26	1	Z38	13,1	12,7	-0,78	0,35	-1,03	3			
Z25	27,3	8,4	1,29	-0,93	2,03	2	Z12	15,7	11,6	-0,40	0,03	-0,40	1	Z40	13,7	12,4	-0,69	0,27	-0,88	3			
Z35	28,4	8,2	1,45	-1,00	2,24	2	Z15	20,2	10,2	0,26	-0,41	0,60	1	S1	13,0	12,7	-0,80	0,36	-1,05	3			
S25	26,6	8,6	1,18	-0,88	1,88	2	Z17	16,3	11,4	-0,31	-0,03	-0,26	1	S4	12,0	13,2	-0,94	0,50	-1,31	3			
D17	19,2	8,0	0,11	-1,06	1,07	9	Z18	19,4	10,4	0,14	-0,34	0,43	1	S5	11,4	13,4	-1,02	0,58	-1,46	3			
D33	22,1	7,9	0,53	-1,09	1,48	9	Z20	19,9	10,3	0,21	-0,38	0,54	1	S12	14,3	12,1	-0,60	0,19	-0,72	3			
GM12	21,3	4,7	0,42	-2,07	2,27	9	Z22	18,8	10,6	0,05	-0,28	0,30	1	S14	12,0	13,2	-0,94	0,50	-1,31	3			
GM13	22,7	6,3	0,62	-1,58	2,01	9	Z27	15,4	11,7	-0,44	0,07	-0,47	1	S20	11,1	13,6	-1,07	0,64	-1,56	3			
GM15	19,6	7,7	0,16	-1,15	1,20	9	Z28	20,3	10,1	0,27	-0,41	0,62	1	S28	11,3	13,5	-1,04	0,60	-1,49	3			
D20	25,2	10,3	0,99	-0,37	1,23	5	Z31	19,1	10,5	0,10	-0,31	0,37	1	S29	13,1	12,7	-0,78	0,35	-1,03	3			
D26	23,6	8,8	0,75	-0,82	1,43	5	S8	16,1	11,5	-0,34	-0,01	-0,30	1	GM4	15,0	15,0	-0,50	1,06	-1,42	10			
D34	22,0	9,8	0,52	-0,52	0,94	5	S10	17,7	10,9	-0,11	-0,17	0,05	1	GM5	19,0	15,2	0,08	1,11	-0,94	10			
Z9	24,1	9,2	0,83	-0,71	1,40	5	S11	16,9	11,2	-0,23	-0,09	-0,12	1	GM10	16,3	15,7	-0,31	1,27	-1,44	10			
Z23	22,6	9,5	0,61	-0,60	1,10	5	S13	16,4	11,4	-0,29	-0,05	-0,22	1	ST5	18,8	15,6	0,05	1,24	-1,09	10			
Z24	22,0	9,7	0,52	-0,55	0,98	5	S17	15,2	11,8	-0,47	0,09	-0,51	1	D2	5,6	17,3	-1,88	1,75	-3,31	4			
Z26	22,4	9,6	0,58	-0,59	1,06	5	S18	15,7	11,6	-0,41	0,04	-0,40	1	D31	7,7	15,3	-1,57	1,15	-2,47	4			
Z30	23,5	9,3	0,74	-0,67	1,28	5	S19	16,2	11,4	-0,32	-0,02	-0,27	1	D37	7,3	14,2	-1,63	0,81	-2,22	4			
S7	21,4	9,8	0,44	-0,51	0,86	5	S22	15,6	11,7	-0,42	0,05	-0,43	1	Z16	7,2	16,1	-1,64	1,39	-2,76	4			
S21	22,0	9,7	0,52	-0,55	0,98	5	S24	19,6	10,4	0,16	-0,35	0,47	1	Z39	8,5	15,2	-1,45	1,10	-2,33	4			
S23	22,2	9,6	0,55	-0,57	1,02	5	STZ1	20,4	10,1	0,29	-0,42	0,65	1	S2	8,9	14,9	-1,40	1,03	-2,21	4			
S26	23,3	9,3	0,71	-0,66	1,25	5	D7	11,3	9,8	-1,04	-0,52	-0,48	12	S3	7,8	15,7	-1,56	1,26	-2,57	4			
STZ2	22,3	9,6	0,56	-0,58	1,04	5	D24	13,3	9,2	-0,75	-0,70	-0,05	12	S6	10,4	14,0	-1,17	0,74	-1,74	4			
D8	18,1	8,8	-0,05	-0,82	0,70	11	D32	12,1	11,3	-0,93	-0,06	-0,79	12	S9	10,2	14,1	-1,20	0,78	-1,81	4			
D19	11,1	7,5	-1,07	-1,21	0,13	11	GM14	12,0	9,2	-0,94	-0,70	-0,22	12	S15	10,4	14,0	-1,17	0,74	-1,74	4			
D25	14,8	8,4	-0,53	-0,94	0,37	11	ST2	24,1	17,7	0,82	1,88	-0,96	14	S16	9,6	14,5	-1,30	0,90	-2,00	4			
D28	17,3	8,2	-0,17	-1,00	0,76	11	ST10	21,9	17,4	0,51	1,77	-1,15	14	D4	12,4	18,3	-0,88	2,05	-2,68	8			
D45	18,3	8,1	-0,02	-1,02	0,91	11								D18	13,3	17,0	-0,75	1,66	-2,20	8			
GM11	16,3	6,7	-0,31	-1,47	1,05	11								D39	14,0	19,6	-0,65	2,45	-2,82	8			
ST7	17,8	9,3	-0,09	-0,68	0,54	11								D44	13,2	20,7	-0,77	2,78	-3,23	8			
														GM8	14,0	19,9	-0,65	2,54	-2,90	8			
														GM3	7,0	23,2	-1,67	3,54	-4,74	15			
														GM7	12,0	23,6	-0,94	3,64	-4,18	15			

Tab. 5.4 – Valori di J_v , I_b e ISD per le 15 classi di ammasso individuate e denominate dalla A alla Q.

5.2 IL CRITERIO DI ROTTURA DI HOEK & BROWN: UN APPROCCIO EQUIVALENTE CONTINUO PER DEFINIRE I PARAMETRI DI RESISTENZA

Una volta definite le classi di ammasso così come esposto nel precedente paragrafo, è ora necessario attribuire alle stesse le caratteristiche di resistenza e deformabilità indispensabili per poter affrontare qualsiasi analisi di stabilità dei versanti presi ad esempio. Per fare ciò sono stati utilizzati, rispettivamente, gli approcci equivalenti continui di Hoek & Brown (1980 e successive modifiche) e di Sridevi & Sitharam (2000).

La determinazione dei parametri di resistenza è stata quindi effettuata tramite l'utilizzo del criterio di rottura proposto da Hoek & Brown (1980 e successive modifiche). Fine ultimo è stato quello di attribuire ad ogni classe di ammasso individuata un valore di coesione equivalente "c" (in MPa) e di angolo di attrito equivalente "φ" (°). Si tratta di un criterio di rottura valido per ammassi rocciosi, e tiene conto dei fattori che determinano la rottura di un mezzo roccioso a grande scala, quali, ad esempio, la non linearità della resistenza in funzione dello stato tensionale (prevista, invece, nel criterio di rottura di Mohr-Coulomb), l'influenza del tipo di roccia e del suo stato d'ammasso, il rapporto fra la resistenza a compressione e quella a trazione, e la diminuzione dell'angolo di attrito interno con l'aumento della tensione di confinamento. Nel corso degli anni, a partire dal 1980, gli stessi autori hanno numerose volte aggiornato il loro lavoro (Hoek, 1983, 1990, 1994; Hoek & Brown, 1988, 1997; Hoek et alii, 1992, 1998; Marinou & Hoek, 2000, 2001). Senza addentrarci nello specifico delle singole evoluzioni che questo criterio di rottura ha avuto, occorre qui sottolineare che nel presente lavoro si è fatto specifico riferimento a quanto lo stesso Hoek ha riportato in un lavoro del 2002 (Hoek et alii, 2002) che di fatto rappresenta la sintesi di quanto fatto in precedenza. Nello stesso lavoro si fa riferimento alla messa a punto di uno specifico software (RocLab) specifico per la determinazione dei parametri di rottura tramite il criterio di Hoek & Brown. Nel presente lavoro si è comunque preferito ricavare questi valori autonomamente e i relativi grafici e tabelle di sintesi per le 15 classi di ammasso vengono riportati nell'Appendice 4.

Gli Autori hanno sviluppato un'espressione valida anche per ammassi rocciosi fratturati di cattiva qualità come materiali teneri ed alterati (Hoek, 1994), che si traduce nella seguente relazione:

$$\sigma'_1 = \sigma'_3 + \sigma_{ci} * \left(m_b * \frac{\sigma'_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

dove

- σ'_1 e σ'_3 sono rispettivamente la tensione principale efficace massima e minima a rottura (MPa);
- m_b è un parametro relativo all'ammasso roccioso ricavato dalla relazione

$$m_b = m_i * \text{EXP} \left(\frac{\text{GSI} - 100}{28 - 14 * D} \right);$$

- m_i è una costante della matrice rocciosa ricavabile da tabelle fornite dagli stessi autori, ed è pari a 33 per gli gneiss;
- σ_{ci} è la resistenza a compressione uniassiale della matrice rocciosa e, dalle prove di laboratorio, risulta essere pari a 94 MPa.
- il GSI (*Geological Strength Index*) (Hoek, 1995) è l'indice di classificazione per gli ammassi rocciosi di cui si è già discusso nel Capitolo 4. Il suo valore è stato ricavato da quello del BRMR secondo l'equazione

$$\text{GSI} = \text{BRMR} - 5$$

dove BRMR (*Basic Rock Mass Rating*) è l'indice proposto da Bieniawski (1973 e successive modifiche) calcolato per le 15 classi di ammasso a partire dai punteggi dei cinque indici proposti dall'autore. I valori di BRMR e di GSI per le 15 classi di ammasso individuate sono riportate in Tab. 5.5. A loro volta i valori di RQD (%) sono stati ricavati tramite l'equazione di Palmström (1982)

$$\text{RQD} (\%) = 115 - 3,3 * J_v.$$

I valori di J_v e di RQD per le 15 classi di ammasso individuate sono riportate nella Tab. 5.6.

CLASSE di AMMASSO	BRMR	GSI
	Punteggio	Punteggio
Q	35	30
P	37	32
O	40	35
N	43	38
M	44	39
L	49	44
I	44	39
H	49	44
G	52	47
F	46	41
E	52	47
D	51	46
C	56	51
B	55	50
A	58	53

Tab. 5.5 – Punteggi di BRMR e di GSI per le 15 classi di ammasso individuate.

CLASSE	Jv	RQD
Q	35,7	0,0
P	31,0	12,7
O	27,5	24,3
N	21,0	45,7
M	22,8	39,8
L	16,2	61,5
I	22,9	39,4
H	17,7	56,6
G	12,2	74,7
F	23,0	39,1
E	13,0	72,1
D	17,3	57,9
C	8,5	87,0
B	13,4	70,8
A	9,5	83,7

Tab. 5.6 – Valori di RQD (%) attribuiti alle 15 classi di ammasso individuate attraverso l'equazione di Palmström (1982).

I valori di BRMR variano da 35 per la classe Q (quella più scadente) a 58 per la classe di ammasso A (quella con migliori caratteristiche geomeccaniche), e di conseguenza i valori di GSI variano tra 30 e 53;

- D è un fattore che dipende dal grado di disturbo dell'ammasso roccioso e dal campo di stress; varia tra zero, per gli ammassi indisturbati, e uno, per quelli fortemente alterati. In ogni caso si tratta di un dato qualitativo, come dimostra il fatto che gli stessi autori propongano una tabella descrittiva per la stima del suo valore. Dal momento che il grado di disturbo dipende in buona approssimazione dalla classe di ammasso di appartenenza, in questa sede si è deciso di attribuirgli un valore proporzionale a quello dell'ISD;
- s e a sono costanti dell'ammasso roccioso e vengono definite attraverso le seguenti relazioni:

$$s = \text{EXP} \left(\frac{\text{GSI}-100}{9-3D} \right)$$

$$a = \frac{1}{2} + \frac{1}{6} * (e^{-\text{GSI}/15} - e^{-20/3}).$$

Ipotizzando, dunque, dei valori di σ_3 , ed applicando l'equazione proposta da Hoek & Brown, è possibile ottenere altrettanti valori di σ_1 , che, insieme, definiscono l'involuppo a rottura.

Di seguito viene riportato il procedimento utilizzato per definire i parametri c e ϕ per la classe di ammasso H. Lo stesso procedimento è stato applicato per le altre 14 classi, come riportato nell'Appendice 4. La Fig. 5.3 mostra l'involuppo a rottura costruito col criterio di Hoek & Brown (1980 e successive modifiche) per la classe di ammasso H.

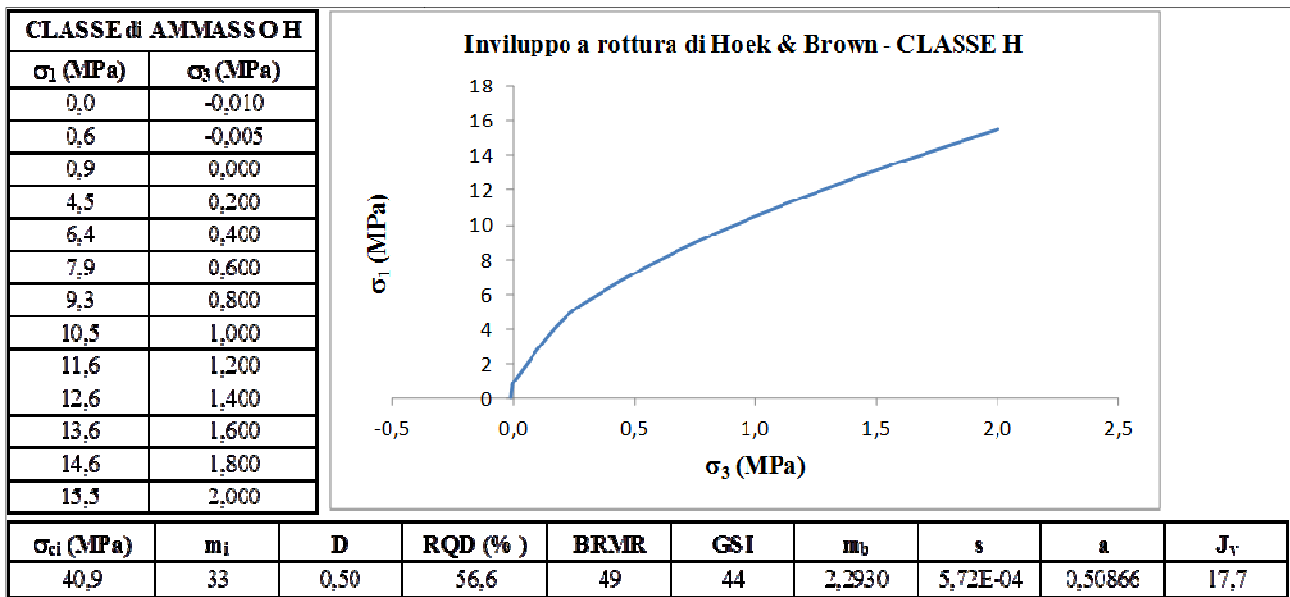


Fig. 5.3 – Applicazione del criterio di rottura di Hoek & Brown (1980 e successive modifiche) per la classe di ammasso H.

Essendo noto l’inviluppo a rottura, è stato possibile rappresentarne il rispettivo percorso tensionale in un diagramma p - q. Esso consente di rappresentare lo stato tensionale a rottura per ogni coppia di valori $\sigma_1 - \sigma_3$ con un solo punto. La congiunzione dei diversi punti, corrispondenti alle diverse coppie di valori $\sigma_1 - \sigma_3$ ipotizzate, è definita come percorso tensionale a rottura (che verrà di seguito indicata anche come K_f line). In particolare, il valore di p è definito tramite l’equazione

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$$

mentre q si ricava tramite l’equazione

$$q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$$

e pertanto entrambi questi termini sono espressi in MPa. La Fig. 5.4 mostra il percorso tensionale a rottura per la classe di ammasso H. Nella stessa figura viene anche riportata la retta di interpolazione dei punti p - q inseriti nel piano. A partire dall’equazione di tale retta è stato possibile, attraverso l’utilizzo di semplici relazioni trigonometriche, ricavare in parametri di resistenza dell’ammasso.

L’angolo di attrito interno dell’ammasso “ ϕ ” (°) è definito come l’arco il cui seno è il coefficiente angolare della retta di interpolazione della K_f line, mentre la coesione di ammasso “c” (MPa) è data dal rapporto fra l’intercetta della retta di interpolazione della K_f line con l’asse delle ordinate e

l'angolo di attrito ϕ . Nel caso della classe di ammasso H il valore di c è pari a 0,31 MPa, mentre l'angolo di attrito è pari a 50° .

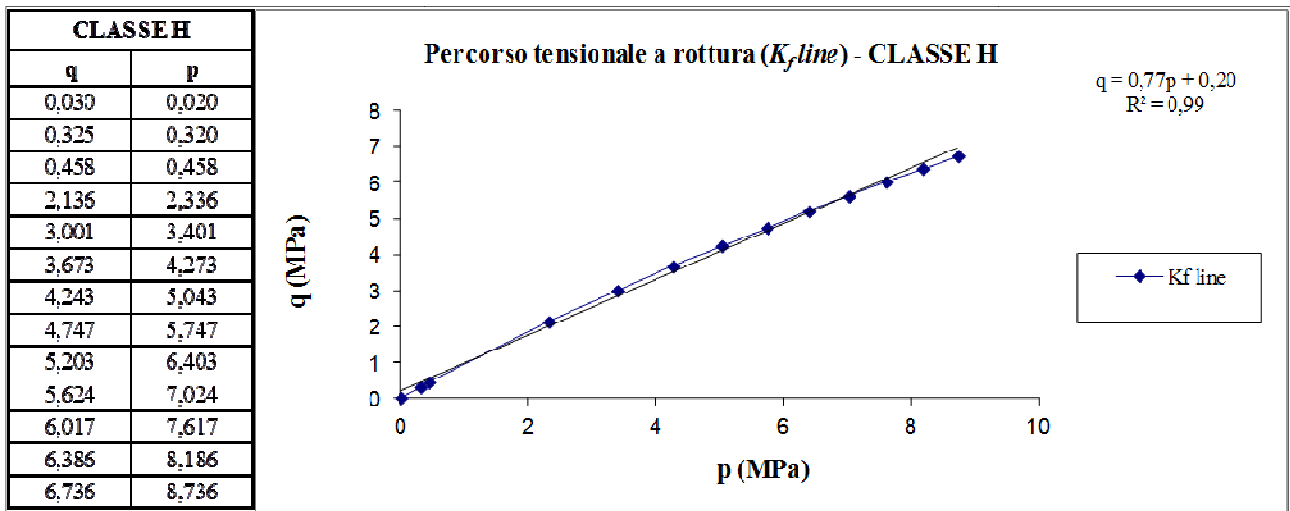


Fig. 5.4 – Grafico $p - q$ e relativo percorso tensionale a rottura per la classe di ammasso H. Viene riportata la retta di interpolazione dei valori di p e q ricavati e il relativo coefficiente di regressione R^2 .

Per valutare la resistenza a trazione degli ammassi rocciosi, Hoek et alii (2002) propongono la seguente relazione

$$\sigma_t = - \frac{s * \sigma_{ci}}{m_b}$$

che si ottiene ponendo $\sigma_1 = \sigma_3 = \sigma_t$ nell'equazione generale del criterio di rottura, e rappresenta una condizione di tensione bi-assiale.

Nella Tab. 5.7 vengono riportati tutti i dati relativi alle 15 classi di ammasso utilizzati per definire il criterio di rottura di Hoek & Brown, nonché i valori dei parametri da esso ricavati (c , ϕ e σ_t).

Classe	σ_{ci} (MPa)	m_b	D	RQD (%)	BRMR	GSI	m_b	s	a	Jv	ϕ (°)	c (MPa)	σ_t (MPa)
Q	32,7	33	0,95	0,0	35	30	0,2821	1,14E-05	0,52234	35,7	28	0,16	-0,001
P	34,5	33	0,85	12,7	37	32	0,4833	2,64E-05	0,51953	31,0	34	0,19	-0,002
O	36,5	33	0,75	24,3	40	35	0,8043	6,58E-05	0,51595	27,5	39	0,20	-0,003
N	37,2	33	0,70	45,7	43	38	1,0941	1,25E-04	0,51302	21,0	42	0,22	-0,004
M	38,2	33	0,65	39,8	44	39	1,3086	1,75E-04	0,51217	22,8	45	0,24	-0,005
L	39,4	33	0,60	61,5	49	44	1,8953	4,19E-04	0,50866	16,2	48	0,24	-0,009
I	40,1	33	0,55	39,4	44	39	1,6349	2,49E-04	0,51217	22,9	47	0,27	-0,006
H	40,9	33	0,50	56,6	49	44	2,2930	5,72E-04	0,50866	17,7	50	0,31	-0,010
G	41,8	33	0,45	74,7	52	47	2,8694	9,80E-04	0,50705	12,2	52	0,31	-0,014
F	43,6	33	0,40	39,1	46	41	2,3693	5,19E-04	0,51062	23,0	51	0,32	-0,010
E	43,7	33	0,40	72,1	52	47	3,0970	1,12E-03	0,50705	13,0	54	0,34	-0,016
D	44,0	33	0,40	57,9	51	46	2,9618	9,85E-04	0,50755	17,3	53	0,35	-0,015
C	46,9	33	0,25	87,0	56	51	4,4661	2,63E-03	0,50535	8,5	56	0,41	-0,028
B	48,3	33	0,20	70,8	55	50	4,5375	2,60E-03	0,50573	13,4	57	0,42	-0,028
A	53,4	33	0,05	83,7	58	53	5,8997	4,94E-03	0,50466	9,5	59	0,53	-0,045

Tab. 5.7 – Tabella riassuntiva dei dati utilizzati per il criterio di rottura di Hoek & Brown (1980 e successive modifiche) e dei parametri da esso ricavati.

5.3 LA DEFORMABILITA' DEGLI AMMASSI ROCCIOSI FRATTURATI: L'APPROCCIO EQUIVALENTE CONTINUO DI SRIDEVI & SITHARAM

Tutti gli ammassi rocciosi sono caratterizzati dalla presenza di discontinuità che interrompono la continuità della roccia intatta. Queste discontinuità, a seconda del tipo di roccia, possono essere dovute alla stratificazione, alla presenza di fratture e faglie, alla foliazione, alla scistosità o al clivaggio. Il comportamento di un ammasso roccioso cambia se la roccia è intatta, fratturata, fortemente fratturata o frantumata (Sridevi & Shitaram, 2000). Pur essendo questo un concetto ben noto e più volte già ribadito, è importante riproporlo nell'introdurre il paragrafo dedicato alla trattazione degli approcci equivalenti continui finalizzati alla definizione dei parametri di deformabilità degli ammassi rocciosi. Il numero di discontinuità presenti all'interno di un ammasso roccioso è, in diversi casi tra cui il nostro, molto elevato, per cui non è possibile avere informazioni su ognuna di esse, né, tantomeno, trattarle singolarmente. L'esistenza delle discontinuità e dei piani di rottura, influenza significativamente il comportamento geomeccanico dell'ammasso roccioso, determinandone, in particolare, una riduzione del modulo di deformabilità, un comportamento anisotropo, ed una risposta alle sollecitazioni esterne di tipo non-lineare. Tutti questi effetti possono essere tenuti in considerazione trattando l'originale mezzo discontinuo, come un mezzo continuo ed omogeneo, mediante relazioni empiriche che incorporino i risultati di analisi condotte distintamente sulla roccia intatta e sulle discontinuità. La valutazione delle caratteristiche di resistenza e deformabilità dell'ammasso roccioso presenta, in ogni caso, delle difficoltà teoriche e sperimentali. I metodi che consentono di caratterizzare gli ammassi rocciosi fratturati come mezzi continui ed omogenei, vengono definiti “**approcci equivalenti continui**”. In questi metodi le proprietà degli ammassi rocciosi sono rappresentate come funzioni delle proprietà della roccia intatta e delle proprietà delle fratture.

In bibliografia sono riportati diversi modelli che descrivono gli ammassi rocciosi fratturati, e che, mediante l'approccio equivalente continuo, forniscono a questi ammassi un modulo di deformabilità, che riduce di una certa quantità quello della roccia intatta. Ad esempio essi possono essere ricavati, attraverso l'utilizzo di semplici formule empiriche, dai più importanti indici di classificazione degli ammassi rocciosi, come quelli precedentemente visti e discussi. Zhang & Einstein (2004) hanno proposto una relazione tra il valore di RQD (%) e quello del modulo di deformabilità (E) secondo la formula

$$\frac{E_m}{E_r} = 10^{0,0186 \cdot RQD - 1,91}$$

dove E_m è il modulo di deformabilità dell'ammasso roccioso, mentre E_r è il modulo della roccia intatta.

Un altro metodo è quello proposto da Priest et alii (1993), nel quale grande importanza è rivestita dai valori di spaziatura dei diversi sistemi di discontinuità e quindi dall' I_b . Secondo tale metodo il rapporto tra il modulo di deformabilità di un ammasso roccioso fratturato (E_{jr} ; $jr = jointed\ rock$) e quello della roccia intatta (E_{ir} ; $ir = intact\ rock$), è pari all' MRF (*Modulus Reduction Factor*) secondo l'equazione

$$\frac{E_{jr}}{E_{ir}} = \text{MRF}$$

dove l'MRF si ricava tramite l'equazione

$$\text{MRF} = \left[1 + \left(\frac{E_{ir}}{I_b * K_n} \right) \right]^{-1}$$

dove K_n indica il valore di resistenza a compressione uniassiale ricavata tramite prove sclerometriche in sito. Il valore di MRF può assumere valori compresi tra 0 e 1, in maniera inversamente proporzionale al grado di fratturazione ed alterazione dell'ammasso.

Nel presente lavoro si è deciso di utilizzare, fra i diversi metodi che la letteratura propone, il metodo di approccio equivalente continuo proposto da Sridevi & Shitaram (2000). Anch'esso, come quelli precedentemente descritti, presenta delle inevitabili semplificazioni in relazione alle complesse caratteristiche che descrivono qualsiasi ammasso roccioso, e ancor di più un ammasso fortemente fratturato ed alterato.

Sulla base di precedenti studi (Arora, 1987; Ramamurthy, 1994; Verman et alii, 1997), Sridevi & Shitaram (2000) hanno messo a punto un metodo di approccio equivalente continuo in base al quale le proprietà della roccia fratturata sono rappresentate da una serie di relazioni empiriche che esprimono le proprietà della fratturazione media come una funzione del *Joint factor* (J_f) (definito da Ramamurthy, 1994) e le proprietà della roccia intatta. E' importante far notare come gli studi condotti dagli autori, che si sono protratti in tutto l'ultimo decennio (Sitharam et alii, 2001, 2007; Sitharam & Madhavi Latha, 2002), hanno preso spunto, e si sono evoluti, dall'esigenza di caratterizzare fronti di scavo in roccia a fini prevalentemente ingegneristici. Infatti i casi di studio da loro proposti sono quelli relativi alla costruzione di stazioni elettriche sotterranee (una a Tokyo, l'altra in India) e ai problemi di stabilità di una miniera di ferro in Svezia. Nei primi due casi l'analisi delle proprietà degli ammassi rocciosi ha riguardato una porzione di terreno piuttosto

puntuale, mentre nel terzo l'analisi ha riguardato un settore decisamente più ampio (alcune centinaia di metri). Nel presente lavoro, invece, si è voluto testare questo metodo in un ambito prettamente geologico, come quello dell'analisi di stabilità dei fenomeni gravitativi. Ciò ha comportato, innanzitutto, un cambio, o meglio un incremento, di scala, passando da quella di scavo a quella di versante, rappresentando questo uno degli aspetti peculiari di tale lavoro.

Il fattore che influenza i valori di resistenza ed il modulo di una roccia fratturata, secondo Sridevi & Shitaram (2000), è il *Joint factor* (J_f). Esso è definito tramite la relazione empirica

$$J_f = \frac{J_v}{n \cdot r}$$

dove:

- J_v = numero di discontinuità per metro cubo di roccia;
- n = parametro legato all'inclinazione (β) del sistema di discontinuità più pervasivo e meno spaziato;
- r = parametro legato alla resistenza a compressione dei giunti e quindi al valore di Q_c ricavato dalle prove sclerometriche.

In Tab. 5.8 vengono riportati i valori di "n" corrispondenti all'inclinazione (β) del sistema di discontinuità più pervasivo individuato in sito (Ramamurthy, 1994). Nella Tab. 5.9, invece, vengono riportati i valori di "r" in relazione al Q_c , secondo quanto proposto dallo stesso autore.

β (°)	"n"
0	0,82
10	0,46
20	0,11
30	0,05
40	0,07
50	0,31
60	0,46
70	0,63
80	0,82
90	1,00

Tab. 5.8 – Valori di "n" in relazione all'angolo β (Ramamurthy, 1994).

Q_c (MPa)	"r"
2,5	0,30
5	0,45
15	0,60
25	0,70
45	0,80
65	0,90
100	1,00

Tab. 5.9 – Valori di "r" in relazione alla resistenza a compressione uniassiale Q_c (Ramamurthy, 1994).

Il J_f rappresenta, quindi, l'integrazione delle proprietà della fratturazione, in quanto tiene conto della frequenza delle discontinuità, dell'orientazione e della resistenza di ammasso. Il suo valore sarà di conseguenza proporzionale al grado di fratturazione ed alterazione dell'ammasso roccioso.

Attraverso un'analisi statistica dei numerosi dati sperimentali a disposizione relative sia alle prove di compressione uniassiale sia alle prove triassiali con differenti pressioni di confinamento, Sridevi & Shitaram hanno ricavato delle relazioni che consentono di calcolare il modulo elastico tangente di un ammasso roccioso fratturato, per differenti pressioni di confinamento.

La relazione che consente di calcolare il modulo elastico tangente, data da Ramamurty (1994), è la seguente

$$E_j (\sigma_3 = 0) = \text{EXP}(-1,15 \cdot 10^{-2} \cdot J_f) \cdot E_i (\sigma_3 = 0)$$

dove $E_j (\sigma_3 = 0)$ è il modulo elastico tangente dell'ammasso roccioso fratturato per una pressione di confinamento nulla, mentre $E_i (\sigma_3 = 0)$ è il modulo elastico della matrice rocciosa. Il valore di $E_i (\sigma_3 = 0)$ è stato ricavato dalle prove di laboratorio, e precisamente dalle prove UCS. Esso risulta pari a 51 GPa. Attraverso l'utilizzo della precedente relazione sono stati così ricavati i valori del modulo elastico tangente relativi alle 15 classi di ammasso individuate (Tab. 5.10).

CLASSE di AMMASSO	Jv	Ib (cm)	ISD	N° osservazioni	Qc (MPa)	"r"	"n"	Jf	Ei ($\sigma_3 = 0$) (GPa)	Ej ($\sigma_3 = 0$) (GPa)
Q	35,7	6,3	3,75	5	32,7	0,75	0,4	119	51	13
P	31,0	7,3	2,83	7	34,5	0,76	0,4	102	51	16
O	27,5	9,0	1,90	11	36,5	0,76	0,4	90	51	18
N	21,0	6,9	1,60	5	37,2	0,77	0,4	68	51	23
M	22,8	9,6	1,12	13	38,2	0,77	0,5	59	51	26
L	16,2	8,1	0,64	7	39,4	0,78	0,5	42	51	32
I	22,9	12,5	0,34	6	40,1	0,78	0,5	59	51	26
H	17,7	11,1	0,00	33	40,9	0,78	0,5	45	51	30
G	12,2	9,9	-0,38	4	41,8	0,79	0,6	26	51	38
F	23,0	17,5	-1,06	2	43,6	0,79	0,6	49	51	29
E	13,0	12,9	-1,11	29	43,7	0,79	0,6	27	51	37
D	17,3	15,4	-1,22	4	44,0	0,80	0,7	31	51	36
C	8,5	15,0	-2,29	11	46,9	0,80	0,7	15	51	43
B	13,4	19,1	-2,77	5	48,3	0,82	0,7	23	51	39
A	9,5	23,4	-4,46	2	53,4	0,84	0,7	16	51	42

Tab. 5.10 – Valori di J_f e del modulo elastico tangente (E_j) per le 15 classi di ammasso individuate per una pressione di confinamento nulla ($\sigma_3 = 0$) attraverso l'approccio equivalente continuo di Sridevi & Sitharam (2000).

Come si può notare il diverso grado di fratturazione degli ammassi rocciosi è causa di notevoli variazioni dei valori del modulo elastico, e, di conseguenza, dei valori degli altri moduli di deformabilità. Infatti, attraverso semplici relazioni presenti in letteratura è stato possibile, a partire dal modulo elastico, ricavare sia il modulo di taglio (G) degli ammassi rocciosi, sia il modulo di incompressibilità (K). In particolare il modulo di taglio è stato ricavato tramite l'equazione

$$G \text{ (GPa)} = \frac{E \text{ (GPa)}}{2 * (1 + \nu)}$$

dove ν è il coefficiente di Poisson, pari a 0,25 come ricavato dalle prove ultrasoniche. Il modulo di incompressibilità è stato invece ricavato secondo l'equazione

$$K \text{ (GPa)} = \frac{E \text{ (GPa)}}{3 * (1 - 2\nu)}$$

La Tab. 5.11 riporta i valori dei suddetti moduli per tutte le 15 classi di ammasso.

CLASSE di AMMASSO	ISD	$E_j (\sigma_3 = 0)$ (GPa)	ν	$G_j (\sigma_3 = 0)$ (GPa)	$K_j (\sigma_3 = 0)$ (GPa)
Q	3,75	13	0,25	5	9
P	2,83	16	0,25	6	11
O	1,90	18	0,25	7	12
N	1,60	23	0,25	9	16
M	1,12	26	0,25	10	17
L	0,64	32	0,25	13	21
I	0,34	26	0,25	10	17
H	0,00	30	0,25	12	20
G	-0,38	38	0,25	15	25
F	-1,06	29	0,25	12	19
E	-1,11	37	0,25	15	25
D	-1,22	36	0,25	14	24
C	-2,29	43	0,25	17	29
B	-2,77	39	0,25	16	26
A	-4,46	42	0,25	17	28

Tab. 5.11 – Valori dei moduli di deformabilità (modulo elastico tangente (E_j), modulo di taglio (G_j) e modulo di incompressibilità (K_j)) per una pressione di confinamento nulla ($\sigma_3 = 0$) per le 15 classi di ammasso individuate.

Questa variazione dei moduli in funzione della classe di ammasso evidenzia inequivocabilmente la notevole importanza che rivestono prima il rilievo geomeccanico in sito, e poi le successive scelte metodologiche di analisi dei dati. Lo studio del comportamento fisico e meccanico degli ammassi rocciosi fratturati non può infatti prescindere da un accurato e ben mirato rilevamento geomeccanico da cui dipende quindi il risultato finale di qualsiasi lavoro su questa tematica.

L'approccio equivalente continuo proposto da Sridevi & Sitharam (2000) consente inoltre di ottenere il modulo elastico di una roccia fratturata ad una pressione di confinamento non nulla. Per fare ciò è necessario introdurre un ulteriore parametro, ossia la resistenza a compressione uniassiale di una roccia fratturata (σ_{ci}), a sua volta legato alla resistenza a compressione della roccia intatta (σ_{ci}) secondo la relazione

$$\sigma_{cj} = \sigma_{ci} * \text{EXP}(-0,008 * J_f).$$

Il modulo elastico tangente per un ammasso roccioso fratturato ad una determinata pressione di confinamento (σ_3) si ottiene, infine, dalla formula

$$E_j(\sigma_3) = \frac{E_j(\sigma_3 = 0)}{1 - \text{EXP}\left[-0,1 * \left(\frac{\sigma_{cj}}{\sigma_3}\right)\right]}$$

Quest'ultima relazione ha consentito di meglio definire i modelli geologico-tecnici proposti, in quanto è stato possibile suddividere in intervalli discreti, in funzione della profondità, i diversi versanti studiati. Questi intervalli sono stati scelti in funzione delle diverse pressioni di confinamento cui sono stati sottoposti i provini di roccia nelle prove triassiali (descritte nel Capitolo 3), ovvero 1, 5, 10 e 20 MPa. A queste pressioni corrispondono le seguenti profondità: 57, 286, 566 e 1132 m dal piano campagna. Si è scelto di utilizzare tali profondità in quanto il dato di ingresso nelle precedenti relazioni, ovvero il σ_{ci} , è stato ricavato dalle prove triassiali. Questa scelta, che costituisce una piccola modifica alla metodologia proposta da Sridevi & Sitharam (2000), resa possibile dall'esecuzione delle prove di laboratorio, consente quindi di affinare ulteriormente la classificazione e la successiva zonazione geomeccanica da cui sono scaturiti i modelli geologico-tecnici di seguito presentati.

La Tab. 5.12 mostra i valori del modulo elastico per le differenti classi di ammasso calcolati per la pressione di confinamento di 1 MPa. Dal confronto con i valori ricavati a partire dai dati delle prove UCS e valide per gli ammassi rocciosi di superficie (Tab. 5.10), si evince che non vi sono differenze significative tra i moduli differentemente calcolati (la differenza si riscontra alla prima cifra decimale). Questo perché si parla ancora di pressioni di confinamento modeste. Date queste considerazioni si è deciso di utilizzare i moduli ricavati a partire dai dati di compressione triassiale per una pressione di confinamento pari a 1 MPa per gli ammassi rocciosi presenti tra la superficie topografica e i 57 m di profondità (Tab. 5.12). In Tab. 5.13 vengono invece riportati i valori del modulo di taglio (G_j) e del modulo di incompressibilità (K_j) relativi alle 15 classi di ammasso per una pressione di confinamento pari a 1 MPa.

CLASSE di AMMASSO	ISD	Jf	σ_3 (MPa)	σ_{ci} (MPa) ($\sigma_3=1$)	σ_{cj} (MPa) ($\sigma_3=1$)	E_j ($\sigma_3 = 0$) (GPa)	E_j ($\sigma_3 = 1$) (GPa)
Q	3,75	119	1	74,1	28,6	13	13
P	2,83	102	1	74,1	32,8	16	16
O	1,90	90	1	74,1	35,9	18	18
N	1,60	68	1	74,1	42,9	23	23
M	1,12	59	1	74,1	46,1	26	26
L	0,64	42	1	74,1	53,1	32	32
I	0,34	59	1	74,1	46,3	26	26
H	0,00	45	1	74,1	51,5	30	30
G	-0,38	26	1	74,1	60,3	38	38
F	-1,06	49	1	74,1	50,3	29	29
E	-1,11	27	1	74,1	59,5	37	37
D	-1,22	31	1	74,1	57,9	36	36
C	-2,29	15	1	74,1	65,6	43	43
B	-2,77	23	1	74,1	61,5	39	39
A	-4,46	16	1	74,1	65,1	42	42

Tab. 5.12 – Valori del modulo elastico tangente (E_j) per le 15 classi di ammasso individuate per una pressione di confinamento pari a 1 MPa secondo Sridevi & Sitharam (2000).

CLASSE di AMMASSO	ISD	E_j ($\sigma_3 = 1$) (GPa)	ν	G_j ($\sigma_3 = 1$) (GPa)	K_j ($\sigma_3 = 1$) (GPa)
Q	3,75	12	0,25	5	8
P	2,83	15	0,25	6	10
O	1,90	17	0,25	7	12
N	1,60	22	0,25	9	15
M	1,12	25	0,25	10	17
L	0,64	30	0,25	12	20
I	0,34	25	0,25	10	17
H	0,00	29	0,25	12	19
G	-0,38	36	0,25	15	24
F	-1,06	28	0,25	11	19
E	-1,11	36	0,25	14	24
D	-1,22	34	0,25	14	23
C	-2,29	41	0,25	16	27
B	-2,77	37	0,25	15	25
A	-4,46	41	0,25	16	27

Tab. 5.13 – Valori dei moduli di deformabilità (modulo elastico tangente (E_j), modulo di taglio (G_j) e modulo di incompressibilità (K_j)) per una pressione di confinamento pari a 1 MPa, per le 15 classi di ammasso individuate.

Analogamente sono stati calcolati i moduli elastici, di taglio e di incompressibilità per ogni classe di ammasso alle pressioni di confinamento di 5, 10 e 20 MPa. Questi valori, riportati nelle tabelle da 5.14 a 5.19, rappresentano rispettivamente i moduli di deformabilità degli ammassi rocciosi per le fasce di profondità da 57 a 286 m, da 286 a 566 m e oltre i 566 m.

CLASSE di AMMASSO	ISD	Jf	σ_3 (MPa)	σ_{ci} (MPa) ($\sigma_3=5$)	σ_{cj} (MPa) ($\sigma_3=5$)	E_j ($\sigma_3 = 0$) (GPa)	E_j ($\sigma_3 = 5$) (GPa)
Q	3,75	119	5	96,8	37,4	13	15
P	2,83	102	5	96,8	42,8	16	18
O	1,90	90	5	96,8	46,9	18	21
N	1,60	68	5	96,8	56,1	23	27
M	1,12	59	5	96,8	60,3	26	30
L	0,64	42	5	96,8	69,4	32	37
I	0,34	59	5	96,8	60,5	26	30
H	0,00	45	5	96,8	67,3	30	35
G	-0,38	26	5	96,8	78,8	38	44
F	-1,06	49	5	96,8	65,7	29	34
E	-1,11	27	5	96,8	77,7	37	43
D	-1,22	31	5	96,8	75,6	36	42
C	-2,29	15	5	96,8	85,7	43	50
B	-2,77	23	5	96,8	80,3	39	46
A	-4,46	16	5	96,8	85,1	42	49

Tab. 5.14 – Valori del modulo elastico tangente (E_j) per le 15 classi di ammasso individuate per una pressione di confinamento pari a 5 MPa secondo Sridevi & Sitharam (2000).

CLASSE di AMMASSO	ISD	E_j ($\sigma_3 = 5$) (GPa)	ν	G_j ($\sigma_3 = 5$) (GPa)	K_j ($\sigma_3 = 5$) (GPa)
Q	3,75	15	0,25	6	10
P	2,83	18	0,25	7	12
O	1,90	21	0,25	8	14
N	1,60	27	0,25	11	18
M	1,12	30	0,25	12	20
L	0,64	37	0,25	15	25
I	0,34	30	0,25	12	20
H	0,00	35	0,25	14	24
G	-0,38	44	0,25	18	30
F	-1,06	34	0,25	14	23
E	-1,11	43	0,25	17	29
D	-1,22	42	0,25	17	28
C	-2,29	50	0,25	20	33
B	-2,77	46	0,25	18	30
A	-4,46	49	0,25	20	33

Tab. 5.15 – Valori dei moduli di deformabilità (modulo elastico tangente (E_j), modulo di taglio (G_j) e modulo di incompressibilità (K_j)) per una pressione di confinamento pari a 5MPa, per le 15 classi di ammasso individuate.

CLASSE di AMMASSO	ISD	Jf	σ_3 (MPa)	σ_{ci} (MPa) ($\sigma_3=10$)	σ_{cj} (MPa) ($\sigma_3=10$)	E_j ($\sigma_3 = 0$) (GPa)	E_j ($\sigma_3 = 10$) (GPa)
Q	3,75	119	10	144,4	55,7	13	17
P	2,83	102	10	144,4	63,9	16	21
O	1,90	90	10	144,4	70,0	18	24
N	1,60	68	10	144,4	83,7	23	30
M	1,12	59	10	144,4	89,9	26	34
L	0,64	42	10	144,4	103,6	32	41
I	0,34	59	10	144,4	90,3	26	34
H	0,00	45	10	144,4	100,4	30	40
G	-0,38	26	10	144,4	117,5	38	50
F	-1,06	49	10	144,4	97,9	29	38
E	-1,11	27	10	144,4	116,0	37	49
D	-1,22	31	10	144,4	112,8	36	47
C	-2,29	15	10	144,4	127,9	43	56
B	-2,77	23	10	144,4	119,8	39	51
A	-4,46	16	10	144,4	126,9	42	55

Tab. 5.16 – Valori del modulo elastico tangente (E_j) per le 15 classi di ammasso individuate per una pressione di confinamento pari a 10 MPa secondo Sridevi & Sitharam (2000).

CLASSE di AMMASSO	ISD	E_j ($\sigma_3 = 10$) (GPa)	ν	G_j ($\sigma_3 = 10$) (GPa)	K_j ($\sigma_3 = 10$) (GPa)
Q	3,75	17	0,25	7	11
P	2,83	21	0,25	8	14
O	1,90	24	0,25	9	16
N	1,60	30	0,25	12	20
M	1,12	34	0,25	14	23
L	0,64	41	0,25	17	28
I	0,34	34	0,25	14	23
H	0,00	40	0,25	16	26
G	-0,38	50	0,25	20	33
F	-1,06	38	0,25	15	25
E	-1,11	49	0,25	19	32
D	-1,22	47	0,25	19	31
C	-2,29	56	0,25	22	37
B	-2,77	51	0,25	20	34
A	-4,46	55	0,25	22	37

Tab. 5.17 – Valori dei moduli di deformabilità (modulo elastico tangente (E_j), modulo di taglio (G_j) e modulo di incompressibilità (K_j)) per una pressione di confinamento pari a 10MPa, per le 15 classi di ammasso individuate.

CLASSE di AMMASSO	ISD	Jf	σ_3 (MPa)	σ_{ci} (MPa) ($\sigma_3=20$)	σ_{cj} (MPa) ($\sigma_3=20$)	E_j ($\sigma_3 = 0$) (GPa)	E_j ($\sigma_3 = 20$) (GPa)
Q	3,75	119	20	221,3	85,4	13	19
P	2,83	102	20	221,3	97,9	16	24
O	1,90	90	20	221,3	107,3	18	27
N	1,60	68	20	221,3	128,3	23	35
M	1,12	59	20	221,3	137,8	26	39
L	0,64	42	20	221,3	158,7	32	47
I	0,34	59	20	221,3	138,3	26	39
H	0,00	45	20	221,3	153,9	30	45
G	-0,38	26	20	221,3	180,1	38	57
F	-1,06	49	20	221,3	150,1	29	44
E	-1,11	27	20	221,3	177,7	37	56
D	-1,22	31	20	221,3	172,8	36	53
C	-2,29	15	20	221,3	196,0	43	64
B	-2,77	23	20	221,3	183,6	39	58
A	-4,46	16	20	221,3	194,5	42	63

Tab. 5.18 – Valori del modulo elastico tangente (E_j) per le 15 classi di ammasso individuate per una pressione di confinamento pari a 20 MPa secondo Sridevi & Sitharam (2000).

CLASSE di AMMASSO	ISD	E_j ($\sigma_3 = 20$) (GPa)	ν	G_j ($\sigma_3 = 20$) (GPa)	K_j ($\sigma_3 = 20$) (GPa)
Q	3,75	19	0,25	8	13
P	2,83	24	0,25	9	16
O	1,90	27	0,25	11	18
N	1,60	35	0,25	14	23
M	1,12	39	0,25	15	26
L	0,64	47	0,25	19	32
I	0,34	39	0,25	16	26
H	0,00	45	0,25	18	30
G	-0,38	57	0,25	23	38
F	-1,06	44	0,25	17	29
E	-1,11	56	0,25	22	37
D	-1,22	53	0,25	21	36
C	-2,29	64	0,25	26	43
B	-2,77	58	0,25	23	39
A	-4,46	63	0,25	25	42

Tab. 5.19 – Valori dei moduli di deformabilità (modulo elastico tangente (E_j), modulo di taglio (G_j) e modulo di incompressibilità (K_j)) per una pressione di confinamento pari a 20MPa, per le 15 classi di ammasso individuate.

Abbiamo dunque a disposizione tutti i parametri sia di resistenza che di deformabilità, in più suddivisi per fasce di profondità, delle 15 classi di ammasso: il peso per unità di volume naturale (γ_n); l'angolo di attrito interno equivalente (ϕ); la coesione equivalente (c); la resistenza a trazione (σ_t); il modulo elastico tangente (E_j); il modulo di taglio (G_j); il modulo di incompressibilità (K_j). Per quanto riguarda l'angolo di attrito, la coesione e la resistenza a trazione per gli ammassi rocciosi che si trovano a profondità superiori ai 57 m, sono stati utilizzati i valori desunti dalle prove di laboratorio, non distinguendo tra le varie classi di ammasso. Questa parziale semplificazione è concorde col fatto che, andando in profondità, le differenze in termini di fratturazione ed alterazione

di ammasso diventano sempre meno marcate. A questo punto per completare i modelli geologico-tecnici è “solo” necessario definire la geometria delle classi di ammasso sia in superficie che in profondità.

6. I MODELLI GEOLOGICO-TECNICI

L'analisi statistica messa a punto e discussa nel precedente capitolo ha consentito di individuare un indice, l'ISD, capace di descrivere, seppur con le limitazioni connesse ad un tipo di analisi complessa come quella degli ammassi rocciosi fratturati, il grado di fratturazione degli stessi. Le metodologie riferibili agli approcci equivalenti continui, sia nel campo delle caratteristiche di resistenza sia in quello delle proprietà deformative, hanno consentito di definire i parametri delle diverse classi di ammasso individuate. Di conseguenza, anche ogni rilievo geomeccanico effettuato in sito è ora riferibile ad una delle classi di ammasso.

Per poter definire i modelli geologico-tecnici delle aree rilevate è necessario compiere un ulteriore passo, ossia valutare la distribuzione dei valori dell'ISD, e quindi delle classi di ammasso, nello spazio. A tal fine ci si è avvalsi di metodologie largamente utilizzate anche nell'ambito delle Scienze della Terra, che fanno riferimento ai più conosciuti ed utilizzati metodi e modelli statistici di correlazione spaziale. In pratica, se i dati dei rilievi geomeccanici ci hanno fornito i valori di ISD per singoli punti, attraverso queste metodologie si cercherà di vedere e successivamente analizzare la distribuzione dei valori di ISD su intere porzioni di territorio. Ciò è stato realizzato attraverso una interpolazione basata su un'analisi geo-spaziale dei dati, da cui sono state ottenute successivamente delle *contour map* (mappe ad isolinee) aventi l'ISD come variabile.

La statistica propone una vasta variabilità di modelli per affrontare un'analisi geo-spaziale. La scelta della metodologia, e quindi dell'algoritmo di stima, più appropriati da utilizzare di volta in volta è legata essenzialmente alle proprietà basilari della variabile presa in esame e, soprattutto, dalla strategia di campionamento ovvero dalla distribuzione delle osservazioni nello spazio (ad esempio se essa è a maglie regolari o irregolare come nel nostro caso).

Uno dei concetti fondamentali connesso all'analisi della distribuzione spaziale di una variabile, è che tutte le mappe che possono essere prodotte tendono ad essere molto più realistiche nelle vicinanze dei punti di controllo (le stazioni geomeccaniche nel nostro caso) piuttosto che nelle zone dove non sono state effettuate osservazioni (Ciotoli, 2005). La qualità del risultato del processo di correlazione spaziale dipende da differenti fattori, come ad esempio la natura del fenomeno che si vuole descrivere, nonché la quantità e la densità del numero dei punti di osservazione e la qualità delle singole misure. Inoltre, è importante la posizione dei punti all'interno dell'area esaminata, in quanto punti di osservazione disposti su una griglia regolare forniscono, in linea generale, un'informazione più affidabile rispetto a punti disposti in maniera casuale o raggruppata. Apro qui una piccola parentesi per evidenziare una delle motivazioni che ha portato alla costruzione di

contour map solo alla scala del versante piuttosto che per l'intero territorio rilevato e cartografato (Allegato 1). Se infatti si analizza la distribuzione dei punti di rilievo sull'intera area si può facilmente vedere come essa sia caratterizzata da raggruppamenti molto concentrati a fronte di vaste porzioni in cui le osservazioni sono praticamente assenti. Secondo quanto precedentemente esposto, quindi, ciò comporta una inevitabile diminuzione di significatività nella stima dei valori di ISD. La scelta di privilegiare l'analisi di delimitate porzioni di territorio, pur non potendo evitare la disposizione casuale dei dati, ha quantomeno consentito di minimizzare gli effetti negativi sull'interpolazione areale ascrivibili alla presenza di marcati raggruppamenti dei punti di rilievo. Quanto detto non esclude certo la possibilità di analizzare i dati nel loro complesso, ma ai fini del progetto di ricerca qui esposto, e soprattutto in relazione alle considerazioni più volte ribadite circa le sue linee guida, si è ritenuto che una tale tipologia di analisi rappresentasse una perdita di rigorosità troppo elevata.

Tornando al processo seguito nel presente lavoro, tra i diversi strumenti di calcolo che permettono una gestione razionale delle informazioni disponibili, si è scelto di utilizzare il *kriging*, uno stimatore geostatistico che oltre i fattori già evidenziati, possiede due importanti caratteristiche (Ciotoli, 2005):

1. è esatto, cioè restituisce, nei punti dove si ha l'informazione, il suo vero valore;
2. per ogni valore stimato fornisce la varianza di stima, un parametro che consente la valutazione dell'accuratezza della stima stessa.

Il *kriging* fa parte delle tecniche di regressione lineare che possono essere definite mediante l'equazione

$$\hat{Z}_x = \sum_{i=1}^n \lambda_i(x) * Z(x_i)$$

dove \hat{Z}_x costituisce il valore della variabile Z (l'ISD nel nostro caso) nel punto che deve essere stimato, $Z(x_i)$ il valore della variabile Z nell'i-esimo punto di osservazione, e λ_i sono i pesi che dipendono dalla localizzazione spaziale di \hat{Z}_x e che soddisfano la condizione

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i(x) = 1$$

in cui il valore di una determinata variabile in un punto non campionato è stimato a partire dai valori assunti dai punti di osservazione più vicini (Ciotoli, 2005).

E' importante notare come l'applicazione del *kriging* permetta di stimare i valori posti ai nodi di una griglia regolare a partire da dati irregolarmente distribuiti, situazione inevitabile per quasi tutte le analisi geomeccaniche.

Esistono diversi tipi di *kriging* (semplice, ordinario, universale, ecc.) a seconda degli obiettivi che ci si pone. Tra questi, nel presente lavoro si è deciso di utilizzare il *kriging* semplice puntuale, che è la forma matematicamente meno complicata. I successivi passaggi metodologici seguiti al fine di definire i modelli geologico-tecnici evidenzieranno come, a differenza delle analisi statistiche presentate nel precedente capitolo, in questo caso la scelta di un metodo piuttosto che un altro, a patto di soddisfare le condizioni essenziali di ognuno, non influisca in maniera decisiva sul risultato finale. Ad ogni modo la scelta di tale forma di *kriging* presenta anche altri vantaggi.

Il *kriging* semplice consiste in una media pesata dei valori misurati nei punti di osservazione $Z(x)$ all'interno di un'area intorno al punto che deve essere stimato $Z(x_0)$. In pratica, solo i punti di osservazione più vicini sono significativi per la stima. Questa considerazione risulta pienamente congruente con quanto detto circa le caratteristiche dell'ISD, e quindi del grado di fratturazione di un ammasso roccioso. Infine, bisogna rimarcare come il *kriging* semplice risulti meno accurato e in genere produca mappe più "addolcite" ed esteticamente più piacevoli rispetto alle altre tipologie.

Nel presente lavoro, per la definizione delle mappe di correlazione spaziale secondo i criteri e metodi precedentemente discussi, è stato utilizzato il *software Surfer8* prodotto dalla *Golden Software*. In questo modo è stato possibile ottenere delle carte dell'ISD, o carte geomeccaniche, nelle aree della frana Pacì, della frana Feliciusu e della frana Santa Trada. Esse sono riportate nelle tre tavole costituenti l'Allegato 3 e hanno rappresentato la base di partenza per la definizione dei diversi modelli geologico-tecnici. Ognuno di essi è frutto di specifiche considerazioni e analisi esclusivamente riferibili al singolo contesto geologico e strutturale dell'area, per cui esse verranno distintamente discusse nei successivi paragrafi. In linea generale i criteri che hanno guidato tale percorso sono due:

1. congruenza del modello geologico-tecnico con quello geologico;
2. priorità dei punti di osservazione (rilievi geomeccanici) nella scelta della classi di ammasso.

Per quanto concerne il primo di questi due punti è necessario sottolineare che le caratteristiche geometriche delle fasce di intensa fratturazione, e in particolare il loro spessore, sono state a volte anche desunte dai dati geomeccanici. Si tratta quindi di una fusione tra le diverse tipologie di informazione, come già più volte detto, in cui è difficile suddividere i singoli contributi al risultato finale.

La cartografia geomeccanica e geologico-tecnica prodotta viene presentata nelle tre tavole costituenti l'Allegato 3, relative alle tre aree di frana considerate. In queste carte sono stati riportati anche i principali dati geomorfologici (quali ad esempio i coronamenti o i corpi di frana) e i lineamenti tettonici presenti anche nella specifica cartografia geologica (Allegato 2), al fine di meglio comprendere il processo e le considerazioni che hanno portato alla definizione dei modelli geologico-tecnici. La definizione di questa cartografia ha costituito l'ultimo passaggio prima dell'applicazione delle analisi di stabilità (Capitolo 7), eseguite a partire dalle sezioni cinematiche geologico-tecniche pre-frana.

6.1 IL MODELLO GEOLOGICO-TECNICO DELLA FRANA PACÌ

Il modello geologico del versante del Monte Pacì interessato dalla frana sismoindotta del 1783, discusso nel secondo capitolo e illustrato nella cartografia dell'Allegato 3 (Tavola 3.1), era contraddistinto, principalmente, dalla presenza di numerosi lineamenti tettonici il cui riconoscimento è stato possibile sia tramite l'individuazione di particolari caratteri geologici (ad esempio la presenza delle breccie in matrice calcitica), sia tramite il riconoscimento di indizi geomorfologici. In questo modello erano così presenti faglie ad andamento circa parallelo all'attuale linea di costa, e ad andamento circa perpendicolare ad esso. In particolare era stata riconosciuta una faglia avente direzione perpendicolare alla linea di costa ed andamento quasi coincidente col fianco sinistro della frana. Di faglie aventi andamento circa parallelo alla linea di costa ne erano invece state individuate ben 6. Tra queste le più importanti erano state considerate quella in corrispondenza della scarpata di frana e quella in corrispondenza di Punta Pacì, da diversi autori considerata, tra l'altro, come un segmento della Faglia di Scilla (Ferranti et alii, 2007).

I rilievi geomeccanici sono stati concentrati, per mancanza di altri affioramenti, nella parte circostante la corona principale di frana e nel settore immediatamente sottostante l'attuale sede autostradale. A causa di questa forzata distribuzione dei punti di rilievo si è deciso di suddividere la carta geomeccanica in due diversi e indipendenti settori (Tavola 3.1): parte alta e parte bassa. È importante ricordare che la carta geomeccanica altro non è che una carta dell'ISD costruita secondo i criteri descritti nel paragrafo introduttivo del presente capitolo. Pertanto in essa il settore di territorio analizzato viene suddiviso in classi di ammasso (dalla A alla Q, come visto nel precedente capitolo) esclusivamente in funzione dei criteri e dei metodi geostatistici utilizzati, senza tener conto, in alcun modo, delle informazioni geologiche.

A partire dalla cartografia geomeccanica è stata costruita una sezione geomeccanica (Sezione cinematica pre-frana, T-M) in cui i limiti delle classi di ammasso sono riportati in verticale in quanto, com'è ovvio, i dati ricavati dai rilievi in sito non ci possono fornire informazioni circa l'andamento delle stesse classi in profondità. Dalla stessa sezione si può meglio apprezzare anche il *deficit* di informazione che caratterizza la fascia centrale trasversale all'area di frana, nonché la ovvia mancanza di dati del settore *off-shore*.

Le informazioni più interessanti circa la distribuzione dei valori di ISD, e quindi del diverso stato di fratturazione degli ammassi rocciosi, ci sono forniti dal settore più rilevato della carta geomeccanica, ovvero all'intorno della corona di frana. La carta geomeccanica evidenzia le presenza di quasi tutte le classi di ammasso individuate tramite l'analisi statistica dei dati geomeccanici. Una prima considerazione può essere fatta suddividendo quest'area in due distinti settori, uno a W ed uno ad E. Nel primo le classi di ammasso rappresentate sono quelle con un elevato valore di ISD e quindi alto grado di fratturazione. Nel secondo, salvo in un paio di punti, sono presenti le classi di ammasso con ISD inferiore allo zero e quindi relativamente basso grado di fratturazione. Se confrontiamo questa prima osservazione della carta geomeccanica col modello geologico, ci possiamo accorgere che il settore ad W è caratterizzato dalla presenza dell'elemento tettonico, perpendicolare alla linea di costa, che influenza fortemente l'intera area presa in esame. Questo ci può portare ad affermare, in prima analisi, che la presenza di tale elemento rappresenti un fattore di forte incremento del grado di fratturazione degli ammassi rocciosi. Anche l'osservazione del settore di carta geomeccanica di valle mostra un peggioramento delle caratteristiche geomeccaniche spostandoci da E ad W, laddove è presente la faglia sopracitata. Ritornando nel settore di monte, anche nella parte W è possibile fare una ulteriore suddivisione: nella zona più prossima alla corona di frana le classi di ammasso presenti (classi M, N, O, P, Q) testimoniano condizioni di ammasso peggiori rispetto alla zona più a sud, dove sono presenti altre classi di ammasso (classi H, I, L). Questa ulteriore suddivisione è stata associata alla presenza dell'elemento tettonico, circa parallelo alla linea di costa e passante in corrispondenza della corona di frana. Anche questo elemento è quindi causa di un ulteriore decadimento delle proprietà geomeccaniche degli ammassi rocciosi. Secondo questo schema, dunque, ogni elemento tettonico riconosciuto e riportato nel modello geologico costituisce un elemento di disturbo per gli ammassi rocciosi presenti in sito. In più, laddove tali elementi si incrociano e si sovrappongono il grado di fratturazione degli ammassi risulta ancora più elevato. In definitiva, gli ammassi rocciosi presenti nell'area di frana del Monte Pacì, secondo quanto ricostruito in questa sede, sono caratterizzati da tre distinti gradi di fratturazione:

1. basso grado: sono quegli ammassi rocciosi non interessati dalla presenza di elementi tettonici;
2. medio grado: ammassi rocciosi interessati dalla presenza di un unico elemento tettonico;
3. alto grado: ammassi rocciosi interessati dalla presenza di due elementi tettonici che si intersecano e le cui fasce di fratturazione si sovrappongono.

Per associare a queste tre diverse caratteristiche le rispettive classi di ammasso ci si è avvalsi anche della sezione geomeccanica T-M. Da questa, e dalle considerazioni fatte sulla carta geomeccanica, si è deciso di associare gli ammassi rocciosi con basso grado di fratturazione alla classe di ammasso C, quelli di medio grado alla classe di ammasso H, e quelli di alto grado alla classe di ammasso N. In questo modo è stato definito il modello geologico-tecnico del versante ed è stata costruita la sezione geologico-tecnica T-M pre-frana che costituisce il modello su cui è stata successivamente condotta la *back-analysis*. Come si può vedere, la distribuzione delle tre differenti classi di ammasso è funzione della geometria degli elementi tettonici presenti. E' importante notare come sono presenti le quattro fasce di profondità di cui si è già discusso nel Capitolo 5, riferite alle diverse pressioni di confinamento e ai diversi moduli di deformabilità ricavati secondo l'approccio equivalente continuo di Sridevi & Sitharam (2000). E' stata prodotta anche una cartografia geologico-tecnica. In essa, a differenza di quanto fatto per la relativa sezione, sono stati riportati solo i più importanti caratteri distintivi del modello geologico-tecnico messo a punto e precedentemente descritto. Questo al fine di meglio individuare i caratteri essenziali del modello e i punti chiave che caratterizzano il modello evolutivo della frana, come sarà meglio esplicitato nel successivo capitolo.

6.2 IL MODELLO GEOLOGICO-TECNICO DELLA FRANA FELICIUSU

Le informazioni di natura sia geologica che geomorfologica concernenti l'area di frana Feliciusu sono sicuramente meno forti circa la presenza e la geometria degli elementi tettonici, rispetto a quanto visto per la frana Pacì. Il modello geologico (Allegato 2 – Tavola 2.2) evidenzia la presenza di elementi tettonici che influenzano la presenza e la geometria anche dei termini sedimentari più recenti, ma che non interferiscono direttamente sull'area di frana. Nello stesso modello si evidenzia (Capitolo 2) la presenza di ammassi rocciosi fratturati in corrispondenza del fianco destro della frana, settore nel quale è stato anche possibile effettuare un elevato numero di stazioni geomeccaniche. Il rilevamento di campagna ha consentito di individuare alcuni piani di fratturazione particolarmente significativi proprio in corrispondenza del fianco destro. A questi

piani, già nel modello geologico sono state associate delle fasce di più intensa fratturazione. E' importante sottolineare che lo spessore di tali fasce è stato ricavato sia da osservazioni qualitative sullo stato di ammasso in campagna, sia, soprattutto, dalle informazioni geomeccaniche come di seguito riportato. Questo a riprova dell'impossibilità di distinguere totalmente le due fasi di lavoro e i processi di definizione dei due diversi modelli, geologico e geomeccanico. Questi piani hanno rispettivamente una giacitura di 130/60 (*dip direction/dip*), immergente verso monte, e di 300/50 (immergente verso mare).

La carta geomeccanica definita attraverso il processo di *contouring* dei valori di ISD ricavati per le singole stazioni geomeccaniche, individua, anche in questo caso la presenza di numerose classi di ammasso. In questo caso, però, non sono presenti le classi (dalla A alla D) che rappresentano il basso grado di fratturazione degli ammassi. Questo testimonia che praticamente tutto il territorio in esame è caratterizzato da uno stato di fratturazione da medio ad elevato. Come già anticipato, nella costruzione del modello geologico-tecnico dell'area di frana Feliciusu si è partiti dalle considerazioni fatte lungo il fianco destro della stessa. La traccia di sezione che segue tale fianco (Z-Z') intercetta numerosi punti di rilievo geomeccanico, nonché i piani di faglia individuati nel modello geologico (Allegato 2 – Tavola 2.2). Lungo tale sezione, nel modello geomeccanico, si può notare un'alternanza tra le diverse classi di ammasso. In particolare, si nota un incremento dei valori di ISD in corrispondenza delle due fasce di intensa fratturazione. Questo incremento ha il suo culmine laddove le due fasce si sovrappongono. In pratica, dai settori in cui non abbiamo elementi tettonici riconosciuti alle zone in cui sono presenti le fasce cataclastiche passiamo dalla classe di ammasso H alla classe P, con conseguente decadimento delle caratteristiche di resistenza e deformabilità. Partendo da queste considerazioni si è quindi costruita la sezione geologico-tecnica Z-Z'. In relazione anche ai punti di rilievo presenti, si è deciso di suddividere le fasce di intensa fratturazione in due parti: una più prossima agli elementi tettonici avente classe di ammasso P, e l'altra, più distante dagli stessi elementi, avente classe di ammasso M. Lo spessore delle due zone è stato ricavato in funzione dei limiti di classe scaturiti dalla cartografia geomeccanica. A questo punto è stato possibile estrapolare il modello geologico-tecnico dell'intero versante, con la sola aggiunta di una ulteriore fascia di intensa fratturazione, con direzione circa parallela al sottostante Fosso Mancusi, cui è stata associata una immersione verticale in mancanza di ulteriori dati. Lo spessore di tale fascia, tra l'altro già individuata qualitativamente nel rilevamento geologico, è stato stimato a partire dalla carta geomeccanica, grazie anche alla presenza di una stazione geomeccanica che ci consente di attribuire ad essa la classe di ammasso N.

La carta geologico-tecnica rappresenta quindi lo stato di fratturazione degli ammassi rocciosi lungo tutto il versante. Pur consapevoli della forzatura introdotta, si è deciso di estrapolare la geometria delle classi di ammasso anche nell'area di frana, allo scopo di meglio rappresentare l'andamento delle diverse fasce di più intensa fratturazione. A partire da questo modello sono state costruite anche le altre sezioni, ed in particolare la sezione cinematica pre-frana e quella attuale (L-L'). Si ritiene superfluo riaffrontare il processo di retrodeformazione condotto e descritto nel secondo capitolo. In ogni caso sono state condotte analisi di stabilità sia per la frana di prima generazione (dalla sezione pre-frana), sia analisi di stabilità per la frana di seconda generazione (a partire dalla sezione attuale).

Un ultimo elemento che è stato introdotto nel modello geologico-tecnico è rappresentato dalla fascia di alterazione presente immediatamente alla base del contatto trasgressivo tra gneiss depositi di terrazzo marino. Sia nella carta geomeccanica che nella sezione Z-Z', è evidente la presenza di una zona in cui le caratteristiche geomeccaniche degli ammassi presentano un lieve ma significativo decadimento rispetto alla classe di ammasso H che caratterizza gli ammassi rocciosi meno fratturati in questo specifico settore. Questo decadimento è testimoniato dalla presenza della stazione geomeccanica denominata D10 eseguita nei primissimi metri al di sotto del contatto sopracitato. La presenza di tale fascia è congruente con considerazioni relative alla storia geologica dell'area, sia con le condizioni idrogeologiche attuali, e ad essa è stata associata la classe di ammasso I.

6.3 IL MODELLO GEOLOGICO-TECNICO DELLA FRANA SANTA TRADA

Il modello geologico proposto per la frana Santa Trada (Capitolo 2 e Allegato 2 – Tavola 2.3) è caratterizzato dalla presenza di due elementi tettonici che influenzano fortemente anche le caratteristiche morfologiche dell'area: la faglia Santa Trada e la Faglia di Scilla, che in questo suo tratto più meridionale caratterizza il versante immediatamente a monte dei depositi di terrazzo marino ascrivibili al X ordine (Miyouchi et alii, 1994; Ferranti et alii, 2007).

La distribuzione dei punti di rilievo geomeccanico in questo settore è meno densa che altrove. La carta geomeccanica, basata sui valori di ISD ricavati per le singole stazioni, presenta una minore variabilità di classi rispetto alle carte relative alle altre due zone studiate. Questo è ovviamente da mettere in relazione col minor numero di stazioni utilizzate nella sua costruzione. Le classi di ammasso rappresentate sono 5 sulle 15 totali. La mancanza delle classi rappresentative delle migliori condizioni di ammasso è da mettere in relazione con la presenza, piuttosto ravvicinata, dei due importanti elementi tettonici.

E' importante notare come, solo in questo caso, nel modello geologico non sia stata riportata alcuna fascia di intensa fratturazione, in quanto nel rilevamento geologico non ne sono state individuate, pur avendo notato, anche da un punto di vista qualitativo, un incremento di fratturazione ed alterazione degli ammassi rocciosi in prossimità del coronamento di frana. Anche il modello geomeccanico non presenta variazioni repentine dei valori di ISD. Questo presenta i valori più elevati proprio in corrispondenza della stazione geomeccanica ST9, effettuata sulla parte sommitale della superficie di scorrimento in corrispondenza del coronamento di frana. I valori di ISD tendono poi gradualmente a diminuire se ci si sposta verso il fosso Santa Trada, come evidenziato anche dalla sezione geomeccanica E-E'. Questo potrebbe sembrare incongruente col fatto di avvicinarsi ad un piano di faglia, ma occorre ricordare che quel piano è stato ubicato lungo il fosso esclusivamente su basi morfologiche, potendosi invece trovare, qualora realmente esistesse un solo piano, in un punto qualsiasi dl versante in sinistra idrografica. Non a caso, in tutte le stazioni geomeccaniche effettuate nell'area sono stati individuati piani di discontinuità aventi direzione circa parallela al fosso ed immersione NNE ($20/75 - dip\ direction/dip$). Proprio seguendo l'andamento di tali piani si è deciso di tracciare i limiti della classi di ammasso per la definizione del modello geologico-tecnico, sia in carta che in sezione. Lo spessore dei vari "strati" delle classi di ammasso è stato ricavato dal modello geomeccanico.

Per quanto riguarda l'influenza della Faglia di Scilla sullo stato di fratturazione degli ammassi rocciosi coinvolti nel movimento gravitativo, la particolare disposizione dei punti di misura non ha consentito di approfondire questo aspetto. Considerando, però, che la sezione cinematica E-E' ha direzione praticamente parallela alla faglia stessa, si può ritenere che l'influenza di questo elemento tettonico possa essere stata circa uniforme lungo tutta la sezione. In più, il fatto che i più importanti punti di rilievo si trovino lungo la sezione stessa, lascia presupporre che il grado di disturbo causato dalla faglia sia praticamente già acquisito nella costruzione del profilo cinematico geologico-tecnico.

7. APPLICAZIONE DEI MODELLI GEOLOGICO-TECNICI ALLE ANALISI DI STABILITA' DEI VERSANTI

In quest'ultimo capitolo verranno esposti i risultati delle analisi di stabilità condotte sui tre fenomeni gravitativi presi in considerazione nel presente lavoro. Essendo fenomeni molto diversi tra loro, come è stato ampiamente discusso nelle pagine precedenti, si è ritenuto opportuno trattarli secondo quelli che sono stati considerati, di volta in volta, i criteri e le metodologie più opportuni. Per tale motivo si è deciso di utilizzare una modellazione numerica tenso-deformativa alle differenze finite (FDM) per l'analisi di stabilità sia della Frana del Monte Pacì che per quella di Santa Trada, mentre si è utilizzato un più tradizionale metodo analitico all'equilibrio limite globale per la frana Felicisu. E' importante sottolineare come tutte e tre le modellazioni si sviluppano a partire dalle sezioni cinematiche geologico-tecniche pre-frana costruite secondo le metodologie fin qui descritte.

Le metodologie seguite e i risultati conseguiti per le frane Pacì e Santa Trada fanno parte anche di due distinte pubblicazioni scientifiche. Quella riguardante la frana Pacì (Bozzano et alii, 2011) è stata già pubblicata dalla rivista "*Geomorphology*", mentre quella della frana Santa Trada è attualmente sottomesso alla rivista "*Engineering Geology*".

Prima di analizzare le singole analisi condotte si ritiene necessario soffermarsi, molto brevemente, sui due distinti metodi utilizzati.

7.1 METODO NUMERICO ALLE DIFFERENZE FINITE: IL CODICE DI CALCOLO FLAC

I modelli numerici ad analisi tenso-deformative per la stabilità dei versanti descrivono le deformazioni di un materiale, indotte dalla variazione dello stato tensionale, fino a rottura. Essi si basano su equazioni matematiche che rappresentano il comportamento deformativo e la resistenza del materiale. A differenza dell'Equilibrio Limite Globale, che definisce un fattore di sicurezza (FS) univoco per la superficie ipotizzata, i metodi tenso-deformativi consentono lo studio dell'evoluzione dello stato di tensione e di deformazione del mezzo. La soluzione ottenuta indica sia le condizioni di stabilità o di instabilità (analisi dinamica) sia la localizzazione dei dissesti (analisi cinematica). Il Metodo Numerico alle Differenze Finite (FDM), rispetto ai metodi agli Elementi Finiti (FEM), consente di rappresentare in modo migliore il comportamento degli ammassi rocciosi con leggi costitutive complesse, in quanto restituisce una soluzione esplicita per

ogni nodo, risolvendo anche le condizioni di disequilibrio e permettendo in questo modo di seguire l'evoluzione delle deformazioni e il meccanismo di collasso fino a grandi deformazioni.

Tali presupposti hanno portato alla scelta di una modellazione alle Differenze Finite, sia per la frana Paci che per quella Santa Trada, tramite il codice di calcolo FLAC 6.0 (ITASCA). FLAC (*Fast Lagrangian Analysis of Continua*) è un programma per l'analisi bidimensionale al continuo del comportamento di rocce e suolo. Immesso nel mercato nel 1986, FLAC è prodotto dall'ITASCA C.G., Società di Minneapolis, Minnesota, negli Stati Uniti d'America e viene supportato in Italia da CeAS.

Il programma opera in uno spazio discretizzato in un numero di maglie, che individuano "punti nodali" o "*gridpoints*" e "celle" identificate sia da coordinate assolute (i,j) sia relative (x,y). Le proprietà del mezzo vengono attribuite alle "zone" individuate attraverso l'utilizzo di "*markpoints*"; le proprietà vettoriali (velocità, spostamento, accelerazioni) sono applicate ai nodi, mentre quelle scalari (resistenza, moduli, ecc.) alle maglie. Il codice di calcolo tende a trovare una soluzione mediante equazioni differenziali risolte per ogni singolo nodo della griglia, a cui vengono applicate la "risultante delle forze esterne" al nodo (F_e) e la "risultante delle forze interne" del medesimo (F_i). Tramite l'Equazione di Newton ($F = m * a$) si può ricavare l'accelerazione applicata ad ogni nodo e, a seguito di una doppia integrazione nell'intervallo di tempo Δt , la velocità e lo spostamento incrementale ad ognuno di essi. A questo punto, per ogni zona della griglia è possibile calcolare le variazioni degli sforzi, e quindi le deformazioni. Dallo spostamento integrale questo nuovo stato tensionale induce variazione in F_i che dovrà essere calcolato nuovamente per la determinazione del nuovo valore d'accelerazione in funzione del nuovo incremento temporale Δt . Il sistema a questo punto è in grado di fornire la "massima forza sbilanciata" o "*unbalanced force*" per ogni *step* di calcolo eseguito, definita come la "massima forza netta risultante" $F_u = F_e - F_i$ tra tutte quelle calcolate ai singoli nodi. Tale forza non è mai pari a zero in quanto non si raggiungono mai variazioni dello stato tenso-deformativo nulle in seguito a ulteriori incrementi temporali. Per questo motivo si accetta come situazione di equilibrio la diminuzione di 4-5 ordini di grandezza della forza netta stimata all'inizio del processo di calcolo.

7.2 ANALISI DI STABILITA' ALL'EQUILIBRIO LIMITE GLOBALE: METODO DI FELLENIUS

I metodi dell'equilibrio limite analizzano l'equilibrio di una massa potenzialmente instabile e consistono nel calcolare, lungo una determinata superficie di rottura, il rapporto fra le resistenze

disponibili dell'ammasso e quelle richiamate (destabilizzanti). Essi si basano sulle seguenti assunzioni:

- si predefinisce una superficie di rottura (se la frana è di prima generazione questa è una superficie “di tentativo”);
- le condizioni di rottura vengono raggiunte simultaneamente lungo tutta la superficie di rottura predefinita;
- a rottura, lungo tutta la superficie predefinita, è richiamata la massima resistenza disponibile da parte del terreno.

Le ipotesi di equilibrio limite globale elencate implicano anche:

- movimento rigido della massa in frana;
- rottura fragile lungo la superficie di scorrimento;
- assenza di deformazioni interne alla massa.

In queste condizioni, e sulla base del criterio di rottura di Mohr-Coulomb, si stabiliscono le equazioni di equilibrio tra le forze che inducono lo scivolamento e quelle resistenti. Le analisi forniscono il valore del fattore di sicurezza (FS) del versante per la superficie di rottura analizzata, riferito all'equilibrio limite fra le resistenze richiamate, permettendo di calcolare, così, il grado di stabilità del versante stesso.

Esistono vari metodi per il calcolo del fattore di sicurezza all'equilibrio limite globale. I metodi deterministici lo forniscono a partire dalla diretta soluzione di equazioni (ad esempio il metodo di Taylor, Fellenius, ecc.), mentre altri metodi necessitano, per la loro soluzione, dell'impostazione di sistemi di equazioni risolubili mediante processi di calcolo iterativi (metodo di Morgenstern & Price, di Spencer, di Sarma, ecc.).

I metodi all'equilibrio limite si classificano, inoltre, in:

- metodi che considerano l'analisi del blocco o della massa totale;
- metodi che considerano la massa divisa in conci verticali.

Mentre i primi sono validi per materiali omogenei e impostano le equazioni dinamiche per l'intera massa di frana, i secondi possono considerare materiali non omogenei e comportano una serie di ipotesi sulla posizione e sulla distribuzione delle forze che agiscono sulle singole divisioni della

massa in frana, dette “conci”. Sebbene il fattore di sicurezza nella realtà risulti variabile lungo la superficie considerata per ipotesi (Equilibrio Limite Globale), si ammette che esso assuma lo stesso valore in tutti i punti di questa superficie, in modo che in ciascun punto sia mobilitata la stessa aliquota della resistenza al taglio disponibile. Ne consegue che FS è pari al rapporto tra la resistenza complessivamente disponibile e quella complessivamente mobilitata. La condizione limite di equilibrio del pendio è quella per cui $FS = 1$, mentre è fisicamente inaccettabile una condizione per la quale risulti $FS < 1$.

Per la frana Feliciusu si è deciso di utilizzare il metodo all’equilibrio limite globale proposto da Fellenius (1936), anche noto come metodo delle strisce (o dei conci).

Esso prevede la suddivisione della massa in frana in strisce verticali (conci) secondo due possibili criteri:

- **criterio dell’equidistanza:** ogni concio ha la stessa ampiezza degli altri, pertanto le distanze fra le superfici verticali che separano i conci sono sempre costanti; questo criterio è, di solito, applicato a masse in frana omogenee e isotrope;
- **criterio geologico-tecnico:** l’ampiezza orizzontale dei conci viene scelta in modo che la superficie di base di ogni concio ricada su una porzione di ammasso con caratteristiche geologiche o geologico-tecniche costanti; l’applicazione di questo criterio trova applicabilità in ammassi in frana non omogenei e con caratteristiche meccaniche variabili.

Avendo classificato e differenziato gli ammassi rocciosi in funzione del loro stato di fratturazione, è stato scelto il secondo dei sopracitati criteri. L’applicazione dei metodi ELG su pendii non in frana prevede la scelta di numerose superfici di taglio (superfici di tentativo) al fine di individuare quella con il minore fattore di sicurezza (FS). Nel caso in esame, tuttavia, essendo nota la superficie che di fatto ha attivato la frana (lavoriamo in *back analysis*), la verifica è stata condotta esclusivamente su di essa.

Con il metodo di Fellenius, la verifica di stabilità del versante viene condotta mediante l’analisi delle forze agenti su ogni singolo concio. Il metodo trascura le forze agenti lateralmente all’i-esimo concio, riducendo così l’analisi dinamica ad un problema determinato (Fig. 7.1).

All’i-esimo concio le resistenze richiamate sono pari a T_i , mentre il contributo alla massima resistenza dato dall’i-esimo concio è pari a:

$$T_{max} = c_i * l_i + W_i * \cos \alpha_i * \tan \varphi_i.$$

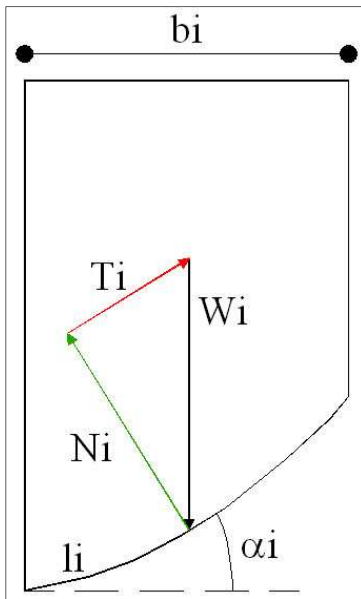


Fig. 7.1 – Poligono delle forze agenti sull’i-esimo concio prese in considerazione dal metodo di Fellenius: 1) Peso dell’i-esimo concio (W_i); 2) Forza di reazione alla base dell’i-esimo concio, pari alla componente normale della forza peso ($N_i = W_i * \cos\alpha$); 3) Componente longitudinale della forza peso agente sull’i-esimo concio ($T_i = W_i * \sin\alpha$); 4) Lunghezza alla base dell’i-esimo concio (l_i); 5) angolo di inclinazione della base dell’i-esimo concio (α_i); 6) ampiezza dell’i-esimo concio (b_i).

Il fattore di sicurezza (FS) relativo alla superficie di rottura predefinita, è definito dal rapporto fra la sommatoria delle massime resistenze disponibili agli n concii e la sommatoria delle sollecitazioni agenti agli n concii:

$$FS = \frac{\sum T_{max}}{\sum T_{agenti}}$$

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n (c_i * l_i + W_i * \cos \alpha_i * \tan \varphi_i)}{\sum_{i=1}^n W_i * \sin \alpha_i}$$

Il peso dell’i-esimo concio (W_i) è definito come:

$$W_i = \gamma_i * A_i$$

dove γ_i è il peso per unità di volume naturale e A_i è l’area del concio. Il problema in questo modo si riduce ad un’analisi bidimensionale. Il termine c_i si riferisce ovviamente alla coesione del materiale, mentre φ_i è l’angolo di attrito.

La condizione di incipiente rottura si raggiunge, pertanto, al raggiungimento del $FS = 1$, caso in cui la somma delle forze richiamate sul versante è uguale alla somma delle forze di resistenza del versante stesso.

La presenza di una eventuale falda all’interno del versante influenza negativamente le condizioni di stabilità dello stesso in termini di fattore di sicurezza. Questa forzante aggiuntiva è esplicitata nella formula:

$$u_i = h_w * \gamma_w$$

dove h_w è l'altezza della superficie di falda rispetto al centro della base di ogni singolo concio (Fig. 7.2), mentre γ_w è il peso per unità di volume dell'acqua.

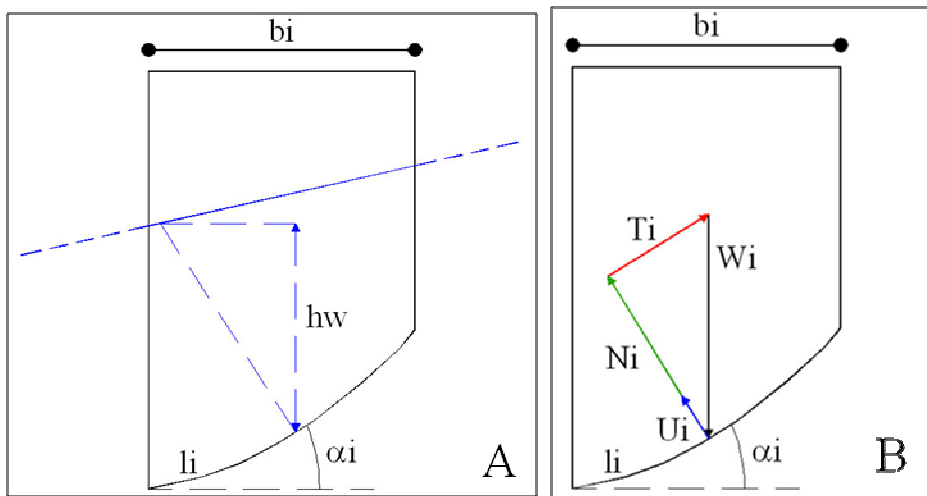


Fig. 7.2 – Visualizzazione grafica del calcolo di h_w (A) e poligono delle forze agenti sul concio (B), prese in considerazione dal metodo di Fellenius in presenza di una falda acquifera in regime di flusso transitorio.

La pressione dell'acqua (u_i), diventa una forza (U_i) se moltiplicata per l'area della base del concio, che, essendo di profondità unitaria, si riduce alla sola lunghezza l_i :

$$U_i = u_i * l_i.$$

La relazione per il calcolo del fattore di sicurezza diventa pertanto:

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n (c_i * l_i + (W_i * \cos \alpha_i - U_i) * \tan \varphi_i)}{\sum_{i=1}^n W_i * \sin \alpha_i}.$$

Un'altra forzante esterna che può essere inserita è quella sismica. Questo *input* sismico può essere applicato secondo un approccio pseudostatico, attraverso l'introduzione di un coefficiente (k) che deve essere valutato in relazione ai valori di pericolosità sismica di base dell'area, ovvero con la mappa di pericolosità sismica del territorio nazionale espressa in termini di accelerazione massima al suolo con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni e con un tempo di ritorno di 475 anni.

La forzante sismica pseudostatica agisce in modo molto forte sulla relazione per il calcolo del FS, in quanto sottrae un'aliquota al numeratore, e ne aggiunge una al denominatore (Fig. 7.3), secondo la relazione:

$$FS = \frac{\sum_{i=1}^n (c_i * l_i + (W_i * \cos \alpha_i - U_i - W_i * k * \sin \alpha_i) * \tan \varphi_i)}{\sum_{i=1}^n W_i * \sin \alpha_i + W_i * k * \sin \alpha_i}.$$

La precedente relazione considera, ovviamente, la contemporanea presenza delle due differenti forzanti aggiuntive: la presenza di falda e l'*input* sismico.

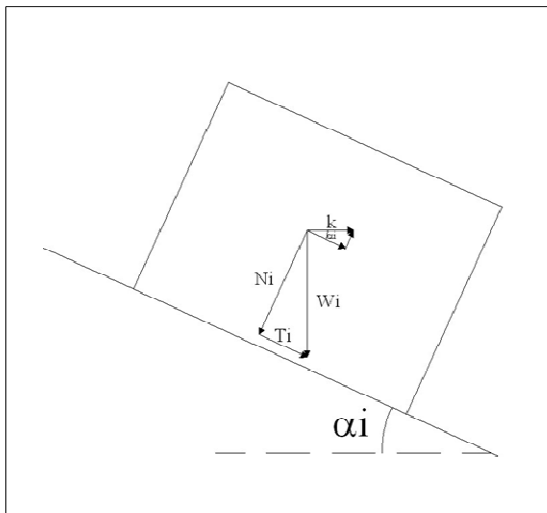


Fig. 7.3 – Schema delle forze agenti sul concio nel caso di una forzante pseudostatica.

7.3 MODELLAZIONE NUMERICA DELLA FRANA DEL MONTE PACÌ

La frana del Monte Pacì, classificata come un evento complesso (Cruden & Varnes, 1996) caratterizzato da un iniziale scorrimento traslativo in roccia evolutosi in *rock-avalanche* (Bozzano et alii, 2011), è una frana sismoindotta, e pertanto si è deciso di effettuare una modellazione che tenesse in considerazione la storia sismica dell’area, e, in particolare, l’effetto dei principali eventi del “terremoto delle Calabrie” sul versante. Le numerose testimonianze storiche a disposizione, già citate nel secondo capitolo, hanno consentito di determinare con certezza l’esatto momento di innesco della frana, ovvero nella notte tra il 5 ed il 6 febbraio 1783, pochi minuti dopo il secondo *mainshock* del “terremoto delle Calabrie”.

Recenti studi (Jacques et alii, 2001; Galli & Bosi, 2002; Ferranti et alii, 2008; Catalano et alii, 2008) attribuiscono un valore di $M \geq 7$ all’evento sismico occorso il 5 febbraio 1783, attribuendo ad esso la parziale riattivazione della Faglia di Cittanova, per una lunghezza massima di 25 km. Secondo Guarnieri et alii (2004) e Ferranti et alii (2008), l’evento del 6 febbraio, localizzato a largo di Scilla, corrisponde alla riattivazione della Faglia di Scilla per una lunghezza di 10 km.

Seguendo una metodologia recentemente sviluppata in Italia per la classificazione sismica (Orazi et alii, 2008), sono stati ottenuti due *input* sismici relativi, rispettivamente all’evento del 5 e del 6 febbraio 1783 (Fig. 7.4). In più, è stato ottenuto un *input* relativo all’evento sismico del 28 dicembre 1908 (Terremoto di Reggio e Messina), in quanto esso ha sicuramente interessato il versante. Questa metodologia prevede una iniziale analisi storica degli eventi sismici sui principali *database* europei (Ambraseys et alii, 2000; *COSMOS database: Consortium of Organizations for Strong-Motion Observation System*, <http://db.cosmos-eq.org>), finalizzata alla ricerca di registrazioni ottenute in analoghe condizioni di sorgente, di sito e di distanza. Inoltre sono state considerate solo

registrazioni ottenute in *free-field* e in presenza di ammassi rocciosi. In questo modo sono state scelte le seguenti registrazioni:

- stazione di Ulcinj – Terremoto del Montenegro del 15 aprile 1979 ($M_s = 7.04$, distanza dall'epicentro 21 km, distanza dalla faglia 9 km), per l'evento del 5 febbraio;
- stazione di Atina – Terremoto Lazio – Abruzzo del 7 maggio 1984 ($M_s = 5.79$, distanza dall'epicentro 15 km, distanza dalla faglia 12 km), per l'evento del 6 febbraio 1783;
- stazione di Gilroy 1 – Terremoto di Loma Prieta del 18 ottobre 1989 ($M_s = 7.10$, distanza dall'epicentro 28 km, distanza dalla faglia 3 km), per l'evento del 28 dicembre 1908.

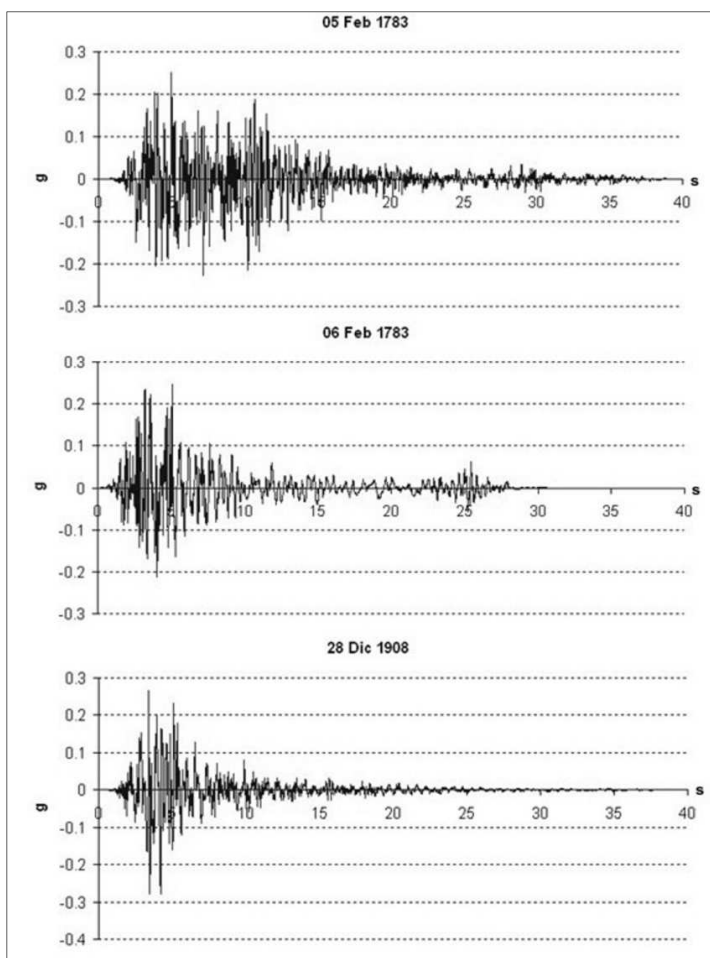


Fig. 7.4 – Registrazioni utilizzate per i terremoti del 5 febbraio 1783, del 6 febbraio 1783 e del 28 dicembre 1908.

In un secondo momento le registrazioni prescelte sono state adattate alle risposte spettrali attese per la nostra area, utilizzando il modello dello spettro di rischio uniforme con un periodo di ritorno di 475 anni, calcolato a Scilla dagli spettri di risposta uniformi disponibili per l'intero territorio italiano aventi maglie larghe 5 km (INGV-DPC S1 – Project, *website*: <http://esse1.mi.ingv.it>). A partire da ciò, dei segnali dinamici equivalenti sono stati ottenuti seguendo l'approccio proposto da Lenti & Martino (2010) denominato “*Levelled-Energy Multifrequential Analysis for Dynamic Equivalent Signals*” (LEMA_DES), che permette di controllare il contenuto in frequenza ed energia

degli *input* equivalenti. In Fig. 7.5 sono mostrati i segnali equivalenti ricavati. I dettagli e le specifiche considerazioni sulle caratteristiche di questi segnali equivalenti sono riportati nella relativa pubblicazione (Bozzano et alii, 2011).

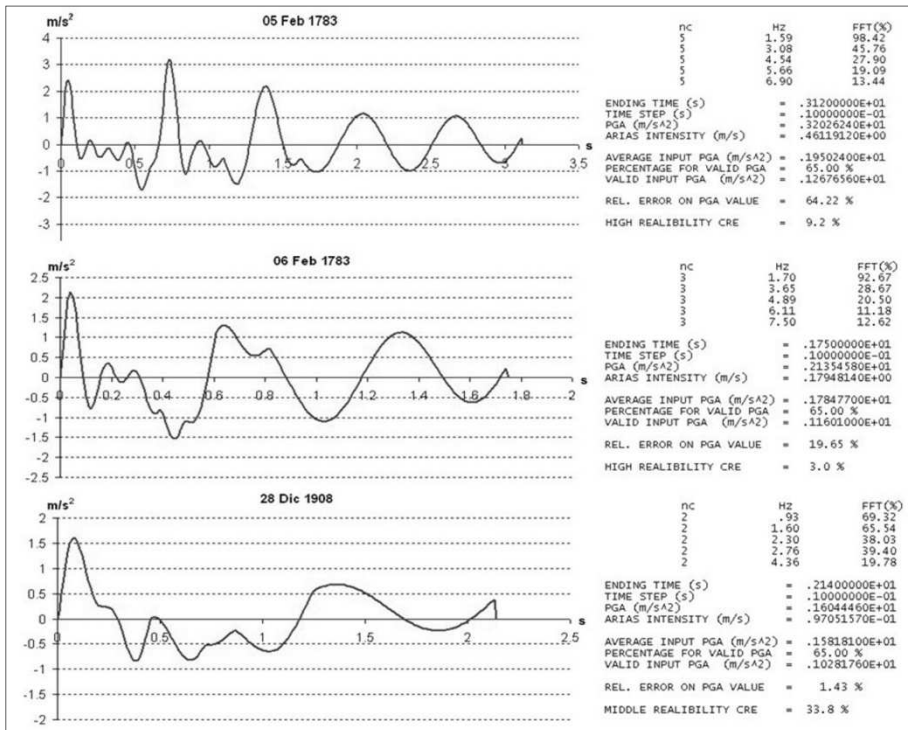


Fig. 7.5 – Segnali equivalenti multifrequenza ricavati tramite procedura LEMA_DES, per i terremoti del 5 febbraio 1783, del 6 febbraio 1783 e del 28 dicembre 1908.

Come già accennato, per la frana Pacì è stata condotta una modellazione numerica 2D tenso-deformativa utilizzando il codice di calcolo FLAC 6.0 (ITASCA, 2008). In particolare si è utilizzato il metodo numerico alle differenze finite (FDM). La modellazione per i terremoti del 5 e 6 febbraio 1783 è stata condotta sulla sezione cinematica pre-frana (T-M), mentre per il terremoto del 1908 si è utilizzata l'attuale superficie topografica (Allegato 3 – Tavola 3.1). Il primo passo per la modellazione è stato la discretizzazione dello spazio di analisi e la scelta della risoluzione della griglia. Quest'ultima viene espressa tramite la dimensione delle maglie che costituiscono la sezione numerica. La scelta adottata deve tenere conto dell'estensione del versante e dell'accuratezza che si vuole attribuire ai dati di *output*. In questo caso si è deciso di utilizzare una griglia di 400x200 maglie aventi lato di 5 m. Ogni maglia possiede le caratteristiche di resistenza e deformabilità relative alla classe di ammasso di appartenenza, secondo la geometria definita attraverso la realizzazione del modello geologico-tecnico. Una legge costitutiva elasto-plastica è stata applicata alle diverse zone, mentre sono stati consentiti gli spostamenti sia lungo l'asse delle x, che lungo l'asse delle y, lungo i limiti laterali. Un iniziale equilibrio statico gravitazionale è stato raggiunto prima di applicare la sequenza sismica, costituita dai tre segnali equivalenti precedentemente discussi. Gli *input* sono stati applicati alla base del modello secondo la seguente equazione

$$\sigma_s(t) = 2 * \rho * C_s * v_s(t),$$

dove $\sigma_s(t)$ è lo sforzo di taglio in funzione del tempo, ρ è la densità della roccia, C_s è la velocità delle onde S, e $v_s(t)$ è la velocità in funzione del tempo derivata dai segnali equivalenti ricostruiti con la procedura LEMA_DES. Durante la modellazione dinamica, laddove è stato raggiunto uno stato di plasticizzazione (in condizioni di trazione o compressione) all'interno del modello, sia i parametri di resistenza che di deformabilità sono stati modificati, in accordo con un comportamento elasto-plastico (Eberhardt et alii, 2004). In particolare, il valore di coesione è stato azzerato, mentre il valore del modulo dinamico di taglio (G) è stato ridotto al valore attribuito al detrito di frana a blocchi, ricavato tramite una prova *down-hole* eseguita nel foro del sondaggio S1 (Allegato 2 – Tavola 2.1).

Tralasciando in questa sede gli altri particolari relativi alle condizioni imposte al modello, possiamo vedere, servendoci delle Figg. 7.6 e 7.7, quali sono i principali risultati ottenuti con questa modellazione in *back-analysis* e confrontarli con la reale evoluzione del versante.

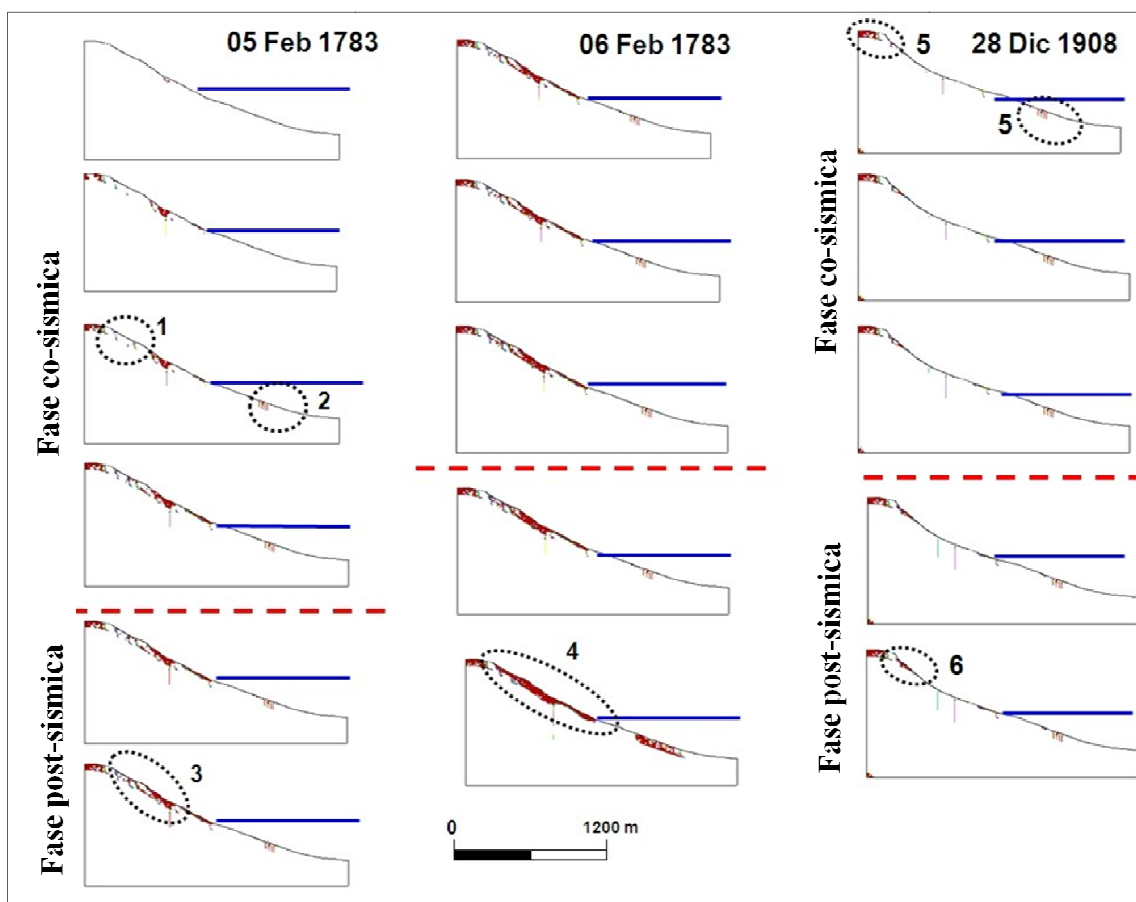


Fig. 7.6 – Modello di rottura derivato dalla modellazione numerica dinamica ottenuta con FLAC 6.0. 1) Fratture subverticali; 2) propagazione della fratturazione nel tratto di pendio sommerso; 3) apertura di fratture lungo l'area di corona; 4) collasso generalizzato del versante; 5) fratture preesistenti; 6) crolli in corrispondenza della scarpata principale. In blu viene riportato il livello del mare attuale.

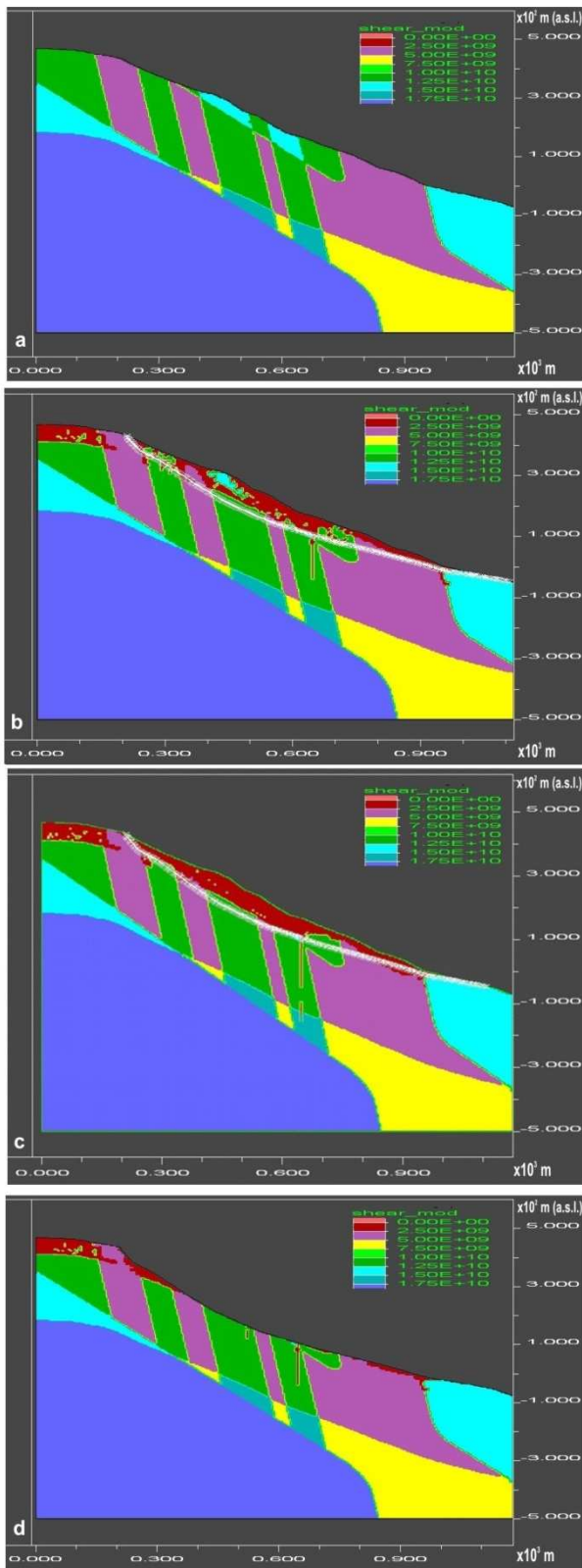


Fig. 7.7 – Risultati della modellazione numerica dinamica ottenuta con FLAC 6.0. a) Stato dell'ammasso roccioso prima dell'evento del 5 febbraio 1783; b) stato dell'ammasso prima della frana avvenuta il 6 febbraio 1783 e topografia attuale del versante del Monte Pacì (linea bianca); c) stato dell'ammasso durante la frana avvenuta il 6 febbraio 1783 e topografia attuale del versante del Monte Pacì (linea bianca); d) stato dell'ammasso dopo il terremoto del 28 dicembre 1908.

Da queste due figure si evince che:

- 1) dopo il primo terremoto (5 febbraio 1783) zone prossime al cedimento dovuto alla formazione di nuova fratturazione negli ammassi rocciosi (Fig. 7.7 a/b) si sviluppano a quote superiori ai 350 m s.l.m. e per una profondità compresa tra i 10 e i 50 m dal p.c.. Al

contrario non si riscontrano particolari effetti nella porzione sommersa del versante, se si escludono alcune fratture in corrispondenza dei 90 m di profondità (Fig. 7.7 b).

- 2) Dopo il secondo terremoto (6 febbraio 1783), intere zone prossime al cedimento si sviluppano a circa 450 m di quota; esse ben si adattano alla superficie di rottura della frana, che può essere attualmente osservata o interpretata lungo il versante (Fig. 7.7 c).
- 3) Dopo l'ultimo terremoto preso in considerazione (28 dicembre 1908), nuove superficiali zone prossime al cedimento (aventi profondità di circa 10 m) sembrano svilupparsi, in particolare in corrispondenza della corona di frana del 1783; queste possono essere messe in relazione a probabili eventi di crollo ed arretramento della scarpata stessa.

Tra il primo ed il secondo terremoto un significativo approfondimento delle zone di cedimento può essere osservato in fase post-sismica, quando nessun *input* dinamico equivalente era in azione. Al contrario, il terzo terremoto causa fenomeni di crollo co-sismici.

I risultati ottenuti risultano coerenti con quanto riportato dai documenti storici e scientifici riguardanti l'evento franoso, nonché con le osservazioni di campagna condotte nel corso del presente lavoro. A riguardo possiamo fare le seguenti considerazioni:

- la *rock-avalanche* del Monte Paci è il risultato di effetti deformativi cumulati, dovuti ai due terremoti occorsi a breve distanza di tempo il 5 e 6 febbraio 1783;
- la frana si è sviluppata lungo il versante emerso, mentre non sono stati riscontrati particolari effetti nella porzione sommersa dello stesso. Al fine di valutare la possibile dipendenza di tale risultato dalla mancanza di informazioni circa lo stato di fratturazione degli ammassi rocciosi nel tratto sommerso, è stata condotta una ulteriore modellazione, attribuendo a questo settore le peggiori caratteristiche degli ammassi rocciosi riscontrati nel modello geologico-tecnico. Anche con questa forzata modifica non è stato riscontrato alcun effetto significativo nella parte sommersa del versante;
- l'area di corona corrisponde all'attuale scarpata, ad una quota di circa 450 m s.l.m.. Un possibile cambio di pendenza del piano di scivolamento può essere riconosciuto approssimativamente ad una quota di circa 150 m s.l.m.. Ovviamente la sua reale esistenza non può essere confermata a causa della presenza del detrito di frana il cui spessore è di poco inferiore ai 30 m in questo specifico settore;
- significativi effetti post-sismici possono essere assunti, specialmente in termini di approfondimento della plasticizzazione, che può giustificare il ritardo con cui si è innescata la frana rispetto al momento del terremoto del 6 febbraio 1783.

7.4 ANALISI DI STABILITÀ DELLA FRANA FELICIUSU

L'analisi di stabilità del versante interessato dalla frana Feliciusu è stata condotta col metodo all'Equilibrio Limite Globale (ELG) di Fellenius (1936). La parte teorica riguardante tale metodo è già stata affrontata nel paragrafo 7.2, in relazione a tutti gli aspetti che sono stati inseriti nell'analisi riguardante questo specifico caso (presenza di falda, input sismico pseudostatico). Ora è solo necessario discutere i risultati ottenuti.

Le differenti analisi di stabilità sono state condotte sia sul versante pre-frana (spesso definita in seguito frana di prima generazione), sia sull'attuale versante (frana di seconda generazione). Si è già discusso sulla metodologia seguita per la retrodeformazione rigida della massa in frana, e di come si sia giunti alla definizione del modello geologico-tecnico pre-frana (Capitolo 6 e Allegato 3 – Tavola 3.2).

Nell'Appendice 5 viene riportato uno stralcio della sezione L-L' (sezione cinematica) pre-frana. In essa si può distinguere la suddivisione in conci dell'area di frana, così come prevede il metodo di Fellenius. Inoltre, per ogni singolo concio vengono riportati i dati geometrici utili all'analisi di stabilità, nonché la relativa litologia della base, o, nel caso degli ammassi rocciosi, la classe di ammasso. Analogamente, viene riportato uno stralcio della sezione L-L' attuale e la suddivisione in conci del corpo di frana. Sempre nell'Appendice 5 sono presenti tutte le tabelle di calcolo relative alle analisi di stabilità condotte e qui di seguito riportate. Ai conci che ricadono nei depositi di terrazzo marino è stato associato un valore di coesione (c) nullo, mentre l'angolo di attrito ($\phi = 33^\circ$) è stato attribuito sulla base di valori di letteratura per sabbie debolmente addensate. Il valore di γ_n è stato ricavato da prove di laboratorio condotte presso il laboratorio di Geologia Applicata del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università Sapienza. Queste prove, i cui dettagli sono contenuti in altre tesi, hanno fornito un valore di γ_n pari a $18,0 \text{ kN/m}^3$.

I risultati ottenuti dalla verifica di stabilità per la frana di prima generazione, in condizioni di pendio totalmente asciutto, hanno portato ad un valore di FS pari a 2,6. Per tale motivo, secondo il modello geologico-tecnico proposto, l'innescò della frana Feliciusu non può che essere avvenuto in presenza di forzanti esterne, come, ad esempio, delle falde acquifere in regime di flusso transitorio a seguito di intense precipitazioni, oppure un *input* sismico.

Sono state assunte due differenti ipotesi di falda: la prima prevede una parziale saturazione del corpo di frana, mentre la seconda prevede la saturazione quasi completa del versante, e l'instaurazione di una falda a regime di flusso transitorio nei depositi di terrazzo marino, a monte

della frana. I valori di FS ricavati per le due ipotesi di falda sono pari, rispettivamente a 2,3 e 1,9. Quindi anche presupponendo la presenza di falda all'interno del versante non si riesce giustificare l'innescamento della frana.

A questo punto si è deciso di considerare l'applicazione di un *input* sismico. È opportuno ricordare che in questo caso non si ha alcuna testimonianza, né storica né scientifica, che vincoli l'innescamento della frana Feliciusu con un determinato evento sismico, a differenza di quanto è accaduto per la frana del Monte Paci. Per tale motivo, per determinare il valore del coefficiente pseudostatico da applicare nell'analisi di stabilità si è deciso di fare riferimento alla vigente normativa nazionale. In particolare, come valore di accelerazione massima attesa al suolo (a_g) si è fatto riferimento all'Allegato 7 dell'O.P.C.M del 13 novembre 2010 (n° 3907), in cui vengono riportati i valori di a_g per tutti i comuni italiani con a_g non inferiore a 0,125. Da esso si ricava, per il comune di Bagnara Calabria, un valore di a_g pari a 0,264279.

Se l'analisi di stabilità con l'aggiunta della forzante sismica esterna viene condotta in condizioni di pendio asciutto, il valore di FS risulta pari a 1,6. Questo indica che la sola applicazione dell'*input* sismico non è sufficiente a giustificare la frana Feliciusu. Si è pertanto deciso di condurre un'analisi di stabilità che tenesse in considerazione entrambe le forzanti (*input* sismico + ipotesi di falda 2). Il valore di FS così calcolato risulta pari a 1,0, ovvero una condizione limite di equilibrio. È importante considerare che l'approccio pseudostatico adottato risulta piuttosto conservativo nel caso di analisi di stabilità sotto forzanti sismiche. Come si è potuto apprezzare nell'analisi condotta per la frana del Monte Paci, in casi del genere è da preferirsi una modellazione dinamica che tenga conto della *time-history* dell'accelerogramma di riferimento, analizzando il campo delle frequenze, delle ampiezze e delle accelerazioni, e tenendo conto della loro interazione rispetto ai sistemi di versante.

In relazione a tali considerazioni, si può comunque concludere affermando che il modello geologico-tecnico proposto è pienamente in grado di rappresentare le condizioni di partenza di un versante successivamente soggetto ad un fenomeno gravitativo quale quello analizzato.

Per quanto riguarda la possibilità di movimento del corpo di frana con le attuali condizioni morfologiche del versante (frana di seconda generazione), sono state condotte delle analisi di stabilità analoghe a quelle condotte sul versante "originario". In questo caso le classi di ammasso distinte nel modello geologico-tecnico (Allegato 3 – Tavola 3.2) sono state fatte rototraslare verso valle, congruentemente con quello che è stato ipotizzato essere il movimento della frana. È stato dunque applicato il criterio di conservazione delle classi anche in seguito all'evento franoso. In questo caso, avendo il pendio già richiamato la sua resistenza di picco, è stata attribuita un valore di

coesione nullo all'intera superficie di scorrimento, mentre l'angolo di attrito residuo, mancando specifiche prove di laboratorio per una sua corretta determinazione, è stato assunto pari a quello di picco.

In condizioni di pendio asciutto, e senza forzanti sismiche, il valore di FS è risultato pari a 1,7. E' necessario considerare che tutti i valori di FS, a parità di condizioni, risultano inferiori per la frana di seconda generazione (situazione attuale) rispetto a quelli ricavati per la frana di prima generazione (Tab. 7.1 e Fig. 7.8). Questo può essere sicuramente messo in relazione con l'azzeramento dei valori di coesione.

Anche in questo caso si è deciso di condurre delle analisi di stabilità in presenza di due differenti situazioni di falda, analogamente a quanto fatto per la frana di prima generazione. I fattori di sicurezza ricavati risultano pari, rispettivamente, a 1,4 e a 1,0.

Una ulteriore analisi è stata condotta considerando l'azione sismica. Il valore di FS calcolato risulta pari a 1,0.

I risultati di queste analisi ci consentono di affermare che, per la frana di seconda generazione non è necessario considerare l'azione congiunta dei due fattori aggiuntivi (falda e sisma) per giustificarne una eventuale riattivazione. E' comunque presumibile che la frana Felicisus possa subire una riattivazione in condizione di presenza di falda (anche non fino a piano campagna) e di input sismico (non necessariamente in termini di massima accelerazione attesa).

Nella Tab. 7.1 e in Fig. 7.8 vengono riportati i valori di FS ricavati per le singole analisi di stabilità condotte, al fine di avere una più immediata visualizzazione e comprensione delle considerazioni fin qui espresse.

Condizione pendio	FS prima generazione	FS seconda generazione
Asciutto	2,6	1,7
Falda 1	2,3	1,4
Falda 2	1,9	1,0
k = 0,26 asciutto	1,6	1,0
k = 0,26 + falda 2	1,0	

Tab. 7.1 – Valori di FS per le analisi di stabilità condotte per le frane di prima e seconda generazione e per le differenti condizioni del versante.

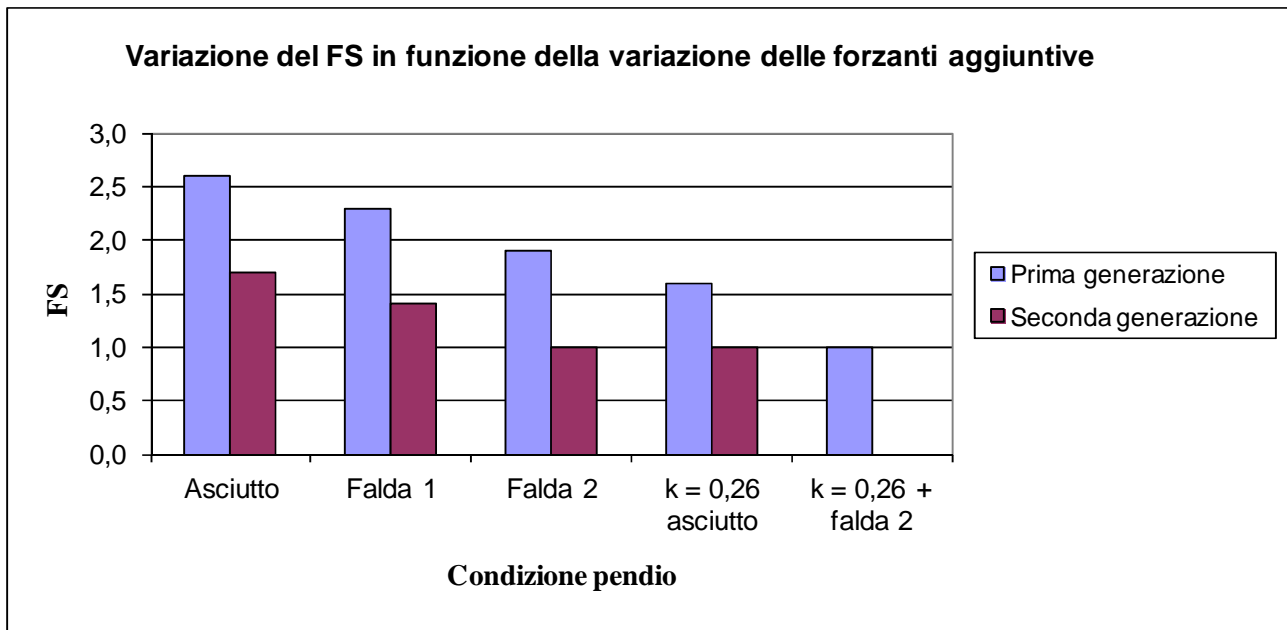


Fig. 7.8 – Rappresentazione grafica dei valori di FS per le analisi di stabilità condotte per le frane di prima e seconda generazione e per le differenti condizioni del versante.

7.5 MODELLAZIONE NUMERICA DELLA FRANA SANTA TRADA

Come fatto per la frana del Monte Paci, anche in questo caso per ricostruire in *back-analysis* l'evento gravitativo di Santa Trada è stata messa a punto una modellazione numerica 2D tenso-deformativa attraverso l'utilizzo del codice di calcolo FLAC 6.0 (ITASCA, 2008) con un codice alle differenze finite (FDM).

Con lo scopo di ottenere informazioni dettagliate sui processi, è stata utilizzata, per la discretizzazione dello spazio di analisi, una maglia di lato 1,5 m, per una griglia di 268x160 maglie. Tale risoluzione si adatta all'estensione del versante (circa 200 m) e permette di ottenere un numero di maglie (42.880) proporzionate ai tempi di calcolo. Infatti, al fine di ottenere un'alta risoluzione nel modello numerico, la sezione considerata non raggiunge il culmine del versante, ma è stata interrotta alla quota di circa 300 m s.l.m., in corrispondenza del livello dei depositi di terrazzo marino con un'età di circa 300.000 anni (Fig. 7.9).

Il modello evolutivo è stato riprodotto simulando le più importanti fasi evolutive del Pleistocene e dell'Olocene che il versante ha subito in relazione all'evento gravitativo, cui successivamente sono state aggiunte le attività antropiche e l'influenza delle intense precipitazioni che hanno portato al re-innesco del movimento il 30 gennaio 2009. Le fasi evolutive (visualizzabili in Fig. 7.9) sono le seguenti:

- 1) approfondimento del fosso Santa Trada da 300 a 125 ka;
- 2) approfondimento del fosso da 125 a 84 ka;
- 3) approfondimento del fosso da 84 ka al 2001;
- 4) attività della cava ai piedi del versante tra il 2001 e il 2002;
- 5) attività della cava tra il 2002 e il 2005;
- 6) attività della cava tra il 2005 e il 2008;
- 7) apertura e saturazione di *tension crack* tra ottobre 2008 e gennaio 2009 a seguito delle intense precipitazioni.

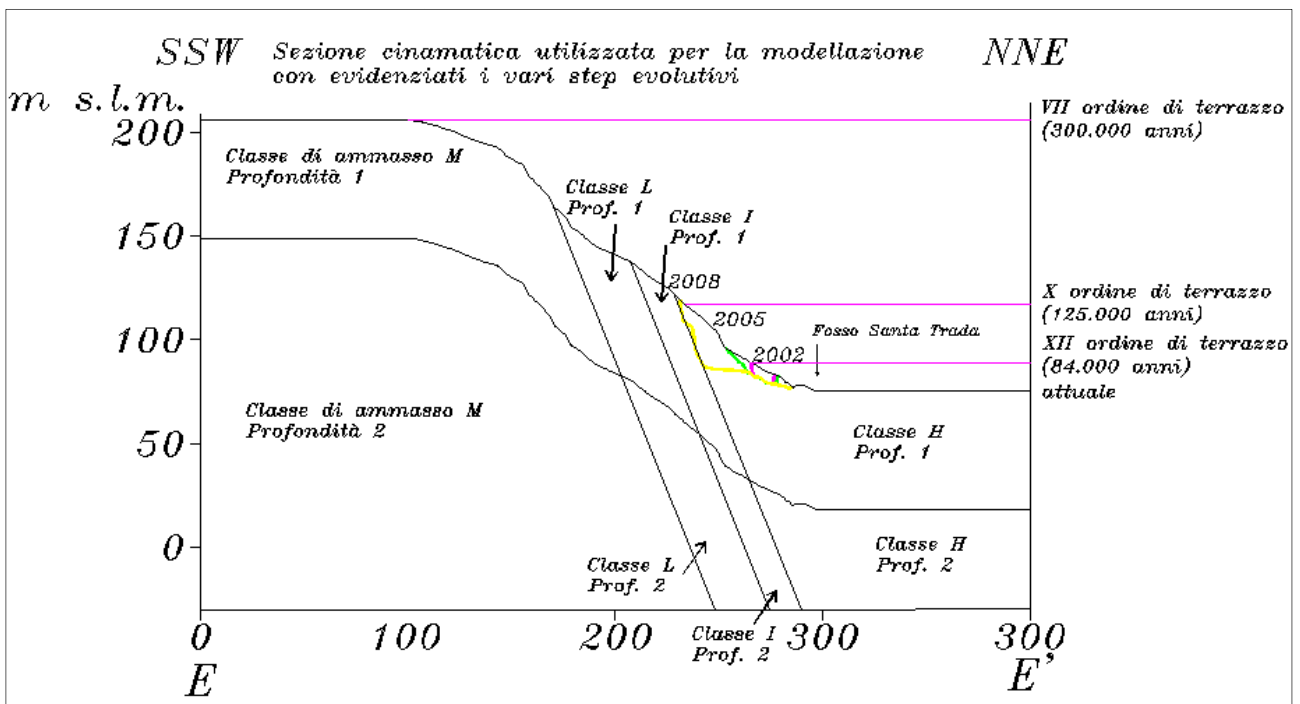


Fig. 7.9 – Schematizzazione delle diverse fasi riconosciute del modello evolutivo del versante, in corrispondenza della sezione cinematica E-E'. Viene riportata anche la suddivisione in classi di ammasso così come definita dal modello geologico-tecnico proposto.

La modellazione numerica tenso-deformativa è stata condotta in condizioni di *creep*, quindi sotto condizioni tempo-dipendenti, con una legge costitutiva di tipo visco-plastica in accordo al modello reologico di Burger (Fig. 7.10).

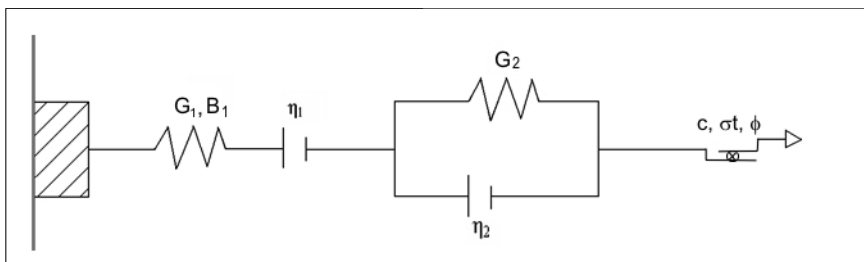


Fig. 7.10 – Schematizzazione del modello reologico di Burger utilizzato nella modellazione.

Al fine di comprendere alcuni passaggi relativi alla modellazione effettuata, è necessario fare delle considerazioni:

- per l'elemento visco-elastico di Maxwell, all'interno del modello di Burger (Fig. 7.10), i parametri di deformabilità sono quelli ricavati, per le diverse classi di ammasso, tramite l'approccio equivalente continuo di Sridevi & Sitharam (2000);
- per l'elemento visco-plastico di Kevin-Voigt sono stati utilizzati i parametri ricavati dalle prove di laboratorio;
- i valori di viscosità, sia per gli elementi visco-elastici che per quelli visco-plastici del modello di Burger sono stati selezionati nel range tra 10^{19} e 10^{23} Pa*s (Apuani et alii, 2005, 2007), e calibrati in funzione alle evidenze morfologiche e agli spostamenti registrati in conseguenza del movimento gravitativo. Il valore di viscosità dell'elemento visco-elastico di Kevin-Voigt è stato assunto essere di un ordine di grandezza più grande rispetto al corrispettivo valore del modello visco-plastico di Maxwell.

I risultati dimostrano che la deformazione gravitazionale derivante dal *creep* tempo-dipendente degli ammassi rocciosi che influenza il versante è responsabile della presenza di scarpate che possono essere osservate anche dalle immagini aeree effettuate prima dell'inizio dell'attività di cava. La più importante di queste si osserva a circa 200 m s.l.m., una secondaria si riscontra, invece, a circa 150 m s.l.m.. Queste scarpate coincidono con zone in condizioni di rottura per trazione del modello numerico (Fig. 7.11a e Fig. 7.12a).

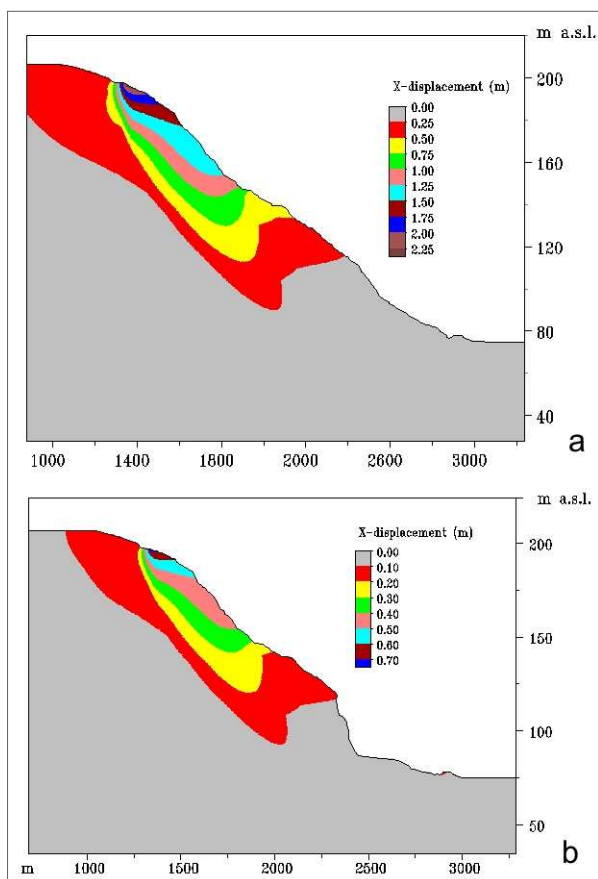


Fig. 7.11 – Spostamenti orizzontali ottenuti dalla modellazione numerica tenso-deformativa fino a novembre 2001 (a) e ottobre 2008 (b).

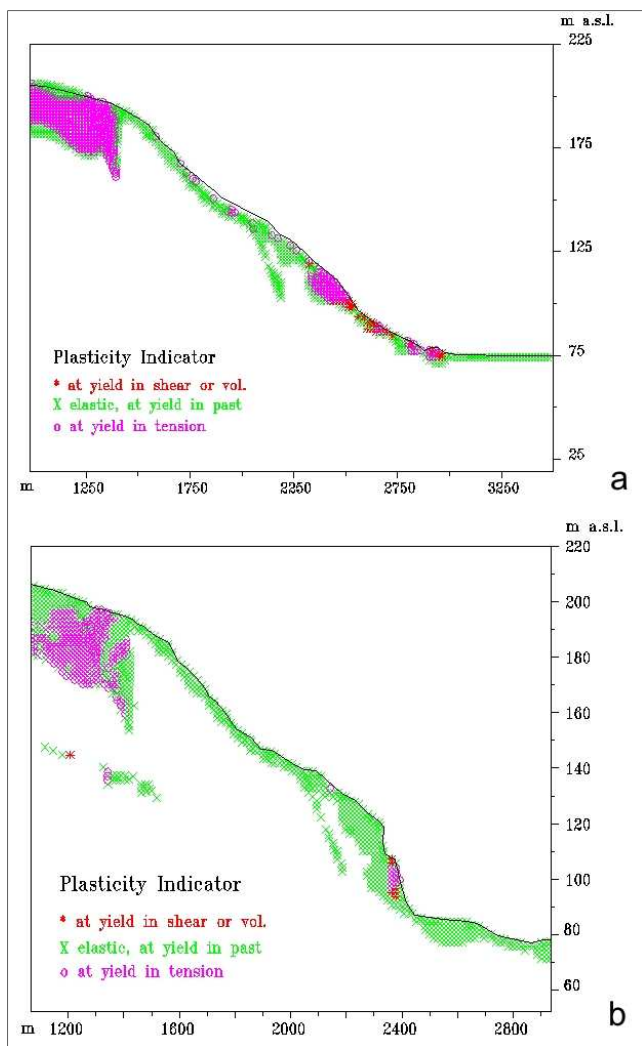


Fig. 7.12 – Condizioni di plasticizzazione ottenute dalla modellazione numerica tenso-deformativa fino a novembre 2001 (a) e ottobre 2008 (b).

Lo spostamento orizzontale nella modellazione tra novembre 2001 e ottobre 2008, supera i 70 cm nella scarpata principale (Fig. 7.11b), che sommati agli altri 2 m precedentemente accumulati fanno raggiungere alla scarpata una lunghezza di circa 3 m, del tutto congruente con quanto osservato sul versante prima della frana del 2009 (Fig. 7.12b).

Questi risultati dimostrano che in questo caso lo spostamento totale cumulativo è fortemente correlato ai processi di deformazione tempo-dipendenti prima dell'inizio dell'attività di cava. Questo implica che non è necessario attribuire queste deformazioni ad alcun evento eccezionale quale un terremoto o precipitazioni molto intense.

La formazione di *tension crack* in prossimità del fronte di cava nell'ottobre 2008 (Fig. 7.12b), ad una quota di circa 120 m s.l.m., è da attribuirsi al rilascio tensionale causato dall'attività antropica. Per simulare l'effetto delle intense precipitazioni avvenute nei mesi tra ottobre 2008 e gennaio 2009, è stata applicata una pressione idrostatica lungo tali fratture verticali. Per riuscire a simulare il meccanismo di rottura occorso a gennaio 2009 (Fig. 7.13), è stato necessario ridurre i parametri di

resistenza e deformabilità degli ammassi rocciosi presenti in prossimità del fronte di cava, nel modello geologico-tecnico appartenenti alle classi di ammasso H e I, ai valori appartenenti alla classe di ammasso M, ovvero quelli che caratterizzano la scarpata di frana principale. Questa “correzione” del modello geologico-tecnico è congruente col modello evolutivo del versante. I dati geomeccanici ricavati in corrispondenza della scarpata principale, risentono, ovviamente, di tutta l’evoluzione del versante, compresa la formazione di *tension crack* dovute alla deformazione tempo-dipendente. I dati geomeccanici ricavati in prossimità del fosso Santa Trada, come si può osservare nella cartografia dell’Allegato 3 (Tavola 3.2), si riferiscono ad affioramenti che non hanno subito l’influenza dell’attività di cava, e quindi non sono stati interessati dalla formazione delle *tension crack* di Fig. 7.12. E’ quindi presumibile che qualora vi fosse stata la possibilità di effettuare dei rilievi geomeccanici sui fronti di cava, ora totalmente coperti dal detrito di frana, i risultati ottenuti sarebbero stati analoghi a quelli ricavati in prossimità della scarpata principale.

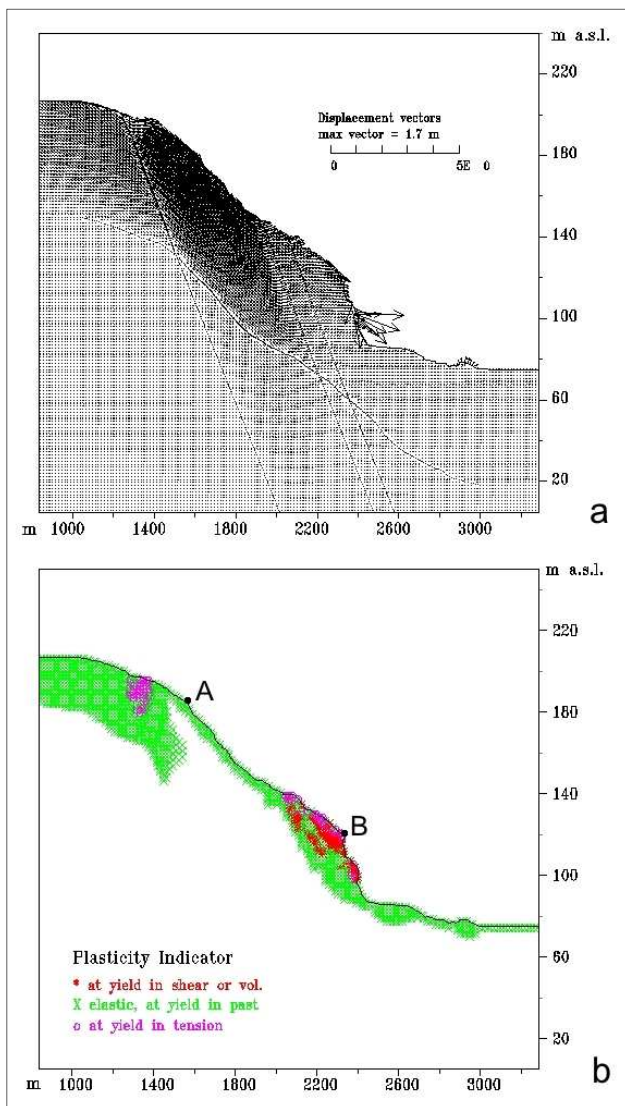


Fig. 7.13 – *Spostamento (a) e relativo stato di plasticizzazione (b) ottenuti dalla modellazione numerica tenso-deformativa a gennaio 2009.*

La modellazione messa a punto ci ha permesso di descrivere l'evento gravitativo che ha interessato il versante sinistro del Vallone Santa Trada, quasi in corrispondenza dell'attuale sede autostradale, attraverso una serie di processi tra loro sequenziali:

- 1) un processo deformativo gravitazionale tempo-dipendente (*creep* dell'ammasso roccioso);
- 2) una rottura progressiva indotta dal rilascio tensionale dovuto all'attività di cava alla base del versante;
- 3) il riempimento delle *tension crack* a causa degli eventi piovosi nei mesi antecedenti l'evento gravitativo;
- 4) l'incremento della fratturazione degli ammassi rocciosi in prossimità del fronte di cava.

Le osservazioni geologiche e geomorfologiche di sito, nonché l'evoluzione del versante desumibile dall'analisi delle foto aeree disponibili dal 1943 al 2008, risultano del tutto congruenti con i processi evidenziati dalla modellazione numerica effettuata.

8. CONCLUSIONI

Il lavoro presentato in questa tesi è stato incentrato sullo studio degli ammassi rocciosi fratturati. Questo specifico tema di ricerca è stato inquadrato in un più ampio contesto di attività comprendente lo studio geologico e geomorfologico di base di un'area di circa 100 km² della Calabria tirrenica meridionale, l'utilizzo di tecniche di rilevamento geomeccanico e l'analisi di fenomeni di instabilità gravitativa, questi ultimi condotti o mediante analisi tenso-deformative sviluppate attraverso metodi numerici o più tradizionali analisi di stabilità all'equilibrio limite globale.

L'aspetto originale della presente ricerca è rappresentato da una metodologia qui messa a punto per attribuire parametri di resistenza e deformabilità ad ammassi rocciosi affioranti e non, a diverso grado di fratturazione. Questa metodologia parte dall'acquisizione di parametri geomeccanici *standard* in sito, per poi distinguersi dalle analisi convenzionali in fase di classificazione, e successiva zonazione spaziale, di ammasso.

Più in particolare, è stato introdotto un indice, l'Indice Sintetico di Discontinuità (ISD), per la caratterizzazione geomeccanica del grado di fratturazione d'ammasso che è rappresentativo, in forma sintetica, degli indici standard di caratterizzazione degli ammassi rocciosi fratturati, ovvero l'indice della dimensione dei blocchi (I_b) ed il numero volumetrico delle discontinuità (J_v). Tale indice è stato messo a confronto con le modalità di attribuzione di parametri equivalenti di resistenza e deformabilità attraverso approcci continui, quale quello proposto da Sridevi & Sitharam (2000) che, a sua volta, si basa su un parametro sintetico, il *joint factor*, che, tuttavia, si deduce sulla base di correlazioni empiriche tra i parametri che sono alla base della sua definizione, mentre non tiene conto di una distribuzione statistica del dato di ammasso, riferita, cioè, ad un areale di riferimento e/o di test. In relazione a ciò, l'introduzione dell'ISD ha comportato una intensa e sito-specifica analisi spaziale che ha reso possibile definire la variabilità del parametro sia a scala territoriale che in termini intrinseci, ovvero rispetto alla variabilità degli indici di base rispetto ai quali esso è stato definito. Ciò ha trovato una prima validazione attraverso la restituzione di modelli geologico-tecnici a scala di versanti naturali, definiti attraverso la realizzazione di una cartografia, geomeccanica e geologico-technica, esclusivamente basata sulla distribuzione spaziale dei valori dell'ISD. In più, l'analisi statistica dei dati geomeccanici ha consentito di discretizzare le diverse aree prese in esame in funzione di classi di ammasso definite sempre in relazione ai valori di ISD.

In ultimo, a seguito dell'attribuzione a diverse classi di ammasso di un proprio valore centrale di ISD sono state ad esse associate determinate proprietà e caratteristiche meccaniche, in termini di resistenza e di deformabilità. Su tale base si sono impostate e condotte analisi di stabilità su alcuni

casi di studio (versanti) sia mediante approcci tradizionali all'equilibrio limite globale che attraverso metodi numerici di analisi tenso-deformative.

Lo studio qui trattato presenta tuttavia ancora ad oggi alcune limitazioni inerenti la specificità dell'area di studio e, di conseguenza, delle litologie in essa presenti; la mancanza di un'analisi di ripetibilità dell'approccio in settori e/o contesti geologici prossimali o analoghi; la possibilità di validare l'approccio proposto in ulteriori campi di applicazione geologico applicativa o geologico tecnica.

A tale riguardo, tuttavia, giova ricordare che l'area selezionata per il presente studio ha reso disponibile sia in affioramento che in galleria (grazie all'intensa attività di cantierizzazione svoltasi negli ultimi anni e tuttora in corso) una rara ed eccezionale quantità di dati che hanno costituito l'imprescindibile base conoscitiva e sperimentale per la qui proposta metodologia di analisi.

Infine, si ritiene possibile ed auspicabile un ulteriore sviluppo della presente ricerca che, analogamente a quanto fatto da altri Autori, sia volto ad inserire il nuovo indice geomeccanico, ISD, in equazioni semi-empiriche atte a definire proprietà di resistenza meccanica e deformabilità degli ammassi rocciosi fratturati secondo approcci di caratterizzazione equivalente continua degli stessi. A tale fine, tuttavia, sarebbe necessario supportare lo studio di caratterizzazione areale qui condotto con esperimenti di validazione in sito e/o in laboratorio dei valori attribuiti ai suddetti parametri e derivabili su base teorica. In tal senso, un utile e proficuo contributo potrebbe derivare da studi di comparazione con dati di monitoraggio riferiti a processi naturali e/o opere antropiche ovvero da sperimentazioni fisico-analogiche di laboratorio in scala ridotta su provini fratturati.

BIBLIOGRAFIA

- Ambraseys N., Smit P., Berardi R., Rinaldis D., Cotton F., Berge-Thierry C., 2000.** *Dissemination of European Strong-Motion Data. CD-ROM collection.* European Council, Environment and Climate Research Programme.
- Antonoli F., Ferranti L., Lambeck K., Kershaw S., Verrubbi V., Dai Pra G., 2006.** *Late Pleistocene to Holocene record of changing uplift-rates in southern Calabria and northeastern Sicily (southern Italy, Central Mediterranean Sea).* Tectonophysics 422, 23–40.
- Apuani T., Masetti M., Rossi M., 2007.** *Stress-strain-time numerical modelling of a deepseated gravitational slope deformation: Preliminary results.* Quaternary International, 171-172: 80-89.
- Apuani T., Rossi M., Masetti M., 2005.** *Applicazione di modelli reologici tempo dipendenti nell'evoluzione di deformazioni gravitative profonde.* Giornale di Geologia Applicata, 2: 99-105.
- Arora V.K., 1987.** *Strength and deformational behaviour of jointed rocks.* PhD thesis, IIT Delhi, India.
- ARPACAL, 2010.** *Centro funzionale Meteorologico della Calabria: annali idrologici (anni 2008-2009).* On-line web site: http://www.cfcalabria.it/DatiVari/midmar/banca_dati.php.
- ASTM D 2845-90, 1990.** *Standard Test Method for Laboratory Determination of Pulse Velocities and Ultrasonic Elastic Constants for Rock,* American Society for Testing and Materials.
- Barton N.S., Choubey V., 1977.** *The shear strength of rock joints in theory and practice.* Rock Mech., 10, 1-54.
- Barton N., Lien R., Lunde J., 1974.** *Engineering classification of rock masses for the design of rock support.* Rock Mechanics 6, 1974, pp. 189-236.
- Bieniawski Z.T., 1973.** *Engineering Classification of Jointed Rock Masses.* In Transaction of the South African Institution of Civil Engineers, 15, p. 335- 344.
- Bieniawski Z.T., 1976.** *Rock mass classifications in rock engineering.* "Exploration for Rock Engineering". Z.T. Bieniawski (ed.), A.A. Balkema, Cape Town, 1, 97-106.
- Bieniawski Z.T., 1979.** *The Geomechanics classification in rock engineering applications.* Proc. In Proc. 4th Int. Cong. Rock Mech. ISRM, Momtreux, 2, pp. 41-48.
- Bieniawski Z.T., 1989.** *Engineering rock mass classifications.* J. Wiley & Sons, pp. 251.
- Bonavina M., Bozzano F., Martino S., Pellegrino A., Prestininzi A., Scandurra R., 2005.** *Le colate di fango e detrito lungo il versante costiero tra Bagnara Calabria e Scilla (Reggio Calabria): valutazioni di suscettibilità.* Giornale di Geologia Applicata 2, pp. 65-74.
- Bosman A., Bozzano F., Chiocci F.L., Mazzanti P., 2006.** *The 1783 Scilla tsunamis: evidences of a submarine landslide as a possible (con?)cause.* EGU 2006, Geophysical Research Abstracts, 8.
- Bozzano F., Lenti L., Martino S., Montagna A., Paciello A., 2011.** *Earthquake triggering of landslides in highly jointed rock masses: reconstruction of the 1783 Scilla rock avalanche (Italy).* Geomorphology 129, 2011, pp. 294-308. doi: 10.1016/j.geomorph.2011.02.025

Broch E., Franklin J.A., 1972. *The Point Load Strength Test*. Int. Journal Rock Mech. Min. Sci 9, 1, pp. 669-697.

Calcaterra D., Parise M., 2010. *Weathering in the crystalline rocks of Calabria, Italy, and relationships to landslides*. Geological Society, London, Engineering Geology Special Publications, v. 23, pp. 105-130.

Calinski R.B., Harabasz J., 1974. *A dendrite method for cluster analysis*. Communications in Statistics, Vol. 3, pp. 1-27.

Catalano S., De Guidi C., Monaco C., Tortorici G., Tortorici L., 2008. *Active faulting and seismicity along the Siculo-Calabrian Rift Zone (Southern Italy)*. Tectonophysics 453, pp. 177–193.

Ciotoli G., Finoia M. G., 2005. *Dalla Statistica alla Geostatistica: Introduzione all'analisi dei Dati Geologici e Ambientali*. Aracne Editrice, Roma, pp. 418.

Cruden D.M., Varnes D.J., 1996. *Landslide types and processes*. In: Turner, A.K., Schuster, R.L. (Eds.), *Landslides: Investigation and Mitigation*. Transportation Research Board, Spec. Report 247. National Research Council, National Academy Press, Washington DC, pp. 36-75.

Deere D.U., 1964. *Technical description of rock cores for engineering purposes*. Rock Mechanics and Engineering Geology vol. 1-1, pp. 17-22.

Deere D.U., Miller R.P., 1966. *Engineering classification and index properties for intact rocks*. Tech. Rept. No. AFWL-TR-65-116 Air Force Weapons Laboratory New Mexico.

Deere D.U., Hendron A.J. Jr., Patton F.D., Cording E.I., 1967. *Design of surface and near-surface construction in rock*. 8th Symp. on Rock Mechanics.

De Lorenzo A.M., 1877. *Scilla inondata dal mare nella notte dopo il 5 febbraio 1783*. Memorie da servire alla storia sacra e civile di Reggio e delle Calabrie, Cronache e Documenti rari, 4(4–7), Reggio Emilia (IT), pp. 317–376.

Del Ventisette C., Intriери E., Luzi G., Casagli N., Fanti R., Leva D., 2011. *Using ground based radar interferometry during emergency: the case of the A3 motorway (Calabria Region, Italy) threatened by a landslide*. Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 11, pp. 2483–2495.

Drury S.A., 1987. *Image interpretation in geology – 2nd ed.*. Chapman & Hall Ed. Pp.273.

Dumas B., Gueremy P., Raffy J., 2005. *Evidence for sea-level oscillation by the “characteristic thickness” of marine deposits from raised terraces of Southern Calabria (Italy)*. Quaternary Science Reviews vol. 24 pp. 2120-2136.

Eberhardt E., Stead D., Coggan J.S., 2004. *Numerical analysis of initiation and progressive failure in natural rock slope: the 1991 Randa rockslide*. Int. Journ. Of Rock Mech. Min. Sciences 41, pp. 69-87.

Ercoli L., 1981. *Metodo normalizzato per la descrizione delle discontinuità negli ammassi rocciosi*. Rivista Italiana di Geotecnica, 15, 3, pp. 209-214, Napoli.

Fabbris L., 1997. *Statistica multivariata: Analisi esplorativa dei dati*. Mc Grow-Hill, Milano.

Fellenius W., 1936. Calculation of stability of earth dams. Trans. 2nd Int. Congr. Large Dams, 4, 445.

Ferranti L., Monaco C., Antonioli F., Maschio L., Kershaw S., Verrubi V., 2007. *The contribution of regional uplift and coseismic slip to the vertical crustal motion in the Messina Straits, southern Italy:*

Evidence from raised Late Holocene shorelines. Journal of Geophysical Research, Vol. 112, B06401, doi:10.1029/2006JB004473.

Ferranti L., Monaco C., Morelli D., Antonioli F., Maschio L., 2008. *Holocene activity of the Scilla Fault, Southern Calabria: Insights from coastal morphological and structural investigations.* Tectonophysics Vol. 453, pp. 74–93.

Galli P., Bosi V., 2002. *Paleoseismology along the Cittanova fault: implications for seismotectonics and earthquake recurrence in Calabria (southern Italy).* Jour. Geophys. Res. 107, 1–19.

Gerardi F., Barbano M.S., De Martini P.M., Pantosti D., 2008. *Discrimination of tsunami source (earthquake versus landslides) on the basis of historical data in Eastern Sicily and southern Calabria.* Bulletin of the Seismological Society of America. doi:10.1785/0120070192.

Ghisetti F., 1979. *Evoluzione neotettonica dei principali sistemi di faglie della Calabria centrale.* Boll. Soc. Geol. It., 98, pp. 387-430.

Ghisetti F., 1980. *Caratterizzazione dei blocchi della Calabria meridionale in base alla velocità di sollevamento nel Plio-Pleistocene: una proposta di zonazione neotettonica.* Contributi preliminari alla realizzazione della Carta Neotettonica d'Italia, n°356 del Progetto Finalizzato Geodinamica, pp. 775-809.

Ghisetti F., 1981. *L'evoluzione strutturale del bacino plio-pleistocenico di Reggio Calabria nel quadro geodinamico dell'arco calabro.* Boll. Soc. Geol. It., 100, pp. 433-466.

Graziani L., Maramai A., Tinti S., 2006. *A revision of the 1783 Calabrian (southern Italy) tsunamis.* Natural Hazard and Earth System Sciences 6, pp. 1053-1060.

Griffith A.A., 1924. *Theory of rupture.* Proc. 1st. Int. Congr. Appl. Mech., pp. 55-63.

Grimaldi F.A., 1784. *Descrizione de' tremuoti accaduti nelle Calabrie Ultra nel 1783.* Porricelli G.M., Napoli.

Guarnieri P., 2006. *Plio-Quaternary segmentation of the south Tyrrhenian forearc basin.* Int J Earth Sci (Geol Rundsch) 95: 107-118.

Guarnieri P., Di Stefano A., Carbone S., Lentini F., Del Ben A., 2004. *A multidisciplinary approach to the reconstruction of the Quaternary evolution of the Messina Strait. with Geological map of the Messina Strait, scala 1:25.000.* In Mapping Geology in Italy, Ed. APAT, 45-50.

Hoek E., 1983. *Strength of jointed rock masses.* 23rd. Rankine Lecture. Géotechnique 33 (3), pp. 187-223.

Hoek E., 1994. *Strength of rock and rock masses.* ISRM News J., 2, 4-16.

Hoek E., 1990. *Estimating Mohr-Coulomb friction and cohesion values from the Hoek-Brown failure criterion.* Intl. J. Rock Mech. & Mining Sci. & Geomechanics Abstracts. 12 (3), pp. 227-229.

Hoek E., Brown E.T., 1980. *Empirical strength criterion for rock masses.* Journal of Geotechnical Engineering Division ASCE, GT9 106, pp. 1013–1035.

Hoek E., Brown E.T., 1988. *The Hoek-Brown failure criterion - a 1988 update.* Proc. 15th Canadian Rock Mech. Symp. (ed. J.H. Curran), pp. 31-38. Toronto: Civil Engineering Dept., University of Toronto.

Hoek E., Brown E.T., 1997. *Practical estimates of rock mass strength.* Intl. J. Rock Mech. & Mining Sci. & Geomechanics Abstracts. 34(8), 1165-1186.

- Hoek E., Carranza-Torres C., Corkum B., 2002.** *Hoek-Brown failure criterion – 2002 edition*. Proc. North American Rock Mechanics Society. Toronto, July 2002.
- Hoek E., Kaiser P.K., Bawden W.F., 1995.** *Support of underground excavations in hard rock*. Rotterdam, Balkema, pp. 215.
- Hoek E., Marinos P., Benissi M., 1998.** *Applicability of the Geological Strength Index (GSI) classification for very weak and sheared rock masses. The case of the Athens Schist Formation*. Bull. Engg. Geol. Env. 57 (2), pp. 151-160.
- Hoek E., Wood D., Shah S., 1992.** *A modified Hoek-Brown criterion for jointed rock masses*. Proc. rock characterization, symp. Int. Soc. Rock Mech.: Eurock '92, (J. Hudson ed.), pp. 209-213.
- Hudson J. A., 1992.** *Rock Engineering Systems: Theory & Practice*. Ellis Horwood.
- Hudson J. A., Harrison J. P., 1992.** *A new approach to studying complete rock engineering problems*. Quarterly Journal of Engineering Geology, 25, 93-105.
- I.S.R.M., 1978.** *Determinazione della resistenza a trazione dei materiali rocciosi*. IJRMMS, 15, 99-103 - in traduzione italiana sulla R.I.G. 3/93.
- I.S.R.M., 1979.** *Determinazione della resistenza a compressione uniassiale e della deformabilità dei materiali rocciosi*. IJRMMS, 16, 135-140 - in traduzione italiana sulla R.I.G. 3/93.
- I.S.R.M., 1979.** *Determinazione di: Contenuto d'acqua, porosità, densità, imbibizione e proprietà relative, rigonfiamento, indici di durezza*. IJRMMS, 16, 141-156 – PART 1- in traduzione italiana sulla R.I.G. 3/93.
- I.S.R.M., 1983.** *Determinazione della resistenza di materiali rocciosi in prove di compressione triassiale*. IJRMMS, 20, 283-290 - in traduzione italiana sulla R.I.G. 3/93.
- I.S.R.M., 2007.** *The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring: 1974-2006*. R. Ulusay and J.A. Hudson (editors), Suggested Methods Prepared by the Commission on Testing Methods, International Society for Rock Mechanics, Compilation Arranged by the ISRM Turkish National Group, Ankara, Turkey, 628 pp..
- ITASCA, 2008.** *FLAC 6.0: User Manual*. Licence number 213-039-0127-30821. Sapienza-Università di Roma, Dipartimento di Scienze della Terra.
- Jacques E., Monaco C., Tapponier P., Tortorici L., Winter T., 2001.** *Faulting and earthquake triggering during the 1783 Calabria seismic sequence*. Geophys J. 147, 499–516.
- Jaeger J.C., Cook N.G.W., 1976.** *Fundamentals of Rock Mechanics*. John Wiley, New York, pp.585.
- Lenti L., Martino S., 2010.** *New procedure for deriving multifrequential dynamic equivalent signals: numerical implementation and case study based on Italian accelerometric records*. Bulletin of Earthquake Engineering 8, pp. 813-846.
- Lowe, D.R., LoPiccolo, R., 1974.** *The characteristics and origins of dish and pillar structures*. J. Sediment. Petrol. 44.
- Lunardi P., 2006.** *Progetto e costruzione di gallerie – Analisi delle deformazioni controllate nelle rocce e nei suoli (ADECO-RS)*. Casa Editrice Hoepli, pp. 560.

- Marinos P., Hoek E., 2000.** *GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation*. Proc. International Conference on Geotechnical & Geological Engineering, GeoEng2000, Technomic publ., 1422-1442, Melbourne.
- Marinos P., Hoek E., 2001.** *Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch*. Bulletin of the Engineering Geology & the Environment (IAEG), 60, 85-92
- Mates S.P., Rhorer R., Banovic S., Whitenton E., Fields R., 2007.** *Tensile strength measurements of frangible bullets using the diametral compression test*. International Journal of Impact Engineering, doi:10.1016/j.ijimpeng.2007.04.005.
- Mazzanti P., 2008.** *Studio integrato subaereo-subacqueo di frane in ambiente costiero: i casi di Scilla (RC) e del lago di Albano (RM)*. Giornale di Geologia Applicata 8(2):245–261.
- Mazzanti P., Bozzano F., 2011.** *Revisiting the February 6th 1783 Scilla (Calabria, Italy) landslide and tsunami by numerical simulation*. Marine Geophysical Research, DOI: 10.1007/s11001-011-9117-1.
- Mazzoccola D. F., Hudson J. A., 1996.** *A comprehensive method of rock mass characterization for indicating natural slope instability*. Quarterly Journal of Engineering Geology, 29, 37-56.
- Messina A., Ioppolo S., 1983.** *La massa migmatitica di Scilla (Calabria meridionale)*. Rendiconti Società Italiana di Mineralogia e Petrologia, 38 (3), pp. 1051-1064.
- Miyauchi T., Dai Pra G., Sylos Labini S., 1994.** *Geochronology of Pleistocene marine terraces and regional tectonics in the Tyrrhenian coast of south Calabria, Italy*. Il Quaternario 7 (1), 17–34.
- Minasi A., 1785.** *Continuazione ed appendice sopra i tremuoti descritti nella relazione colla data di Scilla de 30 settembre 1783, con altro che accadde in progresso*. Messina.
- Minasi G., 1970.** *La specola del filosofo. Natura e sorti nelle incisioni di Antonio Minasi*. Ilario Principe, Brutium.
- Minasi G., 1971.** *Notizie storiche della città di Scilla*. Edizioni Parallelo 38. Reggio Calabria.
- Montenat C., Barrier P., Ott d'Estevou P., 1991.** *Some aspects of the recent tectonics in the Strait of Messina, Italy*. Tectonophysics 194, 203–215.
- Montenat C., Barrier P., Ott d'Estevou P., Hibsich C., 2007.** *Seismites: An attempt at critical analysis and classification*. Sedimentary Geology 196, 5–30.
- Murphy W., 1995.** *The geomorphological controls on seismically triggered landslides during the 1908 Straits of Messina earthquake, Southern Italy*. Quarterly Journal of Engineering Geology, 28, 61-74.
- Orazi A., Colasanto F., Colombi A., Martini G., Paciello A., Pugliese A., Rinaldis D., Zini A., 2008.** *The Seismic Zonation of Latium Region Based on New Criteria*. Proceedings of the 14th World Conference on Earthquake Engineering, October 12–17, 2008, Beijing, China, Paper No. 07–0199.
- Palmström A., 1982.** *The volumetric joint count - a useful and simple measure of the degree of jointing*. Proc. int. congr. IAEG, New Delhi, 1982, pp. 221-228.
- Palmström A., 1985.** *Application of the volumetric joint count as a measure of rock mass jointing*. Proc. Int. Symp. Fundamentals of Rock Joints, Björkliden, Sweden, pp 103-110.

- Palmström A., 1986.** *The volumetric joint count as a measure of rock mass jointing.* Presented at the Conference on Fracture, Fragmentation and Flow, Jerusalem, pp. 19.
- Priest S.D., Hudson J.A., 1976.** *Estimation of discontinuity spacing and trace length using scan line surveys.* Int. J. Rock Mech. Min. Sci and Geomech., Vol. 18, pp. 183-197.
- Priest S.D., 1993.** *Discontinuity analysis for rock engineering.* Chapman & Hall, pp. 473.
- Raccomandazioni I.S.R.M., 1994.** *Determinazione della resistenza a carico puntuale (Point Load Test).* IJRMMS, 22, 51-60 (1985) - in traduzione italiana sulla R.I.G. 1/94.
- Ramamurthy T., 1994.** *Strength and modulus responses of anisotropic rocks.* In: Hudson J. A. editor, Comprehensive rock engineering, 1 (13), pp. 313-329.
- Ribacchi R., 2000.** *Mechanical tests on pervasively jointed rock material: insight into rock mass behaviour.* Rock Mechanics and Rock Engineering, 33(4), pp. 243-266.
- Rzhevsky V., Novik G., 1971.** *The physics of rocks.* MIR Publishers, Moscow, pp. 320.
- Sarconi M., 1784.** *Istoria de' fenomeni del tremuoto avvenuto nelle Calabrie, e nel Valdemone nell'anno 1783.* Reale Accademia delle Scienze, e delle Belle Lettere di Napoli, Napoli.
- SAS Institute Inc., 2008.** *SAS/STAT(R) 9.2 User's Guide.* Cary, NC: SAS Institut Inc.
- Scesi L., Papini M., 1995.** *Il rilevamento geologico-tecnico.* Città degli Studi, Milano.
- Sitharam T.G., Sridevi J., Shimizu N., 2001.** *Practical equivalent continuum characterization of jointed rock masses.* International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 38, pp. 437-448.
- Sitharam T.G., Madhavi Latha G., 2002.** *Simulation of excavations in jointed rock masses using a practical equivalent continuum approach.* International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 39, pp. 517-525.
- Sitharam G.T., Maji V.B., Verma A.K., 2007.** *Practical Equivalent Continuum Model for Simulation of Jointed Rock Mass Using FLAC3D.* Int. J. Geomech. 7, pp. 389-396.
- Snedecor G.W., Cochran W.G., 1989.** *Statistical Methods.* Eighth Edition, Iowa State University Press.
- Sridevi J., Sitharam T.G., 2000.** *Analysis of strength and moduli of jointed rocks.* Geotechnical and Geological Engineering, 18, pp.3-21.
- Vachard D., Barrier P., Montenat C., Ott d' Estevou P., 1987.** *Dykes neptuniens, brèches internes et éboulis cimentés des escarpements de faille du Déroit de Messine au Plio-Quaternaire.* Doc. Trav. IGAL, Paris 11, 27-41.
- Verman M., Singh B., Viladkar M.N., Jethwa J.L., 1997.** *Effect of tunnel depth modulus of deformation of rock mass.* Rock Mech. Rock. Engin., 30 (3), pp. 121-127.
- Vivencio G., 1778.** *Historia de' Tremuoti avvenuti nella Provincia della Calabria ulteriore e nella Città di Messina nell'anno 1783 e di quanto nella Calabria fu fatto per lo suo risorgimento fino al 1787 preceduta da una Teoria Istoria Gen. De'Tremuoti.* 1-2 Stamperia reale, Napoli.
- Wang Q. Z., Xing L., 1999.** *Determination of fracture toughness K_{IC} by using the "flattened" Brazilian disk specimen for rocks.* Eng. Fract. Mech., 64: pp. 193-201.

Wang Q.Z., Wu L.Z., 2004. *The flatten Brazilian disc specimen used for determining elastic modulus, tensile strength and fracture toughness of brittle rocks: experimental results.* Paper 1A 05 - Sinorock 2004 Symposium. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Vol. 41, No. 3, CD-ROM, Elsevier Ltd.

Wickham G.E., Tiedemann H.R., Skinner E.H., 1972. *Support determination based on geologic predictions.* In Proc. North American rapid excav. tunneling conf., Chicago, (eds K.S. Lane and L.A. Garfield), 43-64. New York: Soc. Min. Engrs, Am. Inst. Min. Metall. Petrolm Engrs.

Zhang L., Einstein H.H., 2004. *Using RQD to estimate the deformation modulus of rock masses.* International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 41, pp. 337-341.



UNIVERSITA' DI ROMA SAPIENZA

FACOLTA' DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E NATURALI

DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE DELLA TERRA

XXIII CICLO

Approcci equivalenti continui

nella costruzione di modelli geologico-tecnici

di versanti naturali in roccia

APPENDICI

Docente guida:

Prof. Alberto Prestininzi

Codocenti guida:

Prof.ssa Francesca Bozzano

Dott. Salvatore Martino

Dottorando:

Dott. Alfredo Montagna

Matr. 692764

ANNO ACCADEMICO 2010 - 2011

APPENDICE 1

POINT POAD TEST

Nelle pagine successive vengono riportate le tabelle relative a tutte le 195 prove di *point load test* effettuate in sito su campioni di gneiss provenienti dai fronti di scavo delle diverse gallerie in corso di realizzazione nell'ambito dei lavori di ammodernamento dell'Autostrada A3 Salerno-Reggio Calabria (DG24/03) dal km 393+500 (Svincolo di Gioia Tauro escluso) al km 423+300 (Svincolo di Scilla escluso). La discussione dei risultati ottenuti è riportata nel paragrafo 3.2 della presente tesi.

DATA		LITOTIPO			Geomeccanica e/o Galleria												
26/10/2008		Gneiss			Muro imb. N - canna N												
Campione	Tipo	Stratificazione (foliazione)	W ₁	W ₂	W	Distanza	D/W	Test	P	De ²	De	Is	F	Is(50)			
			(mm)	(mm)	(mm)	(mm)			0.3<D/W<1.0	(kN)	(mm ²)	(mm)					
										$= 4 W D / \pi$		$= P / D_e^2$		$= (D_e/50)^{0.45}$		$= F I_s$	
Q1	irregolare	parallela	75,3	88,3	81,8	56,0	0,68	OK	7,5	5.832,456	76,371	1,29	1,21	1,56			
Q2	irregolare	parallela	75,1	74,8	75,0	52,0	0,69	OK	6,5	4.962,324	70,444	1,31	1,17	1,53			
Q3	irregolare	perpendicolare	65,2	117,3	91,3	53,0	0,58	OK	45	6.157,705	78,471	7,31	1,22	8,95			
Q4	irregolare	perpendicolare	95,6	113,2	104,4	54,0	0,52	OK	19	7.178,015	84,723	2,65	1,27	3,36			
Q5	irregolare	parallela	68,9	75,3	72,1	47,0	0,65	OK	26	4.314,627	65,686	6,03	1,13	6,81			
Q6	irregolare	parallela	90,3	70,6	80,5	46,0	0,57	OK	9	4.711,878	68,643	1,91	1,15	2,20			
Q7	irregolare	perpendicolare	90,3	84,4	87,4	54,0	0,62	OK	49	6.005,744	77,497	8,16	1,22	9,94			
Q8	irregolare	parallela	98,0	131,5	114,8	57,0	0,50	OK	32	8.327,942	91,258	3,84	1,31	5,04			
Q9	irregolare	perpendicolare	91,8	119,2	105,5	60,0	0,57	OK	26,5	8.059,606	89,775	3,29	1,30	4,28			
Q10	irregolare	parallela	84,2	108,2	96,2	80,0	0,83	OK	27,5	9.798,852	98,989	2,81	1,36	3,82			
Q11	irregolare	perpendicolare	84,9	78,0	81,5	54,0	0,66	OK	34,5	5.600,089	74,834	6,16	1,20	7,39			
Q12	irregolare	parallela	75,2	73,9	74,6	44,0	0,59	OK	10	4.176,480	64,626	2,39	1,12	2,69			
Q13	irregolare	parallela	71,9	85,8	78,9	53,0	0,67	OK	20	5.320,932	72,945	3,76	1,19	4,46			
Q14	irregolare	perpendicolare	93,5	84,1	88,8	58,0	0,65	OK	29	6.557,693	80,980	4,42	1,24	5,49			
Q15	irregolare	parallela	90,5	94,7	92,6	54,0	0,58	OK	12	6.366,707	79,792	1,88	1,23	2,33			
Q16	irregolare	parallela	86,8	98,0	92,4	47,0	0,51	OK	19	5.529,425	74,360	3,44	1,20	4,11			
Q17	irregolare	parallela	76,6	84,1	80,4	67,0	0,83	OK	23	6.854,421	82,791	3,36	1,25	4,21			
Q18	irregolare	perpendicolare	66,9	81,9	74,4	50,0	0,67	OK	29	4.736,451	68,822	6,12	1,15	7,07			
Q19	irregolare	perpendicolare	81,9	75,8	78,9	51,0	0,65	OK	31	5.120,142	71,555	6,05	1,18	7,11			
Q20	irregolare	perpendicolare	72,2	106,1	89,2	61,0	0,68	OK	25	6.924,068	83,211	3,61	1,26	4,54			
Q21	irregolare	perpendicolare	80,1	82,2	81,2	41,0	0,51	OK	23	4.236,259	65,087	5,43	1,13	6,11			
Q22	irregolare	perpendicolare	69,4	83,1	76,3	56,0	0,73	OK	26	5.436,733	73,734	4,78	1,19	5,70			
Q23	irregolare	perpendicolare	80,3	93,2	86,8	65,0	0,75	OK	20	7.179,479	84,732	2,79	1,27	3,53			
Q24	irregolare	parallela	96,9	95,1	96,0	53,0	0,55	OK	18,5	6.478,243	80,488	2,86	1,24	3,54			
Q25	irregolare	perpendicolare	67,5	63,9	65,7	65,0	0,99	OK	15,5	5.437,369	73,739	2,85	1,19	3,40			
Q26	irregolare	perpendicolare	59,1	90,5	74,8	38,0	0,51	OK	18	3.619,056	60,159	4,97	1,09	5,41			
Q27	irregolare	perpendicolare	70,4	83,8	77,1	54,0	0,70	OK	15	5.301,006	72,808	2,83	1,18	3,35			
Q28	irregolare	perpendicolare	93,1	71,9	82,5	52,0	0,63	OK	15	5.462,198	73,907	2,75	1,19	3,27			

Tab. 1 – Tabella riassuntiva delle prove di point load effettuate su campioni di gneiss provenienti dallo scavo della galleria Muro (imbocchi N – carreggiata N).

DATA		LITOTIPO			Geomeccanica e/o Galleria									
21/09/2008		Gneiss			Muro imb. N - canna S									
Campione	Tipo	Stratificazione	W ₁	W ₂	W	Distanza	D/W	Test	P	De ²	De	Is	F	Is(50)
			(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		0.3<D/W<1.0	(kN)	(mm ²)	(mm)	= P / D _e ²	= (D _e /50) ^{0.45}	= F I _s
L1	irregolare		75,7	90,1	82,9	58,0	0,70	OK	16,5	6.120,1	78,2	2,70	1,22	3,30
L2	irregolare		63,6	124,3	94,0	58,0	0,62	OK	36,0	6.938,0	83,3	5,19	1,26	6,53
L3	irregolare		87,6	88,8	88,2	74,0	0,84	OK	16,0	8.310,2	91,2	1,93	1,31	2,52
L4	irregolare		82,5	90,4	86,5	45,0	0,52	OK	30,0	4.953,2	70,4	6,06	1,17	7,06
L5	irregolare		85,9	93,6	89,8	62,0	0,69	OK	25,0	7.084,9	84,2	3,53	1,26	4,46
L6	irregolare		83,7	113,3	98,5	72,0	0,73	OK	23,5	9.029,8	95,0	2,60	1,34	3,47
L7	irregolare		73,0	117,6	95,3	52,0	0,55	OK	31,0	6.309,7	79,4	4,91	1,23	6,05
L8	irregolare		85,1	116,2	100,7	60,5	0,60	OK	14,0	7.753,2	88,1	1,81	1,29	2,33
L9	irregolare		64,9	121,2	93,1	48,0	0,52	OK	7,0	5.686,8	75,4	1,23	1,20	1,48
L10	irregolare		67,3	89,0	78,2	48,0	0,61	OK	11,5	4.776,2	69,1	2,41	1,16	2,79
L11	irregolare		74,7	81,3	78,0	62,0	0,79	OK	20,0	6.157,4	78,5	3,25	1,22	3,98
L12	irregolare		95,2	93,3	94,2	58,0	0,62	OK	27,0	6.956,5	83,4	3,88	1,26	4,89
L13	irregolare		87,1	71,3	79,2	43,0	0,54	OK	7,0	4.336,1	65,8	1,61	1,13	1,83
L14	irregolare		93,5	105,6	99,6	64,0	0,64	OK	23,5	8.112,1	90,1	2,90	1,30	3,78
L15	irregolare		91,0	82,3	86,7	76,5	0,88	OK	9,0	8.440,0	91,9	1,07	1,31	1,40
L16	irregolare		105,4	86,4	95,9	58,0	0,60	OK	14,0	7.082,0	84,2	1,98	1,26	2,50
L17	irregolare		77,8	86,9	82,4	47,0	0,57	OK	5,5	4.928,0	70,2	1,12	1,16	1,30
L18	irregolare		66,1	109,0	87,6	41,0	0,47	OK	17,0	4.570,4	67,6	3,72	1,15	4,26
L19	irregolare		87,8	116,5	102,2	74,0	0,72	OK	24,0	9.624,5	98,1	2,49	1,35	3,38
L20	irregolare		92,1	121,4	106,8	54,0	0,51	OK	14,0	7.339,6	85,7	1,91	1,27	2,43
L21	irregolare		85,6	109,4	97,5	47,0	0,48	OK	6,0	5.834,6	76,4	1,03	1,21	1,24
L22	irregolare		78,8	94,6	86,7	81,5	0,94	OK	26,0	8.996,8	94,9	2,89	1,33	3,85
L23	irregolare		86,8	107,9	97,4	71,0	0,73	OK	32,0	8.800,4	93,8	3,64	1,33	4,83
L24	irregolare		71,6	89,0	80,3	54,0	0,67	OK	4,2	5.521,0	74,3	0,76	1,20	0,91
L25	irregolare		92,7	95,3	94,0	38,5	0,41	OK	13,5	4.607,9	67,9	2,93	1,15	3,36
L26	irregolare		79,7	103,2	91,5	56,0	0,61	OK	13,0	6.520,5	80,7	1,99	1,24	2,47
L27	irregolare		88,8	116,6	102,7	67,5	0,66	OK	23,5	8.824,3	93,9	2,66	1,33	3,54
L28	irregolare		95,3	121,1	108,2	64,0	0,59	OK	17,5	8.816,9	93,9	1,98	1,33	2,64

Tab. 2A – *Tabella riassuntiva delle prove di point load effettuate su campioni di gneiss provenienti dallo scavo della galleria Muro (imbocchi N – carreggiata S).*

DATA		LITOTIPO			Geomeccanica e/o Galleria									
21/09/2008		Gneiss			Muro imb. N - canna S									
Campione	Tipo	Stratificazione	W ₁	W ₂	W	Distanza	D/W	Test	P	De ²	De	Is	F	Is(50)
			(mm)	(mm)	(mm)	(mm)			0.3<D/W<1.0	(kN)	(mm ²) = 4 W D / π	(mm)	= P / D _e ²	= (D _e /50) ^{0.45}
L29	irregolare		102,5	118,7	110,6	58,0	0,52	OK	32,0	8.167,6	90,4	3,92	1,31	5,11
L30	irregolare		69,7	116,4	93,0	55,0	0,59	OK	7,0	6.514,4	80,7	1,07	1,24	1,33
L31	irregolare		88,3	122,9	105,6	84,0	0,80	OK	38,0	11.294,1	106,3	3,36	1,40	4,72
L32	irregolare		108,6	97,2	102,9	93,5	0,91	OK	34,0	12.250,0	110,7	2,78	1,43	3,97
L33	irregolare		134,3	75,8	105,1	75,0	0,71	OK	10,0	10.031,5	100,2	1,00	1,37	1,36
L34	irregolare		63,6	116,3	90,0	52,5	0,58	OK	20,0	6.012,7	77,5	3,33	1,22	4,05
L35	irregolare		67,5	100,5	84,0	53,0	0,63	OK	36,0	5.668,5	75,3	6,35	1,20	7,64
L36	irregolare		93,9	111,4	102,6	57,0	0,56	OK	24,0	7.448,0	86,3	3,22	1,28	4,12
L37	irregolare		63,5	99,2	81,3	57,0	0,70	OK	6,0	5.902,1	76,8	1,02	1,21	1,23
L38	irregolare		63,4	87,0	75,2	50,0	0,66	OK	22,5	4.787,4	69,2	4,70	1,16	5,44
L39	irregolare		75,5	87,1	81,3	46,5	0,57	OK	6,5	4.813,4	69,4	1,35	1,16	1,56
L40	irregolare		90,5	95,1	92,8	73,5	0,79	OK	10,5	8.684,5	93,2	1,21	1,32	1,60
L41	irregolare		86,8	118,2	102,5	76,0	0,74	OK	22,0	9.918,5	99,6	2,22	1,36	3,02
L42	irregolare		84,1	69,0	76,6	57,5	0,75	OK	5,5	5.604,3	74,9	0,98	1,20	1,18
L43	irregolare		63,4	79,5	71,5	50,0	0,70	OK	22,0	4.548,6	67,4	4,84	1,14	5,53
L44	irregolare		80,1	116,4	98,3	43,5	0,44	OK	21,0	5.441,7	73,8	3,86	1,19	4,60
L45	irregolare		70,3	84,3	77,3	44,0	0,57	OK	20,5	4.330,5	65,8	4,73	1,13	5,36
L46	irregolare		84,5	102,2	93,4	46,0	0,49	OK	21,0	5.467,4	73,9	3,84	1,19	4,58
L47	irregolare		61,6	106,1	83,8	65,0	0,78	OK	12,0	6.937,4	83,3	1,73	1,26	2,18
L48	irregolare		95,2	74,3	84,8	47,0	0,55	OK	12,0	5.071,6	71,2	2,37	1,17	2,77
L49	irregolare		80,3	101,7	91,0	40,0	0,44	OK	6,0	4.634,6	68,1	1,29	1,15	1,49
L50	irregolare		87,7	117,1	102,4	43,5	0,42	OK	14,5	5.671,5	75,3	2,56	1,20	3,07
L51	irregolare		67,7	83,0	75,4	57,0	0,76	OK	19,0	5.468,5	73,9	3,47	1,19	4,14
L52	irregolare		89,2	96,1	92,7	64,5	0,70	OK	11,0	7.608,8	87,2	1,45	1,28	1,86
L53	irregolare		60,8	90,7	75,8	33,0	0,44	OK	7,0	3.182,8	56,4	2,20	1,06	2,32
L54	irregolare		88,5	107,5	98,0	46,0	0,47	OK	26,0	5.738,3	75,8	4,53	1,21	5,46
L55	irregolare		67,6	117,4	92,5	45,0	0,49	OK	31,0	5.299,9	72,8	5,85	1,18	6,93
L56	irregolare		104,3	118,4	111,3	61,0	0,55	OK	9,0	8.646,3	93,0	1,04	1,32	1,38

Tab. 2B – Tabella riassuntiva delle prove di point load effettuate su campioni di gneiss provenienti dallo scavo della galleria Muro (imbocchi N – carreggiata S).

DATA		LITOTIPO			Geomeccanica e/o Galleria									
21/09/2008		Gneiss			San_Giovanni_imb_SUD									
Campione	Tipo	Stratificazione	W ₁	W ₂	W	Distanza	D/W	Test	P	De ²	De	Is	F	Is(50)
			(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		0.3<D/W<1.0	(kN)	(mm ²)	(mm)	= P / D _e ²	= (D _e /50) ^{0.45}	= F I _s
H1	irregolare		98,0	120,3	109,2	49,5	0,45	OK	15,0	6.879,2	82,9	2,18	1,26	2,74
H2	irregolare		102,5	134,5	118,5	72,5	0,61	OK	21,0	10.938,7	104,6	1,92	1,39	2,68
H3	irregolare		134,4	73,8	104,1	63,0	0,61	OK	23,0	8.350,3	91,4	2,75	1,31	3,61
H4	irregolare		92,4	124,5	108,5	61,0	0,56	OK	23,5	8.423,1	91,8	2,79	1,31	3,67
H5	irregolare		78,5	87,7	83,1	61,0	0,73	OK	30,5	6.454,2	80,3	4,73	1,24	5,85
H6	irregolare		91,3	102,6	97,0	47,5	0,49	OK	20,0	5.863,4	76,6	3,41	1,21	4,13
H7	irregolare		90,8	128,3	109,6	52,0	0,47	OK	21,0	7.253,1	85,2	2,90	1,27	3,68
H8	irregolare		76,6	75,6	76,1	74,5	0,98	OK	7,0	7.218,6	85,0	0,97	1,27	1,23
H9	irregolare		65,8	94,5	80,2	46,0	0,57	OK	5,5	4.694,3	68,5	1,17	1,15	1,35
H10	irregolare		87,5	82,7	85,1	65,0	0,76	OK	29,0	7.042,9	83,9	4,12	1,26	5,20
H11	irregolare		98,9	107,1	103,0	62,0	0,60	OK	19,5	8.130,9	90,2	2,40	1,30	3,13
H12	irregolare		63,0	99,5	81,3	47,0	0,58	OK	9,0	4.862,2	69,7	1,85	1,16	2,15
H13	irregolare		82,4	113,3	97,9	61,0	0,62	OK	8,5	7.599,8	87,2	1,12	1,28	1,44
H14	irregolare		83,1	113,4	98,3	74,5	0,76	OK	20,0	9.319,6	96,5	2,15	1,34	2,89
H15	irregolare		76,8	84,5	80,7	50,0	0,62	OK	2,4	5.134,3	71,7	0,47	1,18	0,55
H16	irregolare		95,4	115,7	105,6	80,5	0,76	OK	30,0	10.818,4	104,0	2,77	1,39	3,86
H17	irregolare		85,6	84,9	85,3	56,0	0,66	OK	24,0	6.078,4	78,0	3,95	1,22	4,82
H18	irregolare		82,3	88,3	85,3	54,0	0,63	OK	30,5	5.864,8	76,6	5,20	1,21	6,30
H19	irregolare		94,3	71,1	82,7	58,5	0,71	OK	15,0	6.158,0	78,5	2,44	1,22	2,98
H20	irregolare		80,9	112,2	96,6	58,0	0,60	OK	23,5	7.130,0	84,4	3,30	1,27	4,17
H21	irregolare		84,4	133,4	108,9	51,0	0,47	OK	11,0	7.071,4	84,1	1,56	1,26	1,97
H22	irregolare		82,6	99,7	91,2	71,0	0,78	OK	27,0	8.240,0	90,8	3,28	1,31	4,29
H23	irregolare		107,3	97,3	102,3	60,0	0,59	OK	7,0	7.813,2	88,4	0,90	1,29	1,16
H24	irregolare		70,1	99,4	84,8	56,0	0,66	OK	13,5	6.042,8	77,7	2,23	1,22	2,72
H25	irregolare		90,1	111,7	100,9	66,0	0,65	OK	5,5	8.476,9	92,1	0,65	1,32	0,85
H26	irregolare		93,2	75,1	84,2	73,0	0,87	OK	25,0	7.821,4	88,4	3,20	1,29	4,13
H27	irregolare		88,3	68,2	78,3	66,0	0,84	OK	15,0	6.575,6	81,1	2,28	1,24	2,84
H28	irregolare		69,2	131,2	100,2	57,0	0,57	OK	3,0	7.272,0	85,3	0,41	1,27	0,52

Tab. 3A – Tabella riassuntiva delle prove di point load effettuate su campioni di gneiss provenienti dallo scavo della galleria San Giovanni (imbocchi S – carreggiata N).

DATA		LITOTIPO			Geomeccanica e/o Galleria									
21/09/2008		Gneiss			San_Giovanni_imb_SUD									
Campione	Tipo	Stratificazione	W ₁	W ₂	W	Distanza	D/W	Test	P	De ²	De	Is	F	Is(50)
			(mm)	(mm)	(mm)	(mm)		0.3<D/W<1.0	(kN)	(mm ²)	(mm)	= P / D _s ²	= (D _s /50) ^{0.45}	= F I _s
H29	irregolare		82,8	81,7	82,3	50,0	0,61	OK	6,0	5.236,2	72,4	1,15	1,18	1,35
H30	irregolare		111,1	81,8	96,5	45,0	0,47	OK	12,0	5.526,2	74,3	2,17	1,20	2,60
H31	irregolare		102,9	111,6	107,3	69,0	0,64	OK	17,5	9.422,3	97,1	1,86	1,35	2,50
H32	irregolare		99,4	97,4	98,4	55,0	0,56	OK	24,0	6.889,0	83,0	3,48	1,26	4,38
H33	irregolare		94,2	109,3	101,8	52,0	0,51	OK	8,0	6.736,7	82,1	1,19	1,25	1,48
H34	irregolare		84,0	87,1	85,6	57,0	0,67	OK	2,0	6.208,8	78,8	0,32	1,23	0,40
H35	irregolare		67,6	95,5	81,6	55,0	0,67	OK	11,0	5.710,8	75,6	1,93	1,20	2,32
H36	irregolare		79,6	83,0	81,3	63,0	0,77	OK	5,4	6.521,4	80,8	0,83	1,24	1,03
H37	irregolare		83,7	134,5	109,1	51,0	0,47	OK	23,0	7.084,4	84,2	3,25	1,26	4,10
H38	irregolare		86,8	104,2	95,5	62,0	0,65	OK	7,5	7.538,9	86,8	0,99	1,28	1,28
H39	irregolare		74,8	129,5	102,1	47,5	0,47	OK	15,0	6.176,4	78,6	2,43	1,23	2,98
H40	irregolare		103,2	95,2	99,2	67,0	0,68	OK	7,0	8.462,5	92,0	0,83	1,32	1,09
H41	irregolare		107,6	82,3	95,0	64,0	0,67	OK	9,0	7.737,2	88,0	1,16	1,29	1,50
H42	irregolare		100,5	133,7	117,1	66,0	0,56	OK	24,0	9.840,4	99,2	2,44	1,36	3,32
H43	irregolare		131,9	83,6	107,8	49,0	0,45	OK	13,0	6.722,4	82,0	1,93	1,25	2,42
H44	irregolare		83,8	121,3	102,6	62,0	0,60	OK	39,0	8.095,4	90,0	4,82	1,30	6,28
H45	irregolare		74,3	91,1	82,7	41,0	0,50	OK	15,0	4.317,2	65,7	3,47	1,13	3,93
H46	irregolare		92,9	72,7	82,8	56,0	0,68	OK	17,5	5.902,0	76,8	2,97	1,21	3,60
H47	irregolare		100,5	104,9	102,7	45,0	0,44	OK	29,5	5.882,8	76,7	5,01	1,21	6,08
H48	irregolare		85,2	110,2	97,7	71,0	0,73	OK	11,0	8.832,1	94,0	1,25	1,33	1,65
H49	irregolare		78,8	112,2	95,5	57,0	0,60	OK	38,0	6.930,9	83,3	5,48	1,26	6,90
H50	irregolare		83,8	87,2	85,5	46,0	0,54	OK	21,0	5.007,7	70,8	4,19	1,17	4,90
H51	irregolare		79,7	123,9	101,8	65,0	0,64	OK	29,0	8.423,0	91,8	3,44	1,31	4,53
H52	irregolare		76,9	101,2	89,1	53,0	0,60	OK	12,0	6.009,2	77,5	2,00	1,22	2,43
H53	irregolare		82,3	86,2	84,3	67,0	0,80	OK	8,0	7.187,1	84,8	1,11	1,27	1,41
H54	irregolare		116,1	62,5	89,3	47,0	0,53	OK	29,0	5.343,9	73,1	5,43	1,19	6,44
H55	irregolare		83,4	110,3	96,8	71,0	0,73	OK	17,0	8.753,0	93,6	1,94	1,33	2,57

Tab. 3B – Tabella riassuntiva delle prove di point load effettuate su campioni di gneiss provenienti dallo scavo della galleria San Giovanni (imbocchi S – carreggiata N).

DATA		LITOTIPO			Geomeccanica e/o Galleria									
24/09/2008		Gneiss			Brancato_imb_SUD									
Campione	Tipo	Stratificazione	W ₁	W ₂	W	Distanza	D/W	Test	P	De ²	De	Is	F	Is(50)
			(mm)	(mm)	(mm)	(mm)			0.3<D/W<1.0	(kN)	(mm ²)	(mm)		
										= 4 W D / π		= P / D _e ²	= (D _e /50) ^{0.45}	= F I _s
M1	irregolare		74,9	118,1	96,5	45,5	0,47	OK	18	5.590,477	74,769	3,22	1,20	3,86
M2	irregolare		80,9	112,9	96,9	44,0	0,45	OK	13	5.427,184	73,669	2,40	1,19	2,85
M3	irregolare		84,0	102,7	52,0	42,0	0,81	OK	10,5	2.780,755	52,733	3,78	1,02	3,87
M4	irregolare		87,4	84,1	85,8	51,0	0,59	OK	10	5.568,195	74,620	1,80	1,20	2,15
M5	irregolare		79,8	68,4	74,1	48,0	0,65	OK	11	4.528,658	67,295	2,43	1,14	2,78
M6	irregolare		80,1	106,8	93,5	49,0	0,52	OK	6	5.830,228	76,356	1,03	1,21	1,25
M7	irregolare		75,5	93,2	84,4	54,0	0,64	OK	13	5.799,479	76,154	2,24	1,21	2,71
M8	irregolare		74,8	83,1	78,9	61,0	0,77	OK	5,6	6.129,916	78,294	0,91	1,22	1,12
M9	irregolare		69,8	89,3	79,6	58,0	0,73	OK	6,5	5.874,600	76,646	1,11	1,21	1,34
M10	irregolare		67,8	92,5	80,2	47,0	0,59	OK	7	4.796,357	69,256	1,46	1,16	1,69
M11	irregolare		71,3	123,3	97,3	48,5	0,50	OK	21	6.006,937	77,504	3,50	1,22	4,26
M12	irregolare		77,4	75,9	76,7	47,0	0,61	OK	32	4.586,909	67,727	6,98	1,15	8,00
M13	irregolare		78,5	89,5	84,0	46,0	0,55	OK	18	4.919,798	70,141	3,66	1,16	4,26
M14	irregolare		69,1	98,3	78,0	46,0	0,59	OK	6	4.568,383	67,590	1,31	1,15	1,50
M15	irregolare		89,3	96,5	73,0	46,0	0,63	OK	34	4.275,538	65,388	7,95	1,13	8,97
M16	irregolare		83,5	99,7	82,5	39,5	0,48	OK	6	4.149,169	64,414	1,45	1,12	1,62
M17	irregolare		70,0	98,3	82,5	44,0	0,53	OK	9	4.621,860	67,984	1,95	1,15	2,24
M18	irregolare		112,9	52,7	73,0	48,5	0,66	OK	7	4.507,905	67,141	1,55	1,14	1,77
M19	irregolare		86,7	92,6	72,0	41,0	0,57	OK	18	3.758,603	61,307	4,79	1,10	5,25
M20	irregolare		98,3	89,4	93,9	37,0	0,39	OK	19	4.421,261	66,493	4,30	1,14	4,89
M21	irregolare		106,5	85,0	95,8	42,0	0,44	OK	7	5.120,333	71,557	1,37	1,18	1,61
M22	irregolare		71,2	115,5	42,0	32,0	0,76	OK	15	1.711,234	41,367	8,77	0,92	8,05
M23	irregolare		71,2	125,3	36,0	46,0	1,28	NO	1,6	2.108,485	45,918	0,76	0,96	0,73
M24	irregolare		52,8	51,0	42,0	42,0	1,00	OK	6	2.245,995	47,392	2,67	0,98	2,61
M25	irregolare		97,4	127,4	112,4	56,0	0,50	OK	18	8.014,279	89,523	2,25	1,30	2,92
M26	irregolare		85,7	99,5	92,6	57,0	0,62	OK	25	6.720,413	81,978	3,72	1,25	4,65
M27	irregolare		109,5	105,8	107,7	35,0	0,33	OK	4,3	4.797,248	69,262	0,90	1,16	1,04
M28	irregolare		75,8	109,5	92,7	47,0	0,51	OK	20,5	5.544,385	74,461	3,70	1,20	4,42

Tab. 4A – *Tabella riassuntiva delle prove di point load effettuate su campioni di gneiss provenienti dallo scavo della galleria Brancato (imbocchi S – carreggiata N).*

DATA		LITOTIPO			Geomeccanica e/o Galleria									
24/09/2008		Gneiss			Brancato_imb_SUD									
Campione	Tipo	Stratificazione	W ₁	W ₂	W	Distanza	D/W	Test	P	De ²	De	Is	F	Is(50)
			(mm)	(mm)	(mm)	(mm)			0.3<D/W<1.0	(kN)	(mm ²)	(mm)	= P / D _s ²	= (D _s /50) ^{0.45}
M29	irregolare		75,1	120,4	97,8	45,0	0,46	OK	22,5	5.600,662	74,838	4,02	1,20	4,82
M30	irregolare		64,3	102,2	83,3	51,5	0,62	OK	3,1	5.458,855	73,884	0,57	1,19	0,68
M31	irregolare		89,3	92,6	91,0	55,0	0,60	OK	39	6.369,063	79,806	6,12	1,23	7,56
M32	irregolare		85,2	128,1	106,7	60,0	0,56	OK	11	8.147,460	90,263	1,35	1,30	1,76
M33	irregolare		67,3	111,8	89,6	42,0	0,47	OK	24	4.788,781	69,201	5,01	1,16	5,80
M34	irregolare		73,2	101,3	87,3	59,0	0,68	OK	23,5	6.554,319	80,959	3,59	1,24	4,45
M35	irregolare		80,3	115,2	97,8	63,0	0,64	OK	18,5	7.840,927	88,549	2,36	1,29	3,05
M36	irregolare		82,9	88,9	85,9	53,0	0,62	OK	23	5.796,678	76,136	3,97	1,21	4,79
M37	irregolare		86,9	99,6	93,3	63,0	0,68	OK	10	7.479,964	86,487	1,34	1,28	1,71
M38	irregolare		99,2	102,2	100,7	40,0	0,40	OK	3,7	5.128,609	71,614	0,72	1,18	0,85
M39	irregolare		77,1	101,4	89,3	43,0	0,48	OK	10	4.886,375	69,903	2,05	1,16	2,38
M40	irregolare		80,5	62,1	71,3	64,0	0,90	OK	5	5.810,047	76,224	0,86	1,21	1,04
M41	irregolare		72,7	110,1	91,4	54,5	0,60	OK	10	6.342,388	79,639	1,58	1,23	1,94
M42	irregolare		62,1	93,7	77,9	54,0	0,69	OK	9	5.356,009	73,185	1,68	1,19	1,99
M43	irregolare		130,5	86,1	108,3	55,0	0,51	OK	27	7.584,051	87,086	3,56	1,28	4,57
M44	irregolare		90,2	102,8	96,5	58,0	0,60	OK	14	7.126,322	84,418	1,96	1,27	2,49
M45	irregolare		91,4	71,7	81,6	53,5	0,66	OK	8,5	5.555,049	74,532	1,53	1,20	1,83
M46	irregolare		83,2	108,5	95,9	41,0	0,43	OK	20	5.003,640	70,736	4,00	1,17	4,67
M47	irregolare		68,8	84,1	76,5	62,0	0,81	OK	45	6.035,028	77,685	7,46	1,22	9,09
M48	irregolare		84,5	104,5	94,5	36,0	0,38	OK	5,6	4.331,561	65,815	1,29	1,13	1,46
M49	irregolare		63,5	88,1	75,8	57,0	0,75	OK	17	5.501,159	74,170	3,09	1,19	3,69
M50	irregolare		54,7	108,3	81,5	54,5	0,67	OK	7,5	5.655,412	75,202	1,33	1,20	1,59
M51	irregolare		55,4	98,3	76,9	60,5	0,79	OK	4,7	5.919,832	76,940	0,79	1,21	0,96
M52	irregolare		87,4	109,0	98,2	58,0	0,59	OK	7	7.251,863	85,158	0,97	1,27	1,23
M53	irregolare		100,8	98,5	99,7	50,0	0,50	OK	12,5	6.343,916	79,649	1,97	1,23	2,43
M54	irregolare		77,1	100,3	88,7	33,0	0,37	OK	9	3.726,899	61,048	2,41	1,09	2,64
M55	irregolare		89,0	98,0	93,5	51,0	0,55	OK	33	6.071,443	77,919	5,44	1,22	6,64

Tab. 4B – Tabella riassuntiva delle prove di point load effettuate su campioni di gneiss provenienti dallo scavo della galleria Brancato (imbocchi S – carreggiata N).

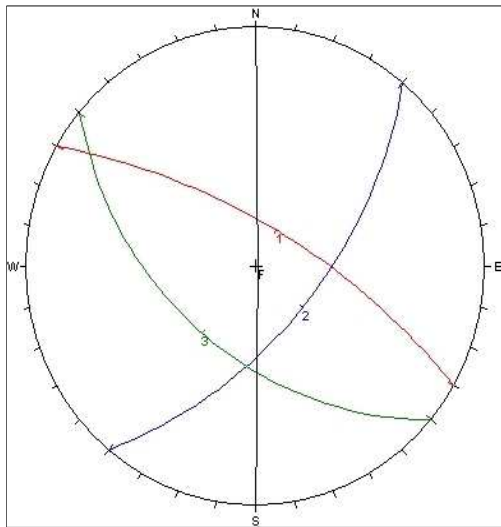
APPENDICE 2

SCHEDE GEOMECCANICHE DI SINTESI DEI 144 RILIEVI SU AFFIORAMENTI IN SUPERFICIE

D 1	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4233894,2140
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	565439,8783
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	232

J_{vH}	17,1
J_{vV}	14,4
J_{vo}	12,4
J_v	14,6
I_b (cm)	12,7

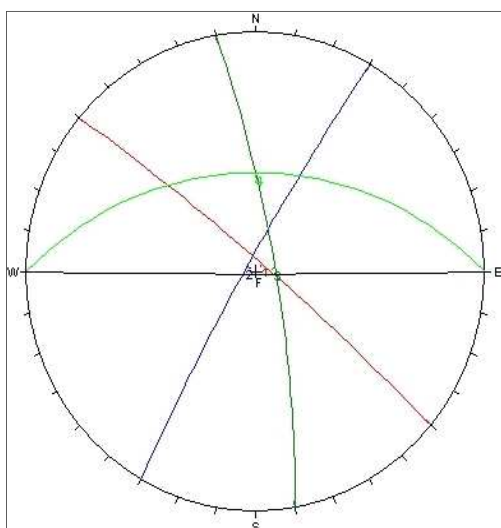
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	S _{media} (cm)	Q _c (MPa)
1	30	70	11	11,9	36
2	130	60	14	10,5	50
3	220	50	8	15,7	80
4					
Fronte	90	89			



D 2	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4234252,0626
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	566017,4447
	Area stendimento	(4 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	280

J_{vH}	7,2
J_{vV}	3,7
J_{vo}	6,0
J_v	5,6
I_b (cm)	17,3

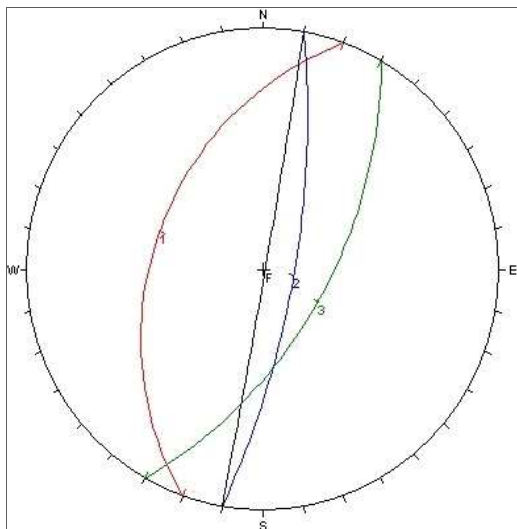
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	S _{media} (cm)	Q _c (MPa)
1	40	85	15	21,9	115
2	300	85	11	32,2	240
3	80	80	10	16,6	75
4	360	45	12	13,4	35
Fronte	180	89			



D 3	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4234188,7945
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	565682,7218
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	265

J_{vH}	15,2
J_{vV}	13,8
J_{vO}	13,6
J_v	14,2
I_b (cm)	12,2

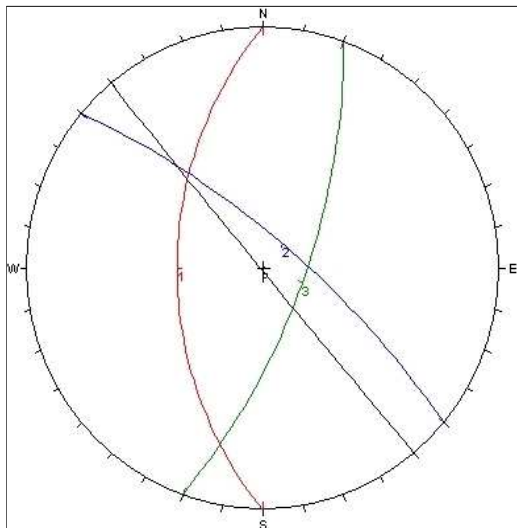
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	S _{media} (cm)	Q _c (MPa)
1	290	40	7	15,7	50
2	100	75	11	10,1	21
3	120	60	8	10,7	33
4					
Fronte	100	89			



D 4	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4234230,9191
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	566077,4691
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	285

J_{vH}	18,8
J_{vV}	6,7
J_{vO}	19,6
J_v	12,4
I_b (cm)	18,3

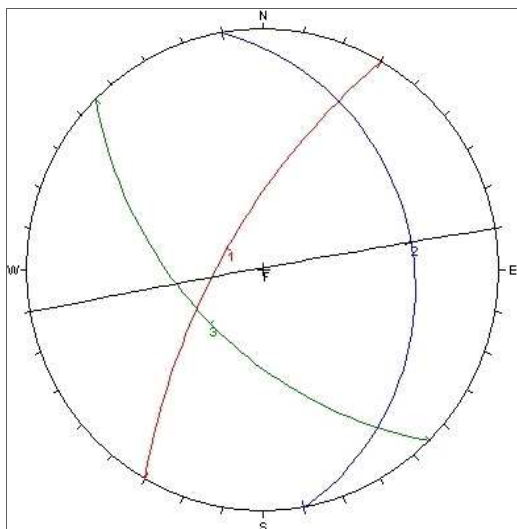
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	S _{media} (cm)	Q _c (MPa)
1	270	50	5	17,1	130
2	40	75	12	13,5	
3	110	70	7	24,3	
4					
Fronte	230	89			



D 5	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4237375,4399
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	571965,5684
	Area stendimento	(3 x 1,5) m ²	Quota (m s.l.m.)	527

J_{vH}	13,5
J_{vV}	14,0
J_{vO}	12,3
J_v	13,3
I_b (cm)	13,2

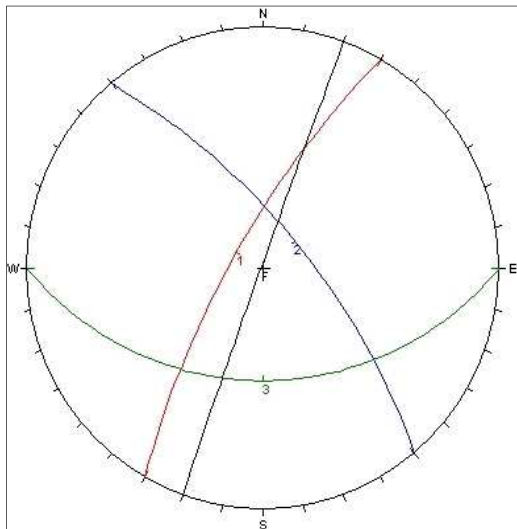
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	S _{media} (cm)	Qc (MPa)
1	300	70	18	9,9	51
2	80	25	6	17,3	26
3	225	55	9	12,2	27
4					
Fronte	350	89			



D 6	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4237572,4862
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	571884,8683
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	515

J_{vH}	17,5
J_{vV}	18,0
J_{vO}	22,4
J_v	19,3
I_b (cm)	10,9

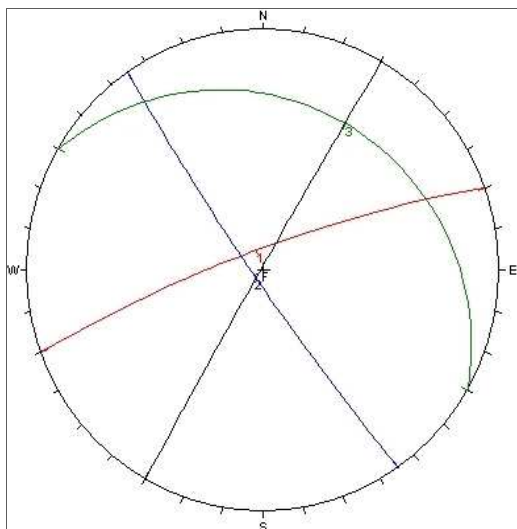
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	S _{media} (cm)	Qc (MPa)
1	300	70	18	9,3	90
2	50	70	7	11,1	66
3	180	40	8	12,4	33
4					
Fronte	290	89			



D 7	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4237613,9126
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	571906,2140
	Area stendimento	(2,5 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	490

J_{vH}	11,8
J_{vV}	8,4
J_{vO}	13,7
J_v	11,3
lb (cm)	9,8

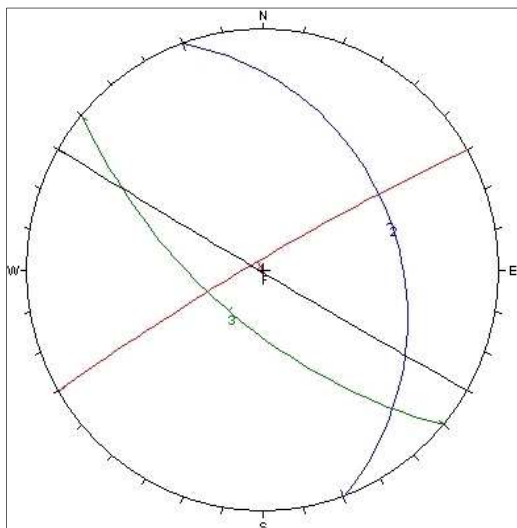
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	S _{media} (cm)	Q _c (MPa)
1	340	80	18	9,4	113
2	235	85	9	8,3	109
3	30	20	12	11,7	55
4					
Fronte	300	89			



D 8	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4235247,6254
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	568615,1790
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	564

J_{vH}	20,7
J_{vV}	16,9
J_{vO}	16,8
J_v	18,1
lb (cm)	8,6

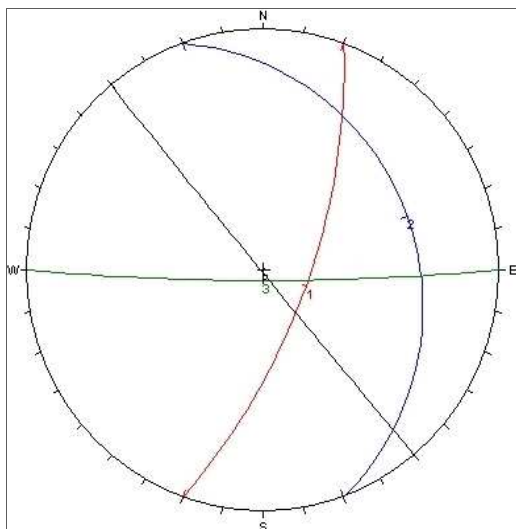
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	S _{media} (cm)	Q _c (MPa)
1	330	85	19	14,5	23
2	70	30	14	7,6	28
3	220	65	9	7,3	22
4					
Fronte	210	89			



D 9	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4235285,0098
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	568570,9150
	Area stendimento	(3 x 1,5) m ²	Quota (m s.l.m.)	510

J_{vH}	15,5
J_{vV}	10,0
J_{vO}	13,2
J_v	12,9
lb (cm)	14,0

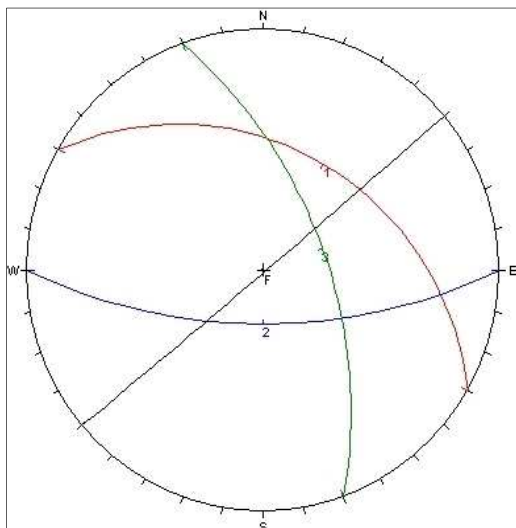
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	110	68	11	11,4	150
2	70	24	5	19,0	101
3	180	85	15	11,5	85
4					
Fronte	230	89			



D 10	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4235422,9441
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	568483,5652
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	480

J_{vH}	20,2
J_{vV}	25,6
J_{vO}	30,0
J_v	20,2
lb (cm)	12,8

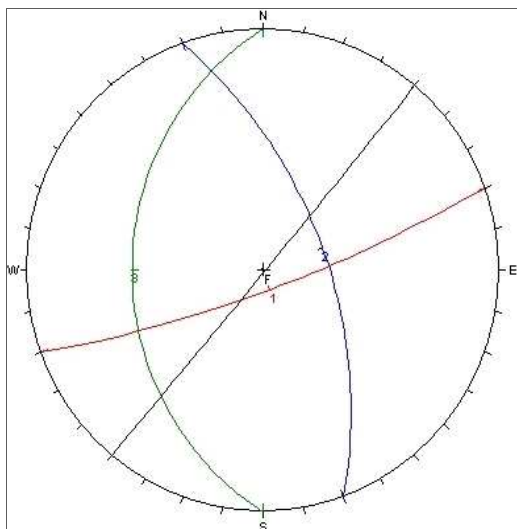
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	30	36	8	11,1	25
2	180	65	9	17,8	16
3	70	60	9	9,4	14
4					
Fronte	140	89			



D 12	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4235361,6532
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	568686,1126
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	440

J_{vH}	16,8
J_{vV}	12,2
J_{vO}	16,0
J_v	15,0
I_b (cm)	13,8

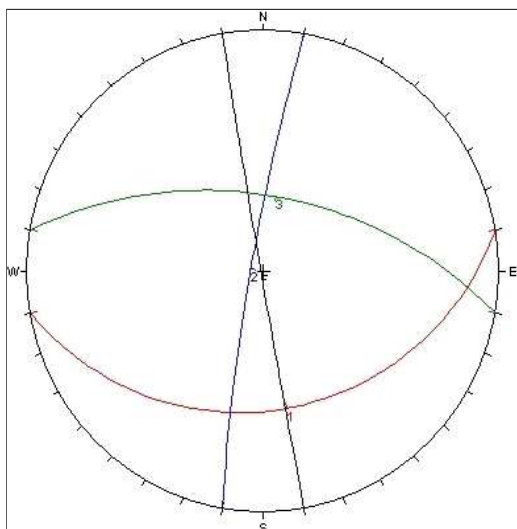
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	S _{media} (cm)	Q _c (MPa)
1	160	80	13	8,5	75
2	70	60	7	11,5	69
3	270	32	6	21,4	63
4					
Fronte	130	89			



D 13	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4235922,5999
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	568821,6836
	Area stendimento	(3 x 1,5) m ²	Quota (m s.l.m.)	375

J_{vH}	20,7
J_{vV}	20,9
J_{vO}	20,3
J_v	20,6
I_b (cm)	10,8

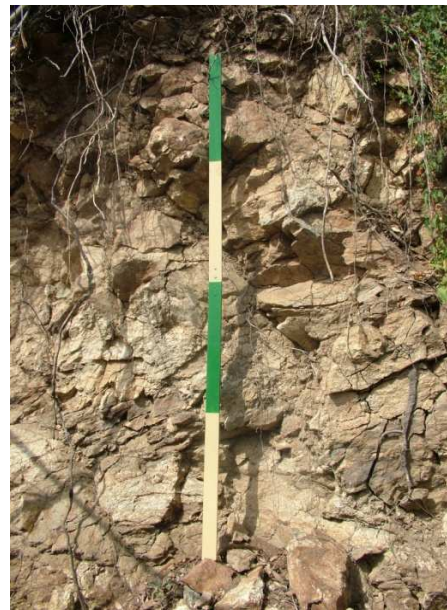
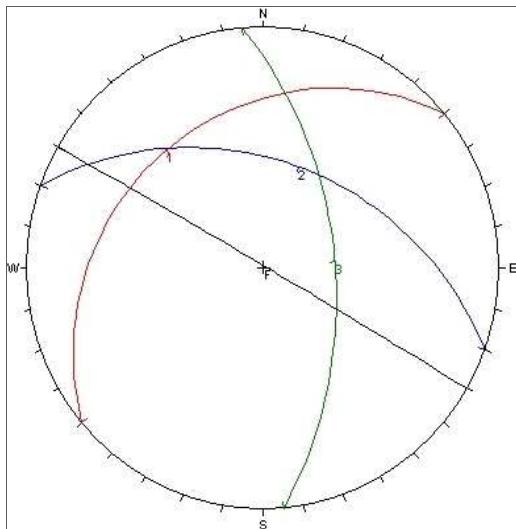
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	S _{media} (cm)	Q _c (MPa)
1	170	30	14	15,9	46
2	280	84	13	8,0	121
3	10	55	15	8,6	80
4					
Fronte	260	89			



D 14	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4236269,9333
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	570731,4331
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	455

J_{vH}	29,0
J_{vV}	29,3
J_{vO}	32,0
J_v	30,1
lb (cm)	7,9

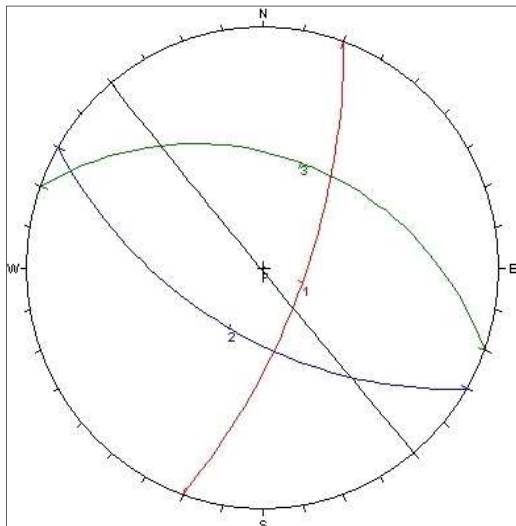
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	S _{media} (cm)	Q _c (MPa)
1	320	25	7	8,0	20
2	20	42	13	6,4	21
3	85	56	9	9,1	
4					
Fronte	30	89			



D 15	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4236288,4820
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	570699,9860
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	440

J_{vH}	20,5
J_{vV}	12,7
J_{vO}	19,5
J_v	17,6
lb (cm)	11,6

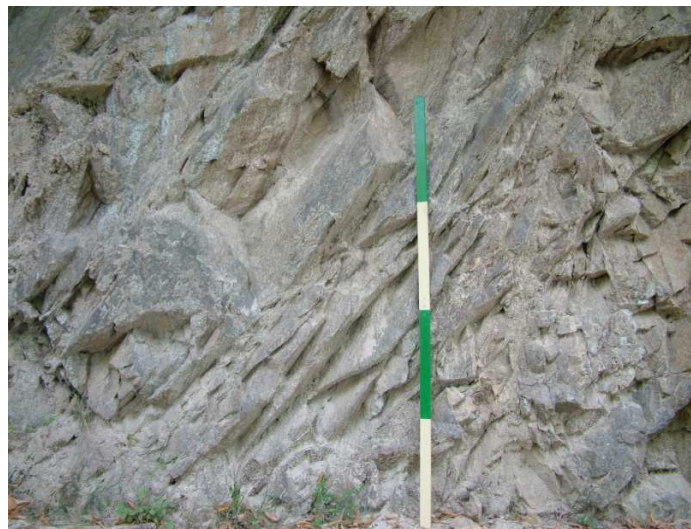
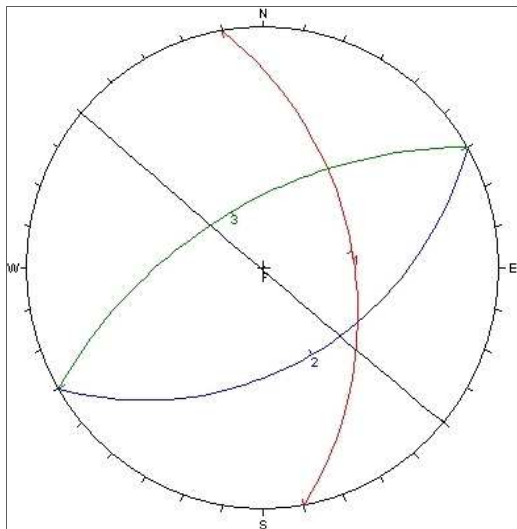
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	S _{media} (cm)	Q _c (MPa)
1	110	70	12	12,6	133
2	210	58	11	9,1	75
3	20	40	8	13,0	
4					
Fronte	230	89			



D 16	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4236137,8048
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	569640,6423
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	495

J_{vH}	17,5
J_{vV}	15,8
J_{vO}	19,4
J_v	17,6
lb (cm)	11,6

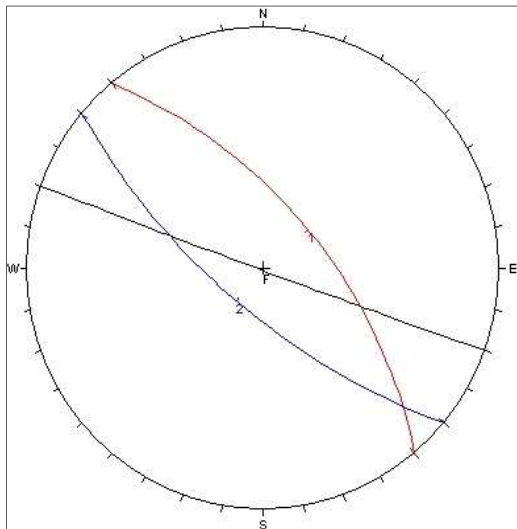
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	S _{media} (cm)	Qc (MPa)
1	80	48	15	9,1	94
2	150	45	10	11,3	90
3	330	60	10	14,4	70
4					
Fronte	220	89			



D 17	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4236250,6441
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	569323,0553
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	385

J_{vH}	19,7
J_{vV}	15,7
J_{vO}	22,2
J_v	19,2
lb (cm)	8,0

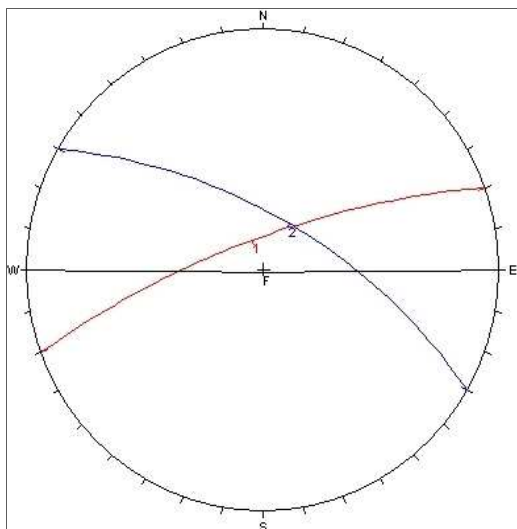
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	S _{media} (cm)	Qc (MPa)
1	50	62	11	7,2	66
2	220	70	7	8,8	66
3					
4					
Fronte	200	89			



D 18	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4237225,8124
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	571425,8617
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	482

J_{vH}	13,3
J_{vV}	14,7
J_{vO}	12,0
J_v	13,3
I_b (cm)	17,0

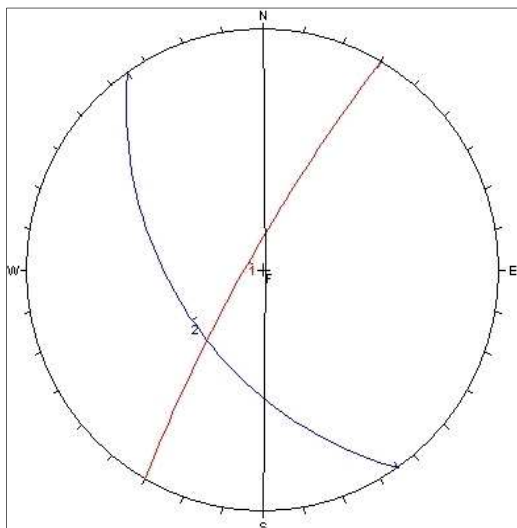
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	S _{media} (cm)	Q _c (MPa)
1	340	75	5	14,4	53
2	30	65	5	19,6	42
3					
4					
Fronte	180	89			



D 19	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4235112,8128
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	568184,4922
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	320

J_{vH}	8,7
J_{vV}	10,4
J_{vO}	14,1
J_v	11,1
I_b (cm)	7,5

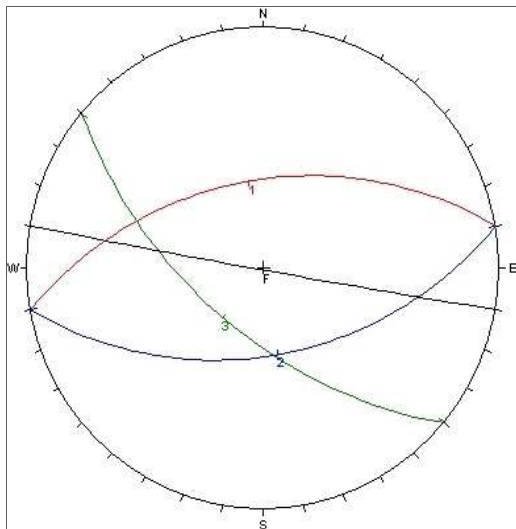
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	S _{media} (cm)	Q _c (MPa)
1	300	82	9	9,9	25
2	235	50	9	5,1	20
3					
4					
Fronte	90	89			



D 20	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4234180,3420
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	565767,3735
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	300

J_{vH}	27,8
J_{vV}	23,6
J_{vO}	24,2
J_v	25,2
lb (cm)	10,3

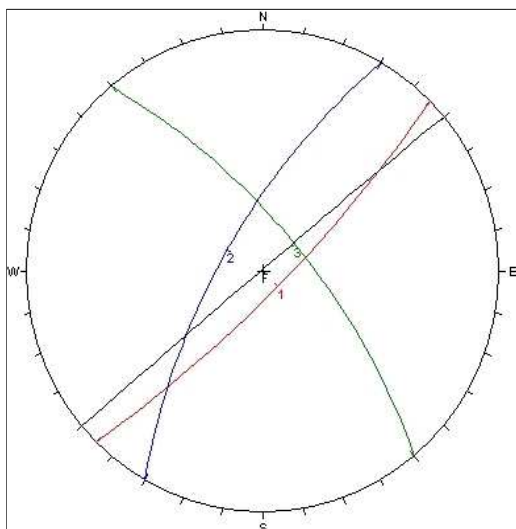
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	350	50	6	8,4	22
2	170	50	8	12,3	18
3	220	60	8	10,1	
4					
Fronte	190	89			



D 21	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4232499,8200
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	564442,2734
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	585

J_{vH}	26,5
J_{vV}	24,7
J_{vO}	27,3
J_v	26,2
lb (cm)	9,2

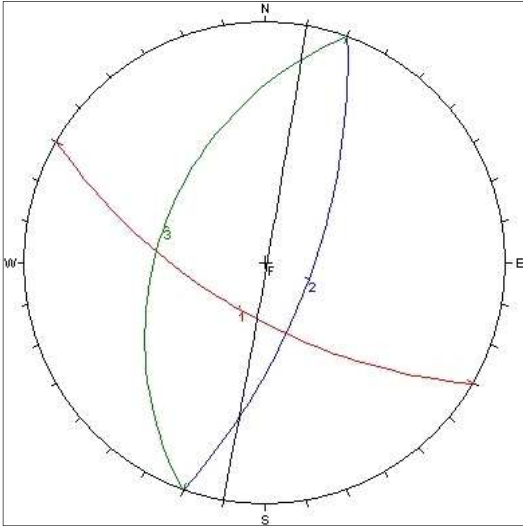
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	135	80	16	10,8	53
2	300	70	8	9,6	26
3	50	70	10	7,3	60
4					
Fronte	320	89			



D 22	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4235220,1266
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	568301,4205
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	395

J_{vH}	17,3
J_{vV}	14,0
J_{vO}	19,2
J_v	16,9
I_b (cm)	11,8

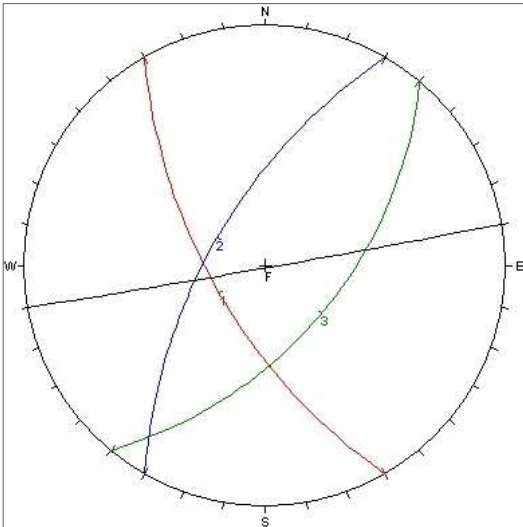
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	210	65	7	16,2	34
2	110	68	11	7,8	23
3	290	42	8	11,3	40
4					
Fronte	100	89			



D 23	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4235462,9753
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	568332,6014
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	440

J_{vH}	27,5
J_{vV}	21,6
J_{vO}	23,8
J_v	24,9
I_b (cm)	13,3

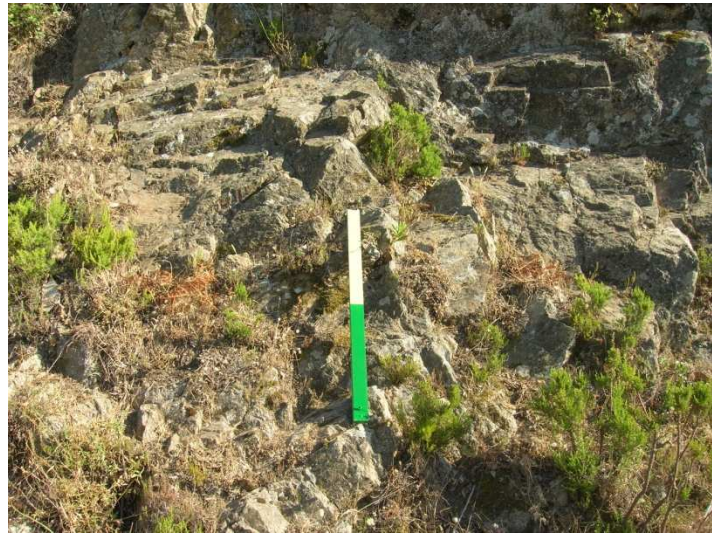
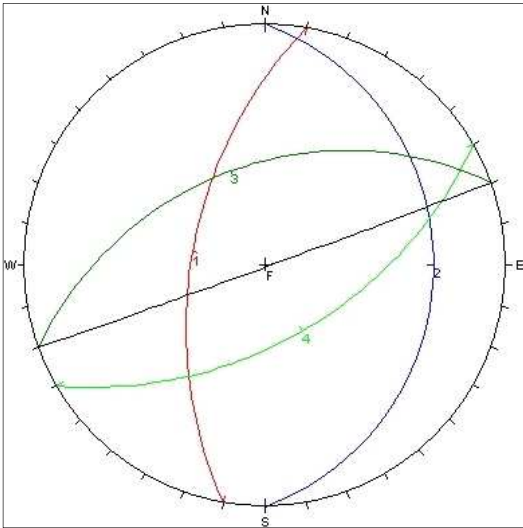
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	240	65	12	9,6	24
2	300	64	11	10,1	25
3	130	56	9	20,3	
4					
Fronte	170	89			



D 24	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4235433,6487
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	568451,8644
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	460

N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	280	56	6	11,2	40
2	90	20	9	13,1	34
3	340	45	7	6,8	40
4	150	55	8	9,6	21
Fronte	160	89			

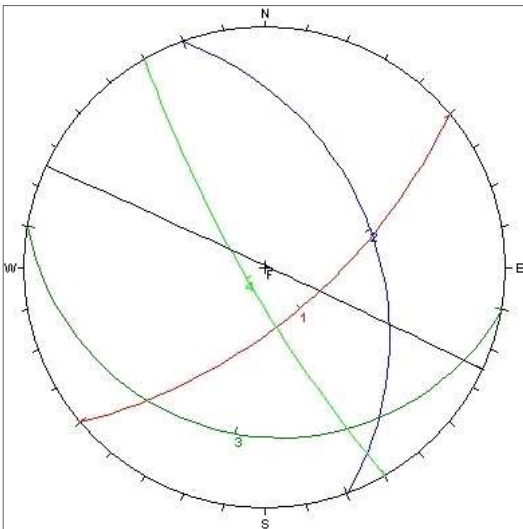
J_{vH}	14,5
J_{vV}	12,4
J_{vO}	13,0
J_v	13,3
I_b (cm)	9,2



D 25	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4233505,2437
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	567011,1850
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	400

N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	140	65	18	5,6	40
2	70	40	11	8,7	59
3	190	20	14	10,9	91
4	240	80	8	12,3	63
Fronte	25	89			

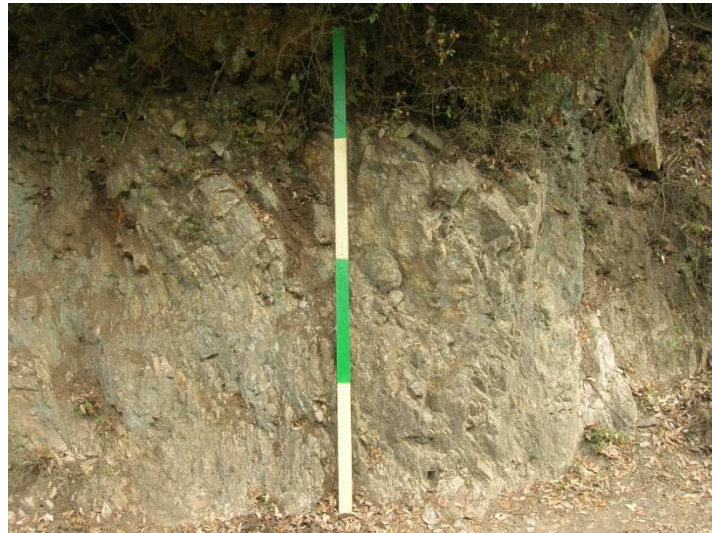
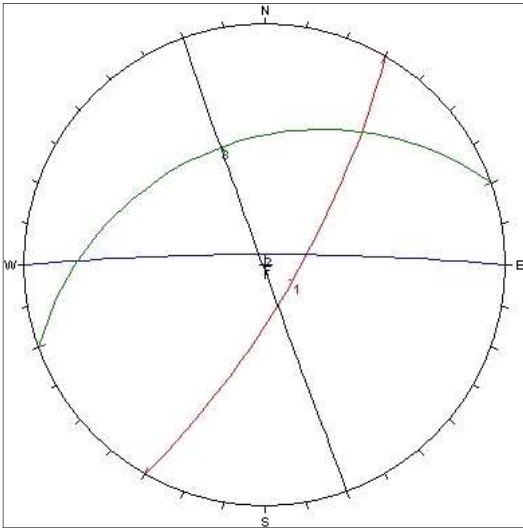
J_{vH}	19,5
J_{vV}	8,7
J_{vO}	16,1
J_v	14,8
I_b (cm)	8,4



D 26	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4232865,6902
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	564870,7102
	Area stendimento	(3 x 1,5) m ²	Quota (m s.l.m.)	590

J_{vH}	23,5
J_{vV}	19,3
J_{vO}	27,8
J_v	23,6
I_b (cm)	8,8

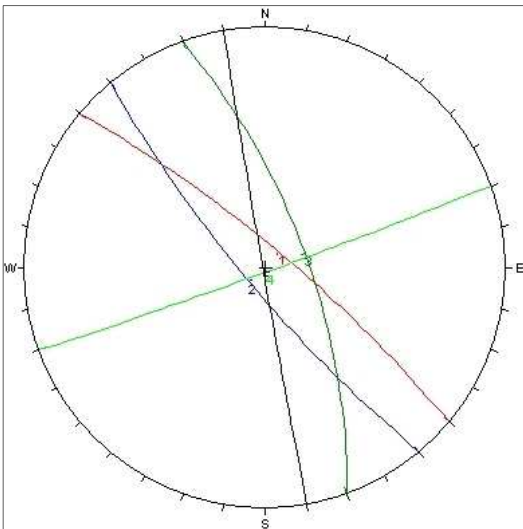
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	120	75	12	8,6	25
2	360	85	8	7,3	75
3	340	35	13	10,5	28
4					
Fronte	250	89			



D 27	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4233072,5251
	Tipo di ammasso	Int. fratturato	Longitudine	564813,1788
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	560

J_{vH}	36,3
J_{vV}	23,8
J_{vO}	31,8
J_v	30,6
I_b (cm)	5,0

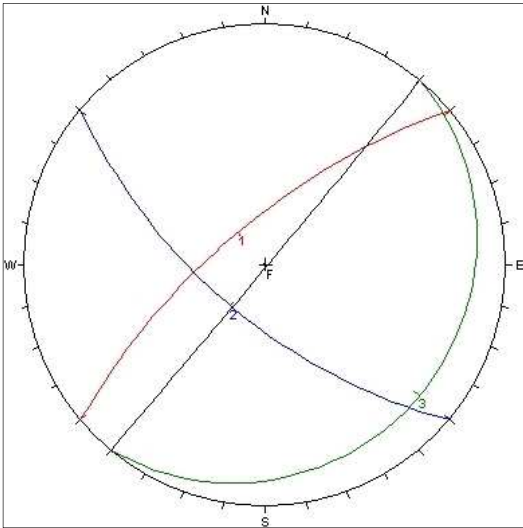
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	40	80	7	20,7	
2	230	80	8	6,3	
3	70	70	7	3,8	
4	160	88	11	5,0	
Fronte	260	89			



D 28	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4232979,1025
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	564816,7112
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	570

J_{vH}	19,7
J_{vV}	14,4
J_{vO}	17,7
J_v	17,3
I_b (cm)	8,2

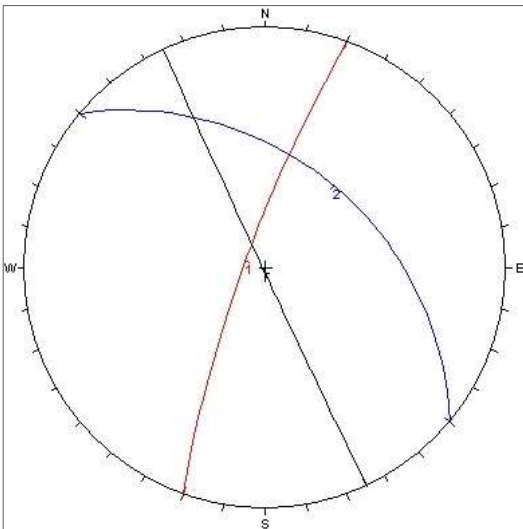
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	320	70	8	7,3	28
2	220	65	14	5,2	21
3	130	10	11	12,3	
4					
Fronte	130	89			



D 29	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4233228,4210
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	564827,1057
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	510

J_{vH}	11,2
J_{vV}	10,7
J_{vO}	11,8
J_v	11,2
I_b (cm)	13,9

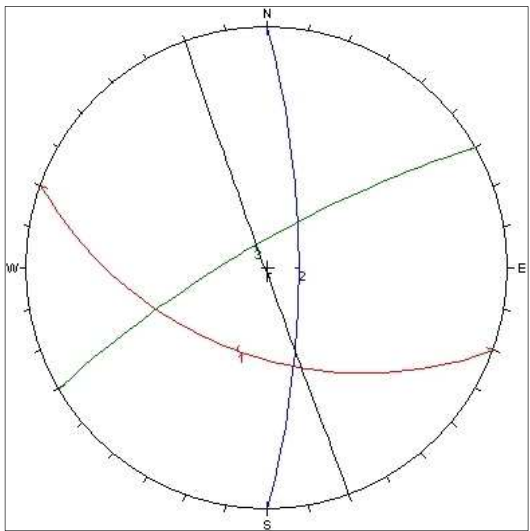
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	290	80	11	10,9	35
2	40	42	8	16,9	52
3					
4					
Fronte	245	89			



D 30	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4236180,8458
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	568318,7157
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	45

J_{vH}	19,3
J_{vV}	13,3
J_{vO}	18,6
J_v	17,1
I_b (cm)	11,4

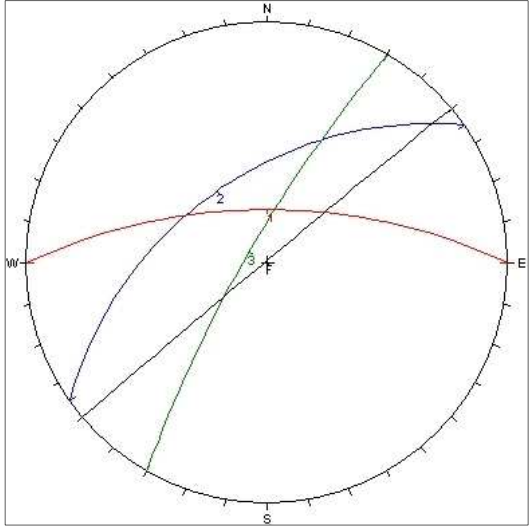
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	200	50	11	9,3	40
2	90	75	9	11,6	116
3	330	78	8	13,1	38
4					
Fronte	250	89			



D 31	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4234971,2388
	Tipo di ammasso	Massivo	Longitudine	566829,5048
	Area stendimento	(2,5 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	50

J_{vH}	9,8
J_{vV}	4,4
J_{vO}	8,7
J_v	7,7
I_b (cm)	15,3

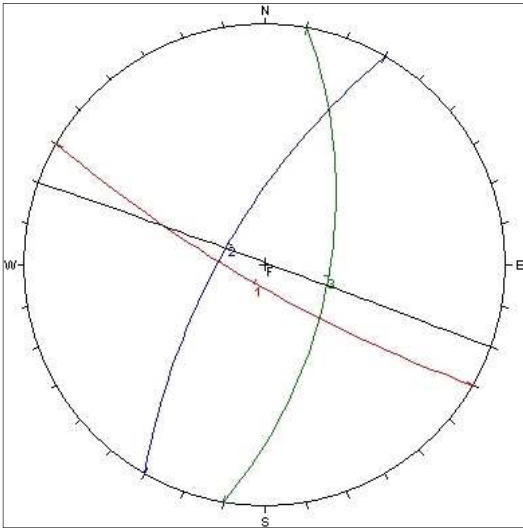
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	360	65	9	21,8	105
2	325	50	7	14,2	85
3	300	80	10	10,1	
4					
Fronte	320	89			



D 32	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4235003,3718
	Tipo di ammasso	Massivo	Longitudine	566862,0442
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	60

J_{vH}	13,2
J_{vV}	8,4
J_{vO}	14,6
J_v	12,1
I_b (cm)	11,3

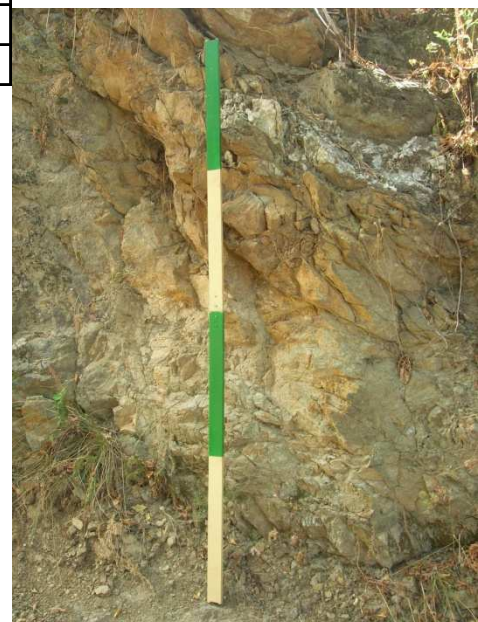
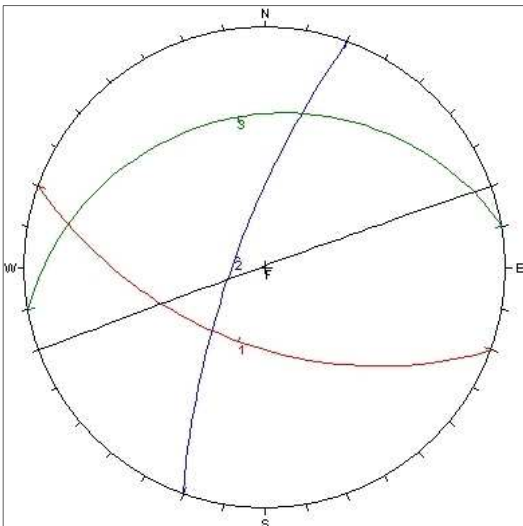
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	210	80	17	16,1	63
2	300	70	9	10,5	50
3	100	60	7	7,3	61
4					
Fronte	20	89			



D 33	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4235098,4097
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	566960,4043
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	140

J_{vH}	24,2
J_{vV}	22,2
J_{vO}	19,9
J_v	22,1
I_b (cm)	7,9

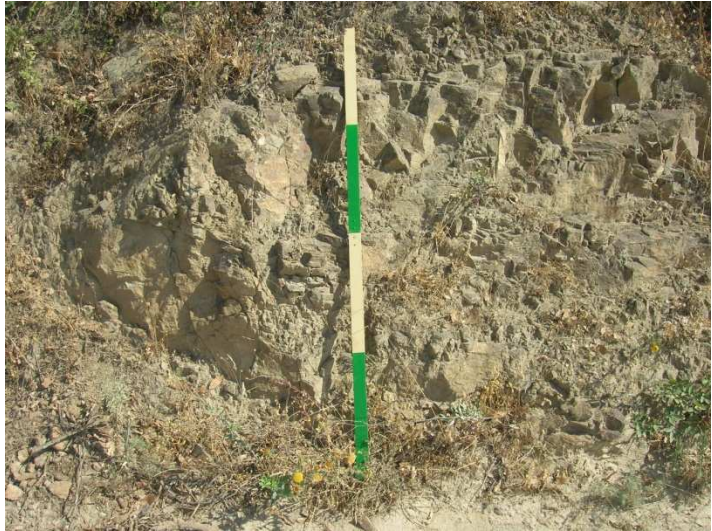
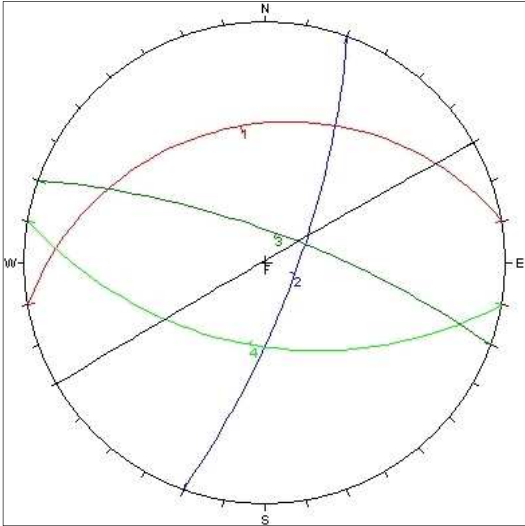
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	200	54	10	5,0	20
2	290	75	9	13,6	22
3	350	25	10	5,2	22
4					
Fronte	340	89			



D 34	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4234113,8255
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	565252,2888
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	205

J_{vH}	19,0
J_{vV}	23,6
J_{vO}	23,6
J_v	22,0
I_b (cm)	9,8

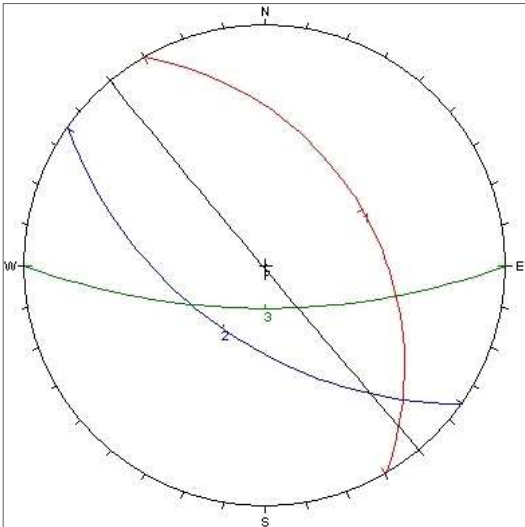
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	350	30	10	9,2	32
2	110	75	11	11,2	30
3	20	75	8	13,9	27
4	190	52	8	9,0	23
Fronte	330	89			



D 35	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4233172,4829
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	564860,3340
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	520

J_{vH}	16,8
J_{vV}	14,4
J_{vO}	16,8
J_v	16,0
I_b (cm)	12,2

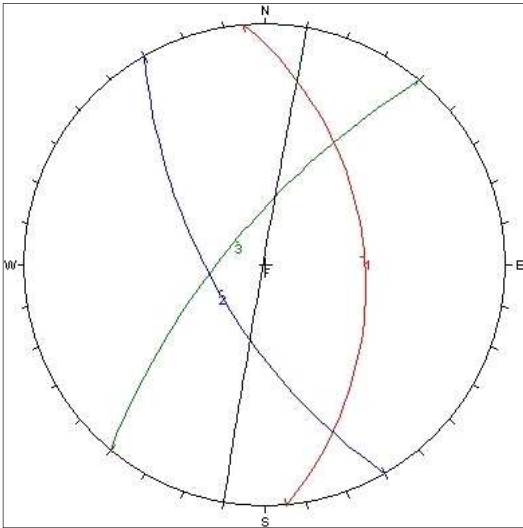
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	60	40	11	11,2	
2	215	55	8	10,6	
3	180	70	11	14,9	
4					
Fronte	230	89			



D 36	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4233086,0488
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	564857,7426
	Area stendimento	(2,5 x 1,5) m ²	Quota (m s.l.m.)	530

J_{vH}	11,7
J_{vV}	11,6
J_{vO}	8,1
J_v	10,4
I_b (cm)	12,9

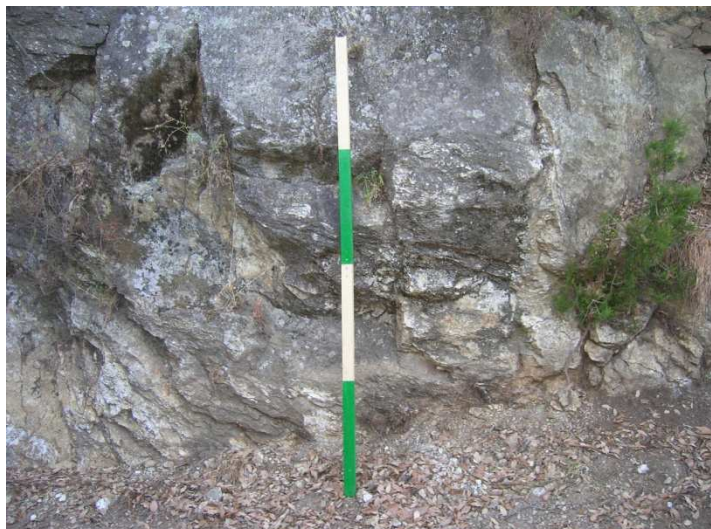
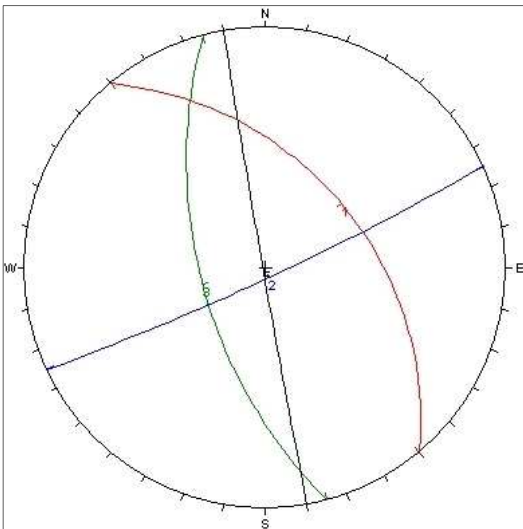
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	85	45	10	9,4	46
2	240	65	7	17,7	27
3	310	72	8	11,6	42
4					
Fronte	280	89			



D 37	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4234288,5711
	Tipo di ammasso	Massivo	Longitudine	566743,3998
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	320

J_{vH}	8,8
J_{vV}	6,0
J_{vO}	7,1
J_v	7,3
I_b (cm)	14,2

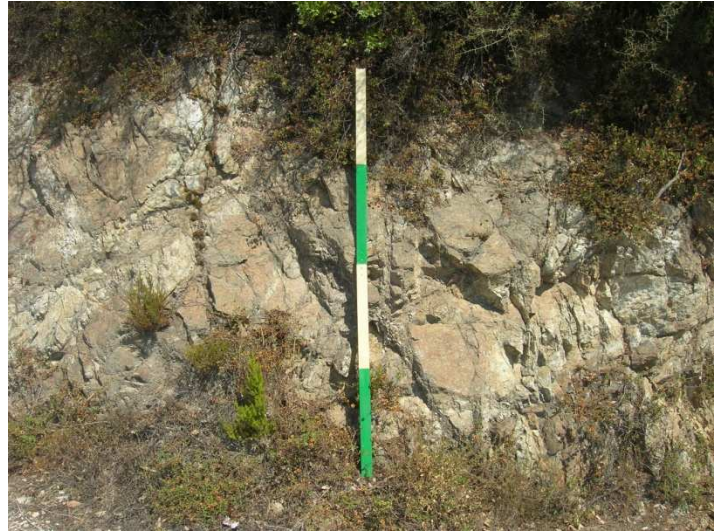
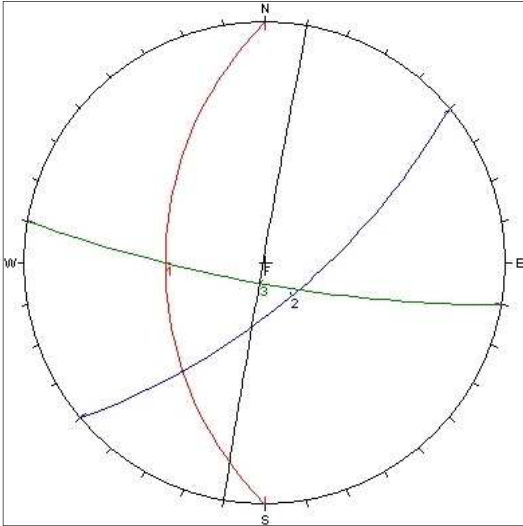
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	50	45	8	8,6	85
2	155	85	6	18,2	30
3	255	60	8	15,7	64
4					
Fronte	260	89			



D 38	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4232883,4625
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	565346,0603
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	540

J_{vH}	19,3
J_{vV}	15,8
J_{vO}	22,7
J_v	19,3
I_b (cm)	10,3

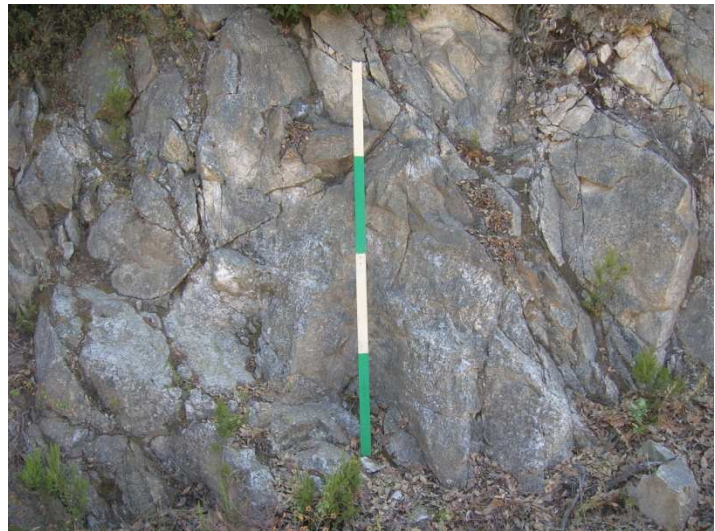
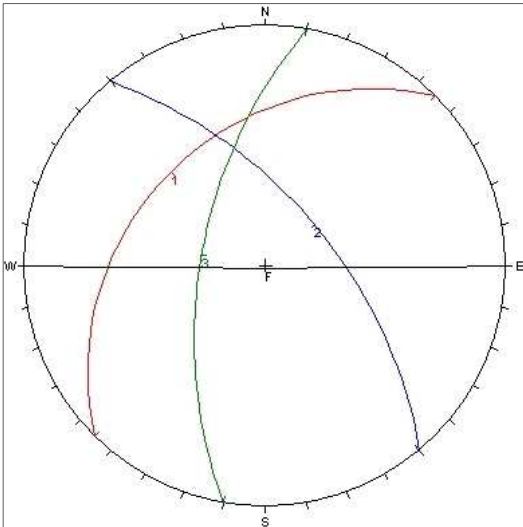
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	S _{media} (cm)	Q _c (MPa)
1	270	45	9	5,9	60
2	140	70	8	14,1	19
3	190	80	12	10,9	
4					
Fronte	280	89			



D 39	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4232920,0866
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	565373,8770
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	540

J_{vH}	16,5
J_{vV}	11,1
J_{vO}	14,3
J_v	14,0
I_b (cm)	19,6

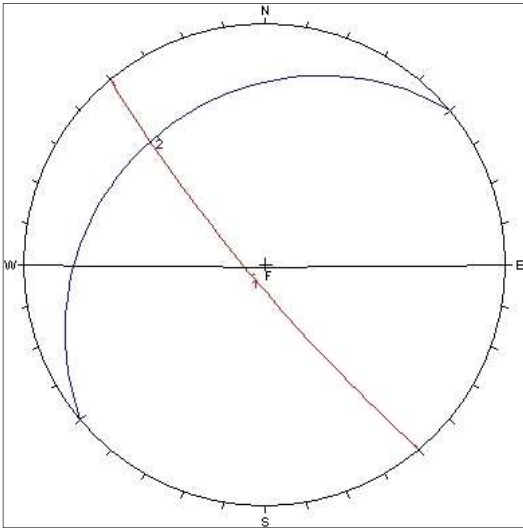
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	S _{media} (cm)	Q _c (MPa)
1	315	32	6	13,8	71
2	50	60	8	23,0	95
3	280	60	9	21,9	46
4					
Fronte	180	89			



D 40	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4232994,9695
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	565527,7568
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	540

J_{vH}	13,3
J_{vV}	14,2
J_{vO}	14,1
J_v	13,9
I_b (cm)	12,5

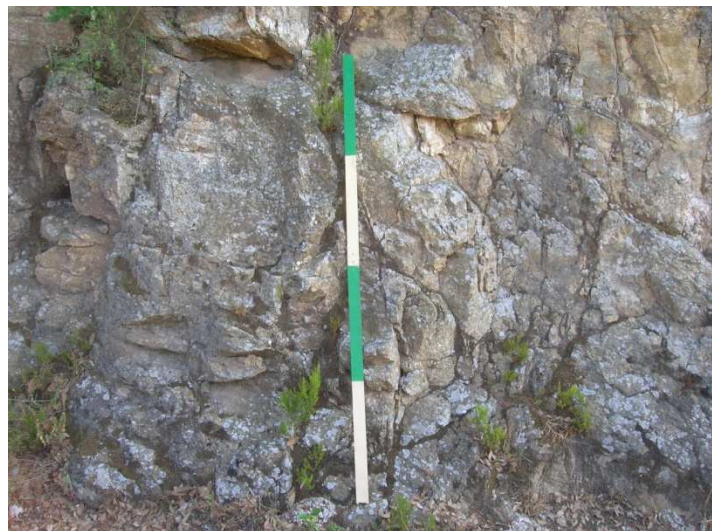
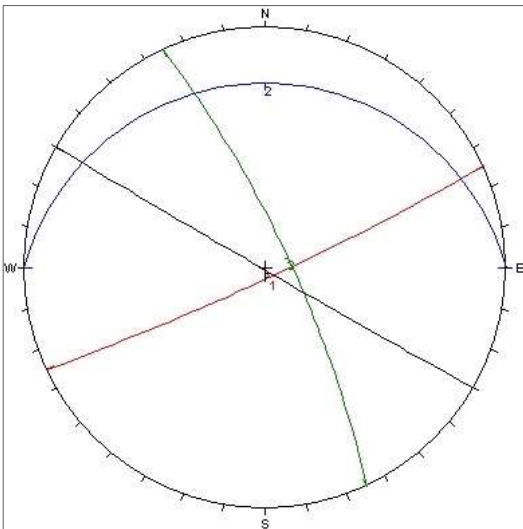
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	230	82	11	10,3	96
2	320	20	8	14,7	50
3					
4					
Fronte	90	89			



D 41	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4233030,6105
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	565572,4489
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	550

J_{vH}	18,5
J_{vV}	12,7
J_{vO}	15,7
J_v	15,6
I_b (cm)	13,0

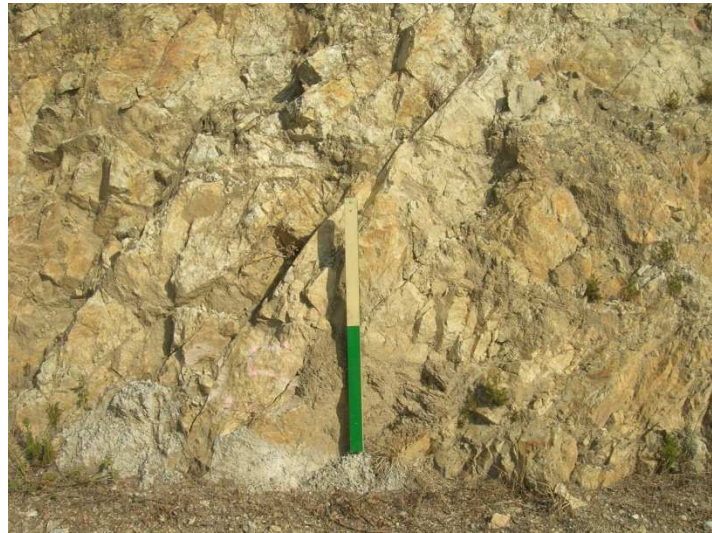
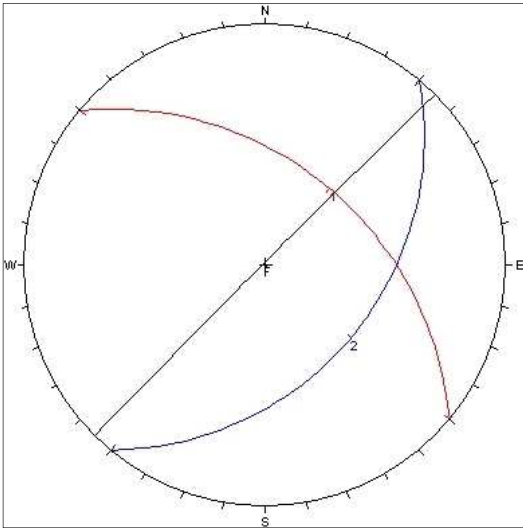
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	155	85	6	13,3	32
2	360	15	8	15,7	46
3	65	78	10	10,0	32
4					
Fronte	210	89			



D 42	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4233946,6541
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	564714,1671
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	190

J_{vH}	19,8
J_{vV}	15,6
J_{vO}	19,1
J_v	18,2
Ib (cm)	12,0

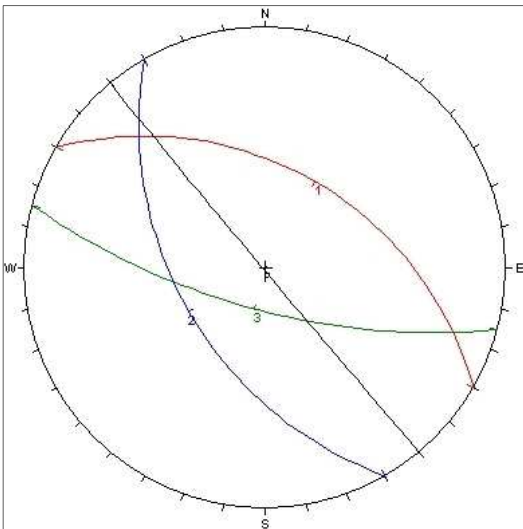
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	40	45	11	14,9	24
2	130	40	8	9,1	16
3					
4					
Fronte	315	89			



D 43	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4236198,3108
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	569599,3159
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	480

J_{vH}	12,8
J_{vV}	11,6
J_{vO}	11,7
J_v	12,0
Ib (cm)	13,3

N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	30	45	11	10,0	52
2	240	50	9	15,6	46
3	195	70	8	14,3	175
4					
Fronte	230	89			



D 44	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4234434,1506
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	562538,6149
	Area stendimento	(4 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	58

J_{vH}	16,5
J_{vV}	11,5
J_{vO}	11,7
J_v	13,2
I_b (cm)	20,7

N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	320	70	6	24,0	170
2	50	80	18	7,4	45
3	130	35	4	30,5	260
4					
Fronte	90	1			

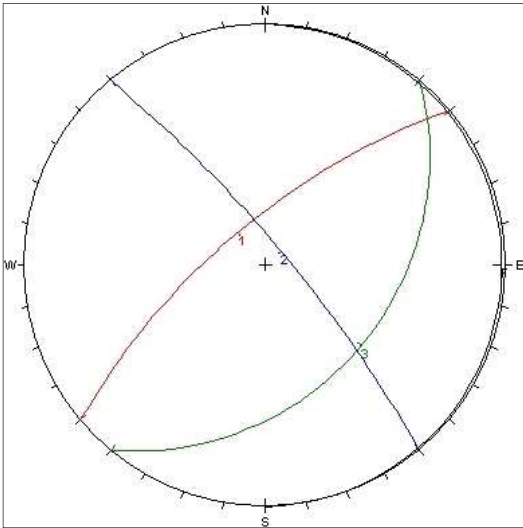
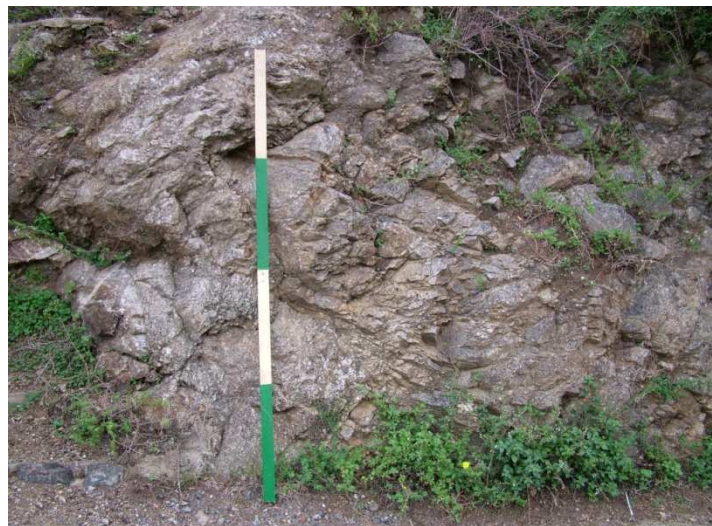
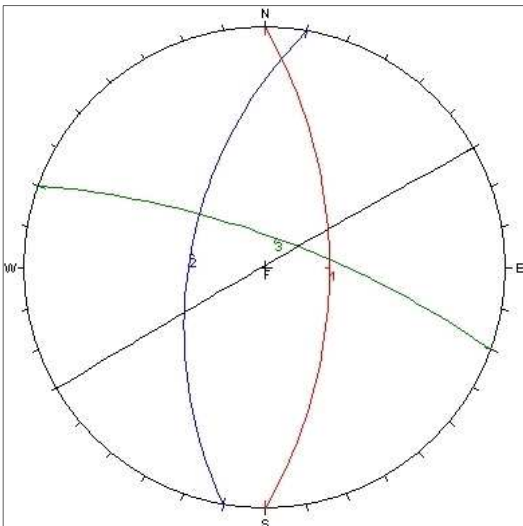


Foto non disponibile

D 45	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4233936,9792
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	562566,7100
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	65

J_{vH}	17,1
J_{vV}	17,8
J_{vO}	20,1
J_v	18,3
I_b (cm)	8,1

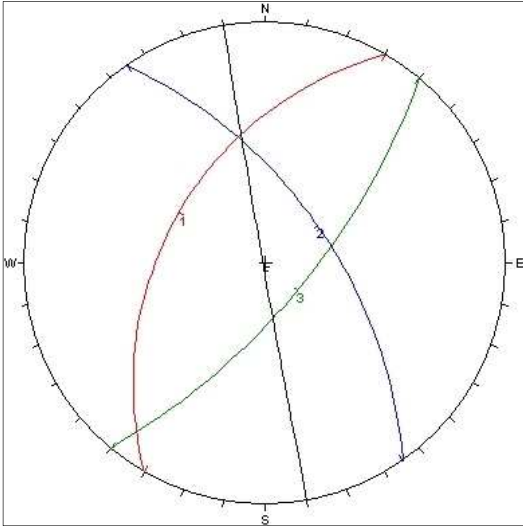
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	90	60	12	8,0	21
2	280	55	8	5,9	25
3	20	75	12	10,5	20
4					
Fronte	330	89			



D 46	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4232543,7591
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	563027,8891
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	460

J_{vH}	14,3
J_{vV}	14,2
J_{vO}	13,7
J_v	14,1
Ib (cm)	12,3

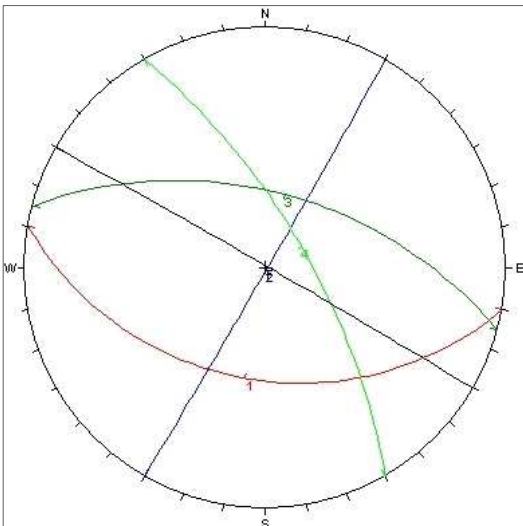
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	300	45	8	14,4	170
2	55	60	15	7,8	60
3	130	70	11	14,7	85
4					
Fronte	260	89			



GM 1	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4233228,3699
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	560386,4649
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	145

J_{vH}	21,4
J_{vV}	27,0
J_{vO}	20,0
J_v	22,8
Ib (cm)	11,3

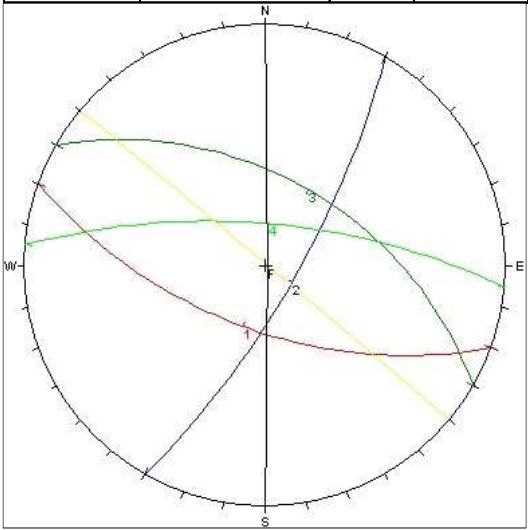
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	190	40	10	8,9	25
2	120	89	8	20,3	52
3	15	55	8	14,3	
4	60	70	6	10,7	27
Fronte	30	89			



GM 2	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4233711,9986
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	561179,4337
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	148

J_{vH}	31,0
J_{vV}	24,0
J_{vO}	32,0
J_v	29,0
I_b (cm)	12,2

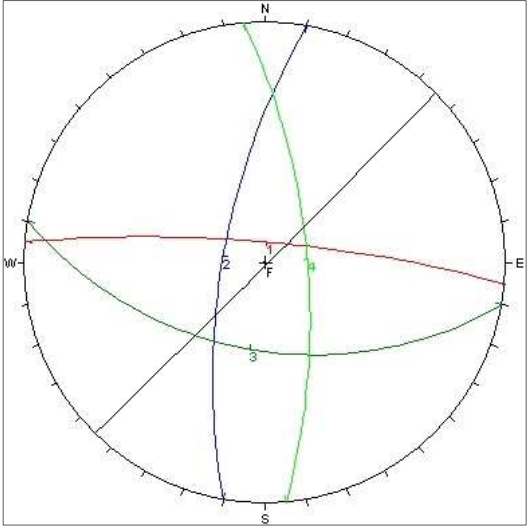
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	S _{media} (cm)	Q _c (MPa)
1	200	60	14	23,9	71
2	120	75	17	18,5	
3	30	50	16	10,8	37
4	5	70	7	7,3	
5	40	89	3	29,5	
Fronte	90	89			



GM 3	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4233801,5337
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	561556,5844
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	133

J_{vH}	7,5
J_{vV}	7,0
J_{vO}	6,5
J_v	7,0
I_b (cm)	30,0

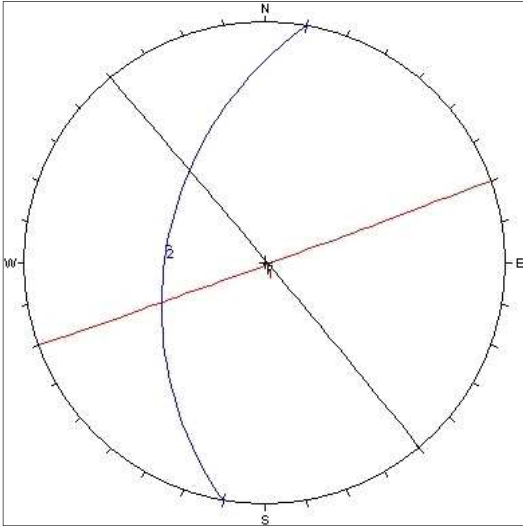
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	S _{media} (cm)	Q _c (MPa)
1	5	80	8	23,6	44
2	280	70	7	15,4	
3	190	50	5	51,0	64
4	85	70	4	58,7	
Fronte	135	89			



GM 4	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4233987,1831
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	561553,0473
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	56

N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	160	89	7	21,7	54
2	280	45	5	8,3	24
3					
4					
Fronte	230	89			

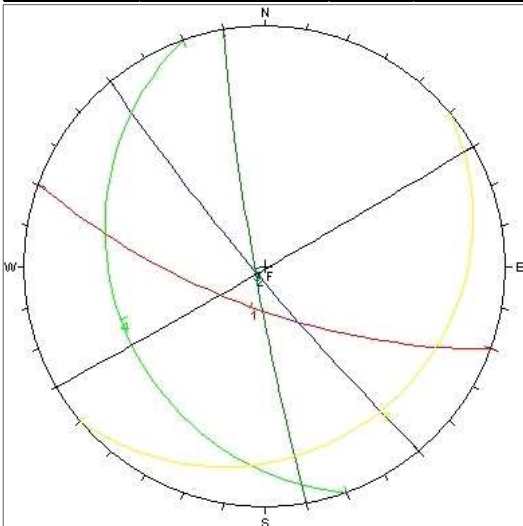
J_{vH}	14,0
J_{vV}	15,0
J_{vO}	16,0
J_v	15,0
Ib (cm)	15,0



GM 5	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4232729,5372
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	560901,9127
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	408

N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	200	70	3	26,5	27
2	330	85	17	8,3	50
3	260	85	9	11,8	
4	250	25	5	25,5	54
5	140	15	3	35,0	
Fronte	150	89			

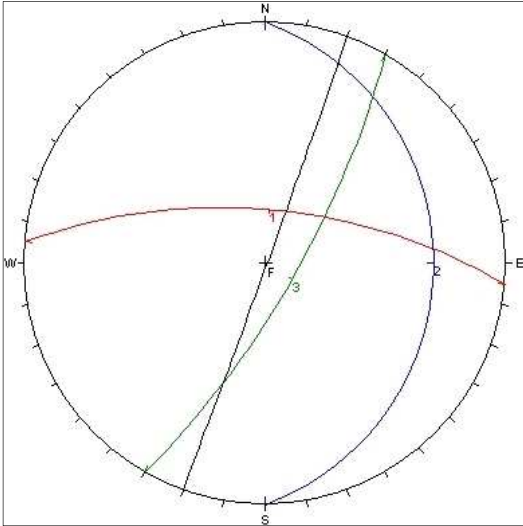
J_{vH}	22,0
J_{vV}	17,0
J_{vO}	18,0
J_v	19,0
Ib (cm)	15,2



GM 6	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4233284,5073
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	561333,6648
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	396

J_{vH}	36,0
J_{vV}	38,0
J_{vO}	35,0
J_v	36,3
I_b (cm)	4,9

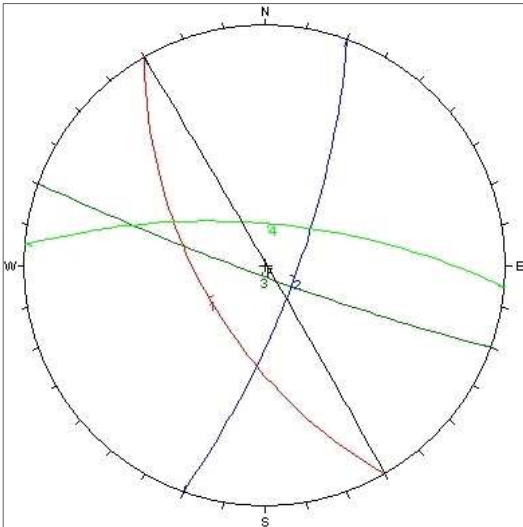
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	S _{media} (cm)	Q _c (MPa)
1	5	65	19	3,1	32
2	90	20	10	5,2	38
3	120	75	5	6,5	24
4					
Fronte	110	89			



GM 7	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4233672,7898
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	561142,7295
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	156

J_{vH}	19,0
J_{vV}	9,3
J_{vO}	7,8
J_v	12,0
I_b (cm)	23,6

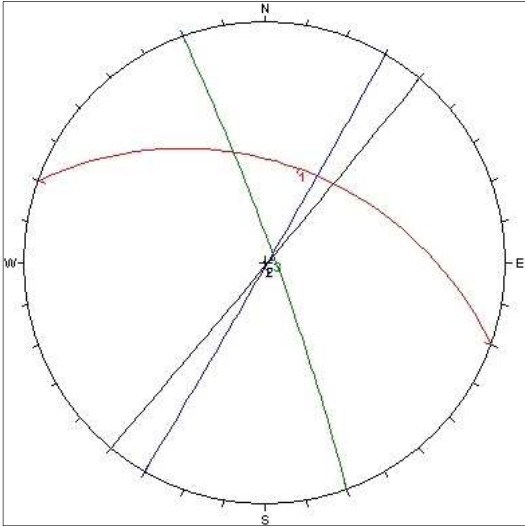
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	S _{media} (cm)	Q _c (MPa)
1	240	60	11	16,3	34
2	110	75	8	28,9	39
3	200	85	6	33,0	20
4	5	70	9	25,6	39
Fronte	60	89			



GM 8	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4233819,7115
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	561586,2786
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	139

J_{vH}	16,0
J_{vV}	11,0
J_{vO}	15,0
J_v	14,0
I_b (cm)	19,9

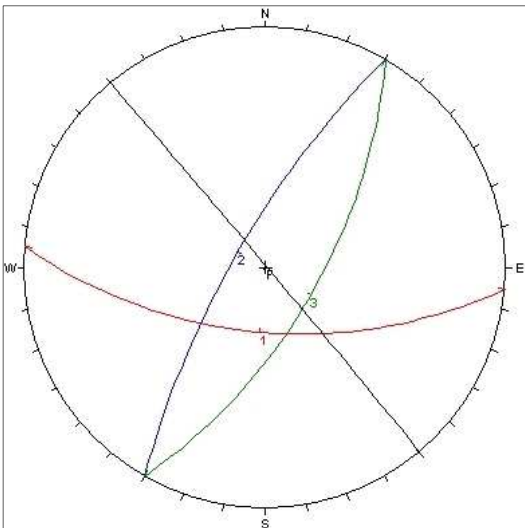
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	S _{media} (cm)	Qc (MPa)
1	20	45	5	28,8	33
2	120	89	9	7,9	42
3	70	85	5	23,0	40
4					
Fronte	130	89			



GM 9	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4233202,6252
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	560446,2182
	Area stendimento	(3 x 1,5) m ²	Quota (m s.l.m.)	152

J_{vH}	39,0
J_{vV}	31,4
J_{vO}	23,0
J_v	31,1
I_b (cm)	7,7

N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	S _{media} (cm)	Qc (MPa)
1	185	60	19	4,9	28
2	300	75	6	6,8	57
3	120	65	7	11,5	
4					
Fronte	50	89			



GM 10	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4233232,1479
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	561530,5227
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	447

J_{vH}	16,5
J_{vV}	15,7
J_{vO}	16,6
J_v	16,3
Ib (cm)	15,7

N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	20	55	16	8,7	34
2	190	75	10	9,0	22
3	250	65	7	29,4	24
4					
Fronte	50	89			

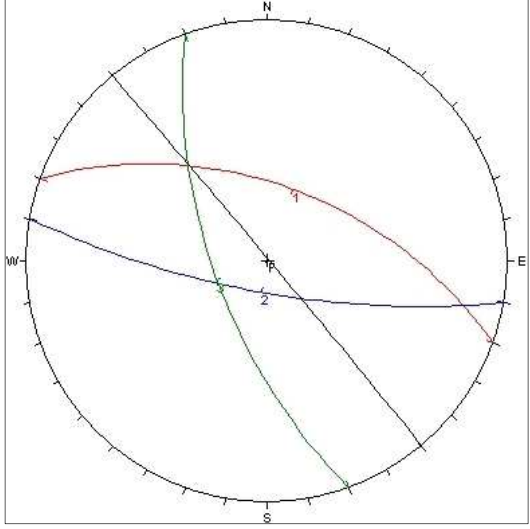
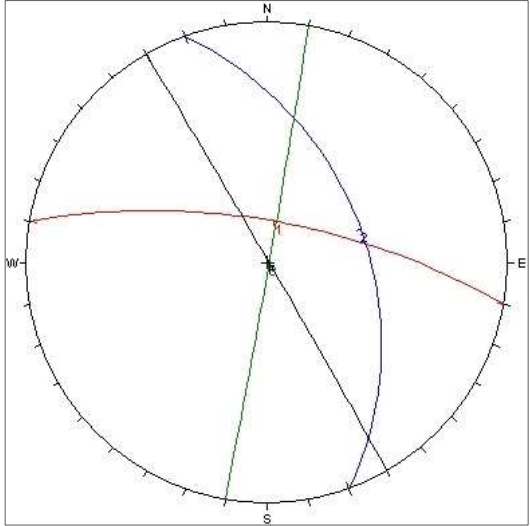


Foto non disponibile

GM 11	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4233379,7962
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	561661,7922
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	308

J_{vH}	25,0
J_{vV}	11,0
J_{vO}	13,0
J_v	16,3
Ib (cm)	6,7

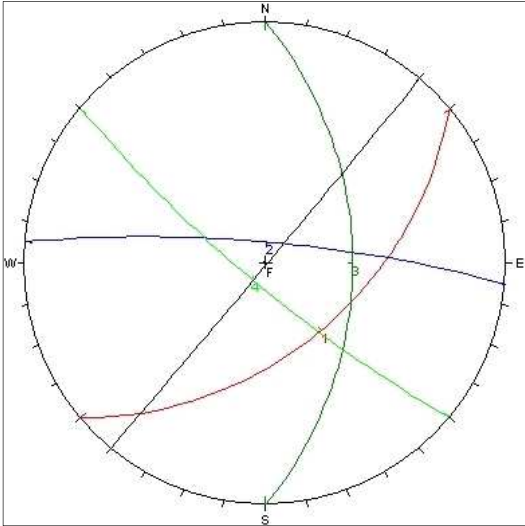
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	10	70	11	6,2	24
2	70	45	4	7,0	28
3	100	89	5	6,8	56
4					
Fronte	60	89			



GM 12	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4233392,4459
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	561681,0501
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	307

J_{vH}	24,0
J_{vV}	18,7
J_{vO}	21,3
J_v	21,3
I_b (cm)	4,7

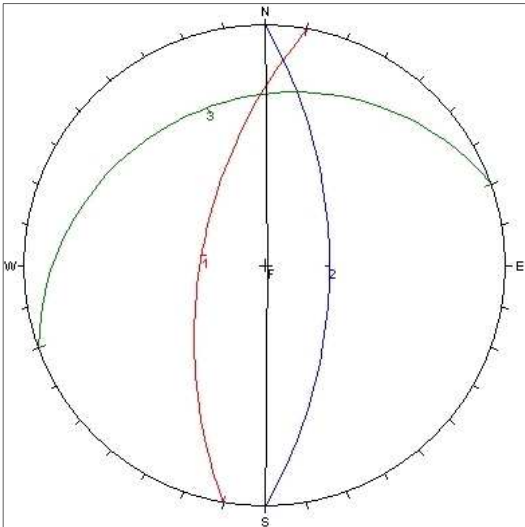
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	S _{media} (cm)	Q _c (MPa)
1	140	50	18	4,5	35
2	5	80	14	5,2	51
3	90	50	11	5,1	
4	220	80	12	4,6	30
Fronte	130	89			



GM 13	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4233149,4506
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	561467,2471
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	464

J_{vH}	26,0
J_{vV}	22,0
J_{vO}	20,0
J_v	22,7
I_b (cm)	6,3

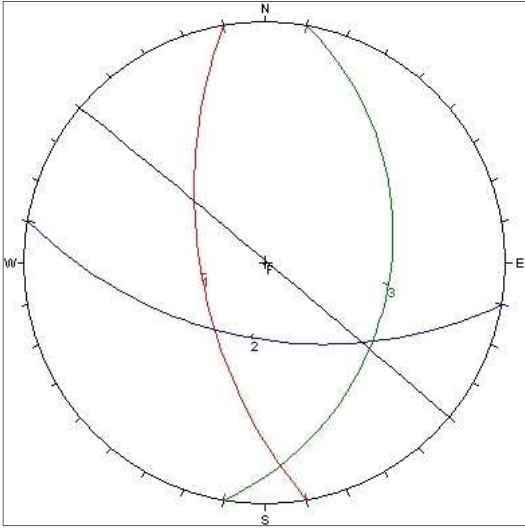
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	S _{media} (cm)	Q _c (MPa)
1	280	60	15	3,2	29
2	90	60	12	7,1	
3	340	20	14	8,5	
4					
Fronte	90	89			



GM 14	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4233474,5090
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	561817,1477
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	304

J_{vH}	14,0
J_{vV}	12,0
J_{vO}	10,0
J_v	12,0
Ib (cm)	9,2

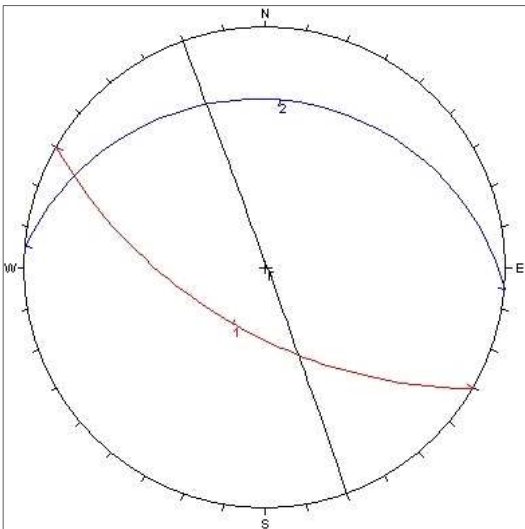
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	260	60	16	6,0	43
2	190	55	7	12,3	41
3	100	35	4	9,3	53
4					
Fronte	40	89			



GM 15	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4233040,6618
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	561878,9550
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	389

J_{vH}	18,7
J_{vV}	17,0
J_{vO}	23,0
J_v	19,6
Ib (cm)	7,7

N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	210	60	12	5,8	39
2	5	20	9	9,6	
3					
4					
Fronte	70	89			



GM 16	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4232893,0882
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	560323,3090
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	285

J_{vH}	21,3
J_{vV}	15,3
J_{vO}	13,0
J_v	16,5
I_b (cm)	12,3

N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	5	75	14	11,4	24
2	320	30	7	13,7	
3	300	89	12	11,9	36
4					
Fronte	20	89			

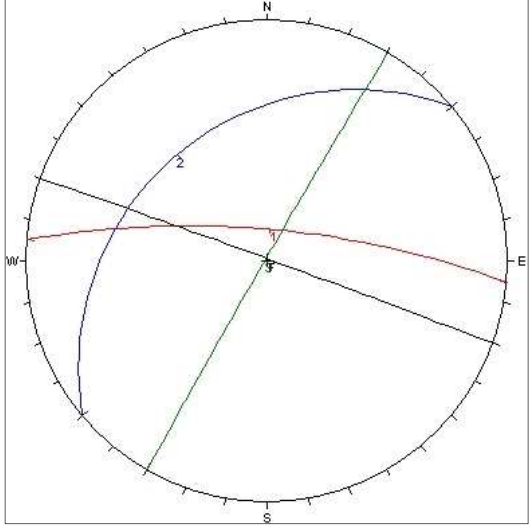
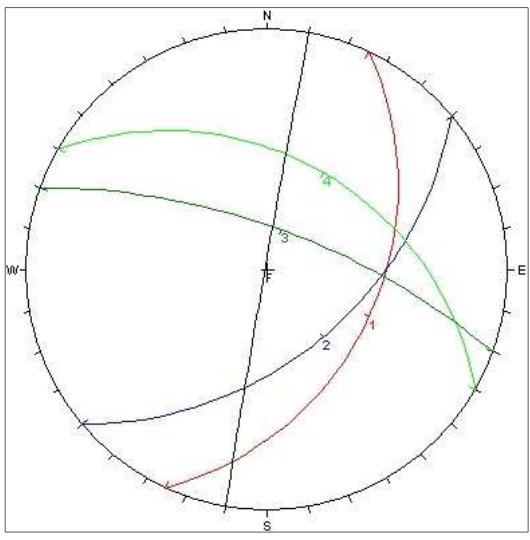


Foto non disponibile

ST 1	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4232458,3071
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	559588,7881
	Area stendimento	(2 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	86

J_{vH}	12,6
J_{vV}	9,3
J_{vO}	13,7
J_v	11,9
I_b (cm)	13,0

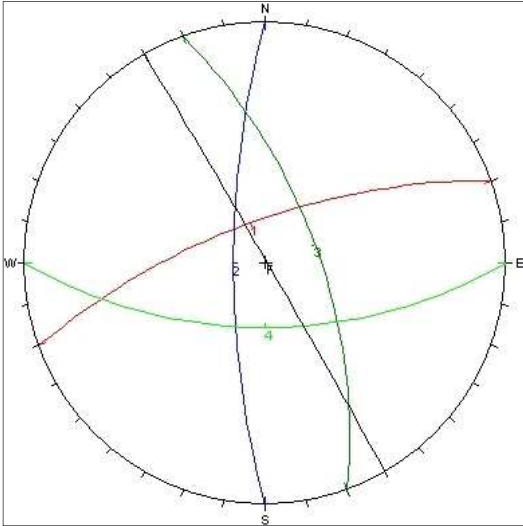
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	115	40	12	15,3	50
2	140	50	7	17,1	52
3	20	70	7	10,1	36
4	30	40	12	13,6	48
Fronte	280	89			



ST 2	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4232683,0995
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	560824,3436
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	385

N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	340	70	12	15,7	18
2	270	75	14	12,0	30
3	70	65	8	25,4	37
4	180	60	8	34,4	52
Fronte	60	89			

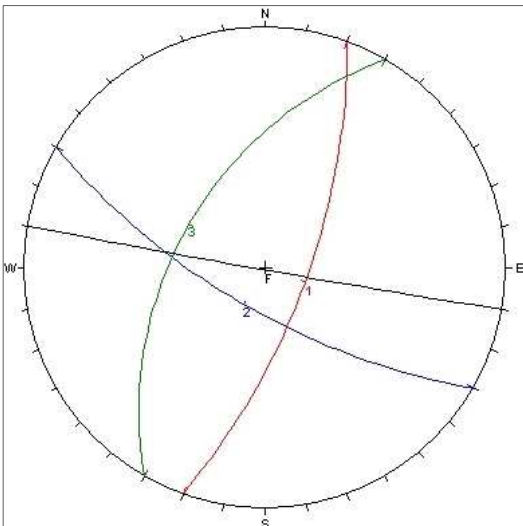
J_{vH}	26,8
J_{vV}	20,9
J_{vO}	24,4
J_v	24,1
Ib (cm)	17,7



ST 3	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4232562,1887
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	560773,9093
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	380

N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	110	70	6	8,3	54
2	210	70	8	12,8	44
3	300	50	8	8,5	38
4					
Fronte	190	89			

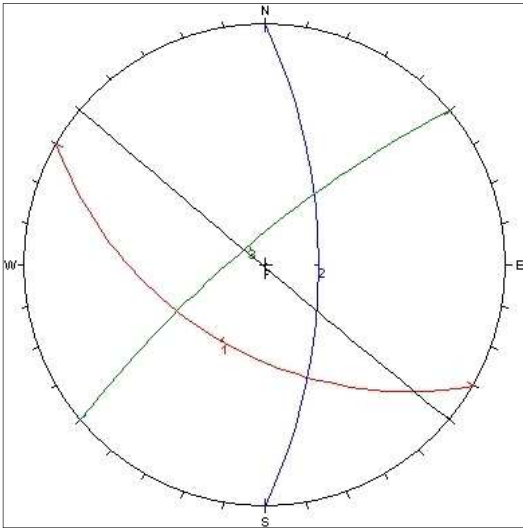
J_{vH}	26,7
J_{vV}	27,8
J_{vO}	35,3
J_v	29,9
Ib (cm)	9,9



ST 4	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4232620,6673
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	560660,4132
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	369

J_{vH}	12,5
J_{vV}	29,1
J_{vO}	20,9
J_v	20,8
I_b (cm)	13,5

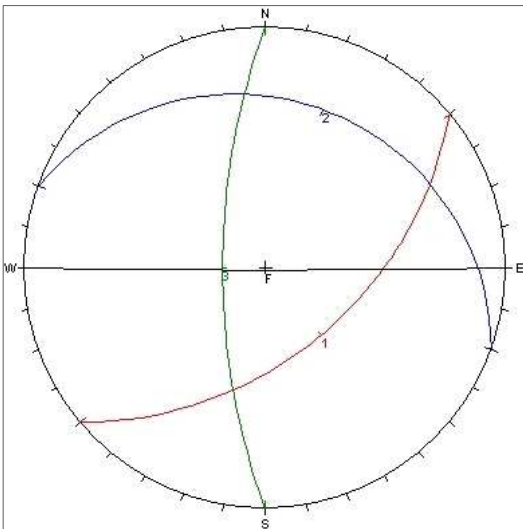
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	210	50	11	12,5	45
2	90	65	14	16,7	68
3	320	78	13	11,4	45
4					
Fronte	220	89			



ST 5	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4232620,3690
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	560564,8161
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	361

J_{vH}	19,5
J_{vV}	20,9
J_{vO}	15,9
J_v	18,8
I_b (cm)	15,6

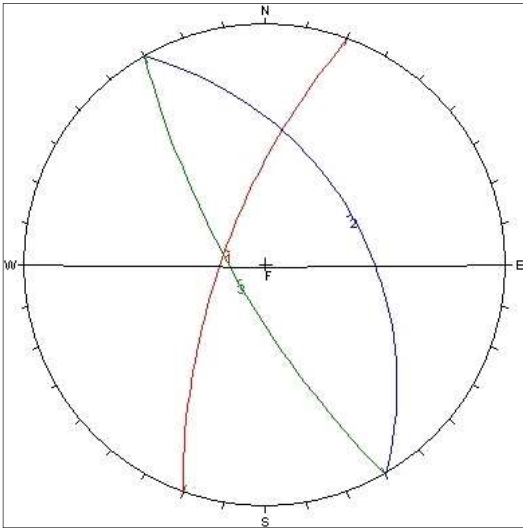
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	140	50	8	16,7	33
2	20	20	14	14,3	30
3	270	70	12	15,8	24
4					
Fronte	180	89			



ST 6	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4232931,3203
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	560295,8204
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	269

J_{vH}	27,7
J_{vV}	28,2
J_{vO}	24,7
J_v	26,9
I_b (cm)	9,0

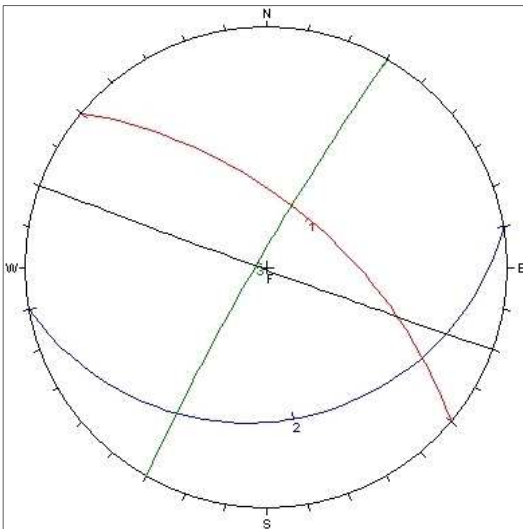
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	290	70	13	6,0	27
2	60	45	10	12,5	27
3	240	75	16	8,6	24
4					
Fronte	180	89			



ST 7	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4232194,3010
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	559573,6330
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	255

J_{vH}	17,5
J_{vV}	17,8
J_{vO}	18,2
J_v	17,8
I_b (cm)	9,3

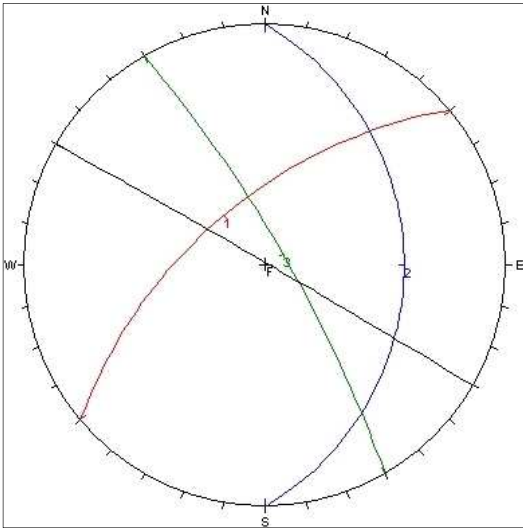
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	40	60	11	7,6	70
2	170	25	18	8,2	26
3	300	85	18	12,0	46
4					
Fronte	200	89			



ST 8	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4232227,8130
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	559550,3927
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	251

J_{vH}	18,5
J_{vV}	17,0
J_{vO}	28,3
J_v	21,3
I_b (cm)	11,7

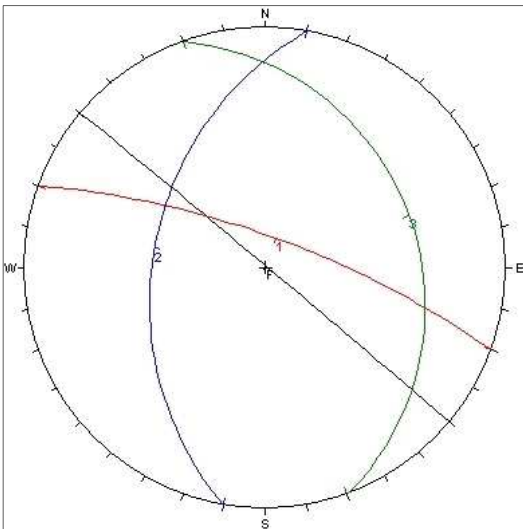
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	320	60	11	12,6	32
2	90	30	11	15,6	66
3	60	80	13	6,9	26
4					
Fronte	30	89			



ST 9	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4232341,8624
	Tipo di ammasso	Irregolare	Longitudine	559516,6130
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	189

J_{vH}	27,2
J_{vV}	31,3
J_{vO}	28,3
J_v	28,9
I_b (cm)	11,6

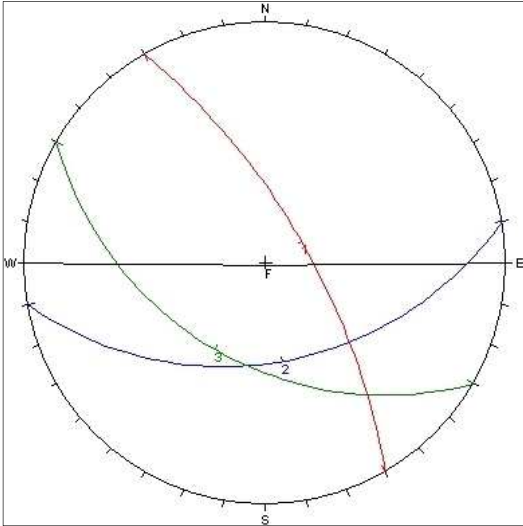
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	20	75	18	8,9	33
2	280	40	12	14,3	75
3	70	25	14	11,6	90
4					
Fronte	40	89			



ST 10	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4232268,0570
	Tipo di ammasso	Int. fratturato	Longitudine	560324,1591
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	154

J_{vH}	21,0
J_{vV}	25,1
J_{vO}	19,7
J_v	21,9
I_b (cm)	17,4

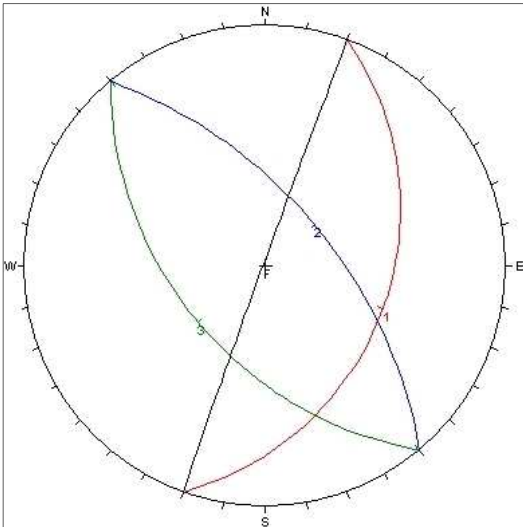
N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	40	70	5	22,2	38
2	170	45	8	11,2	22
3	210	45	7	18,9	
4					
Fronte	180	89			



ST 25	Litotipo	Gneiss	Latitudine	4232104,0118
	Tipo di ammasso	Int. fratturato	Longitudine	559599,3986
	Area stendimento	(3 x 2) m ²	Quota (m s.l.m.)	290

J_{vH}	30,1
J_{vV}	35,3
J_{vO}	35,8
J_v	33,7
I_b (cm)	6,0

N° Sistema	Dip direction (°)	Dip (°)	N° giunti	Smedia (cm)	Qc (MPa)
1	110	35	16	4,6	43
2	50	60	18	5,9	80
3	230	50	17	7,5	24
4					
Fronte	290	89			



D 11

Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Irregolare
Area stendimento	(3 x 1,5) m ²
Latitudine	4235416,0808
Longitudine	568547,3415
Quota (m s.l.m.)	465
Direzione fronte	N 40 W

J_{vH}	14,4	Qc (MPa)	
J_{vV}	10,9		36
J_{vO}	14,3		55
J_v	13,2		



Z 1

Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Irregolare
Area stendimento	(3 x 2) m ²
Latitudine	4235519,3758
Longitudine	568791,2778
Quota (m s.l.m.)	430
Direzione fronte	N - S

J_{vH}	17,0	Qc (MPa)	
J_{vV}	18,9		50
J_{vO}	14,3		105
J_v	16,7		



Z 2

Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Irregolare
Area stendimento	(3 x 2) m ²
Latitudine	4235626,3015
Longitudine	568833,8500
Quota (m s.l.m.)	405
Direzione fronte	N 10 W

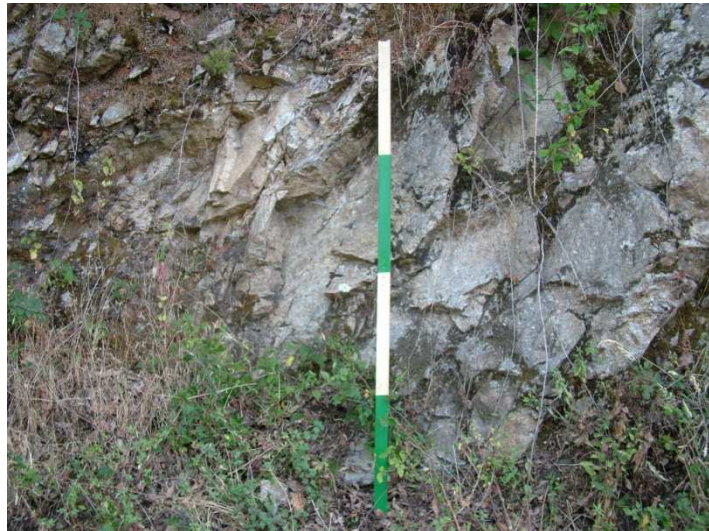
J_{vH}	15,0	Qc (MPa)	
J_{vV}	7,8		60
J_{vO}	13,0		75
J_v	11,9		



Z 3		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Irregolare	
Area stendimento	$(3 \times 2) \text{ m}^2$	
Latitudine	4235741,8805	
Longitudine	568860,7215	
Quota (m s.l.m.)	395	
Direzione fronte	N 40 W	
J_{vH}	25,3	Qc (MPa)
J_{vV}	23,6	101
J_{vO}	33,7	123
J_v	27,6	



Z 4		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Irregolare	
Area stendimento	$(3 \times 1,5) \text{ m}^2$	
Latitudine	4236274,8185	
Longitudine	569285,0637	
Quota (m s.l.m.)	390	
Direzione fronte	N 60 W	
J_{vH}	20,3	Qc (MPa)
J_{vV}	14,0	50
J_{vO}	20,0	56
J_v	18,1	



Z 5		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Massivo	
Area stendimento	$(3 \times 2) \text{ m}^2$	
Latitudine	4237207,4594	
Longitudine	571480,2813	
Quota (m s.l.m.)	500	
Direzione fronte	N 10 W	
J_{vH}	13,3	Qc (MPa)
J_{vV}	15,0	17
J_{vO}	13,0	
J_v	13,8	



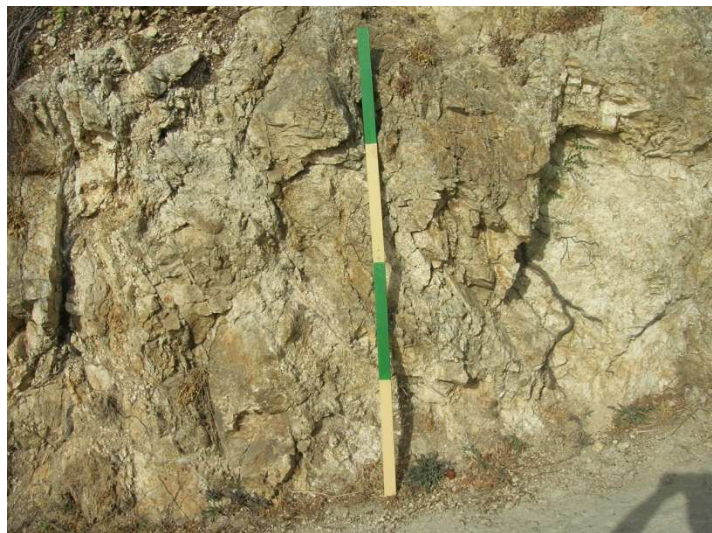
Z 6		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Irregolare	
Area stendimento	(3 x 2) m ²	
Latitudine	4235089,6282	
Longitudine	568044,9697	
Quota (m s.l.m.)	365	
Direzione fronte	N 40 E	
J_{vH}	14,3	Qc (MPa)
J_{vV}	21,1	155
J_{vO}	22,9	37
J_v	19,4	



Z 7		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Irregolare	
Area stendimento	(3 x 2) m ²	
Latitudine	4234090,5756	
Longitudine	565841,8365	
Quota (m s.l.m.)	342	
Direzione fronte	N 40 E	
J_{vH}	11,8	Qc (MPa)
J_{vV}	17,3	35
J_{vO}	19,8	25
J_v	16,3	



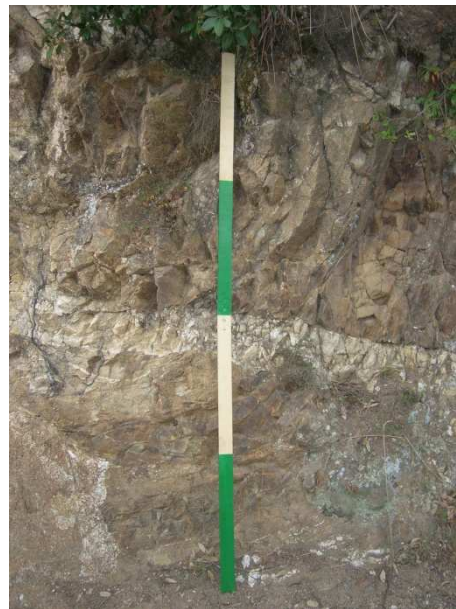
Z 8		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Int. fratturato	
Area stendimento	(3 x 2) m ²	
Latitudine	4234128,0654	
Longitudine	565800,2505	
Quota (m s.l.m.)	330	
Direzione fronte	N 20 W	
J_{vH}	29,7	Qc (MPa)
J_{vV}	25,1	150
J_{vO}	31,2	17
J_v	28,7	



Z 9		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Irregolare	
Area stendimento	(3 x 2) m ²	
Latitudine	4232609,2715	
Longitudine	564364,8257	
Quota (m s.l.m.)	565	
Direzione fronte	N 50 W	
J_{vH}	27,5	Qc (MPa)
J_{vV}	18,0	17
J_{vO}	26,7	28
J_v	24,1	



Z 10		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Irregolare	
Area stendimento	(3 x 2) m ²	
Latitudine	4232554,3711	
Longitudine	564399,0536	
Quota (m s.l.m.)	570	
Direzione fronte	N 40 E	
J_{vH}	29,7	Qc (MPa)
J_{vV}	30,0	22
J_{vO}	38,0	
J_v	32,6	



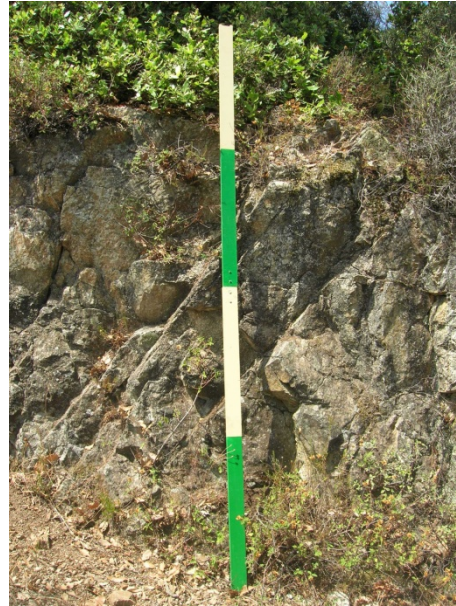
Z 11		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Irregolare	
Area stendimento	(3 x 2) m ²	
Latitudine	4235642,8545	
Longitudine	568186,4385	
Quota (m s.l.m.)	392	
Direzione fronte	N 40 W	
J_{vH}	36,0	Qc (MPa)
J_{vV}	29,3	34
J_{vO}	39,3	
J_v	34,9	



Z 12

Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Irregolare
Area stendimento	(2 x 2) m ²
Latitudine	4235522,1598
Longitudine	568255,2781
Quota (m s.l.m.)	423
Direzione fronte	N 20 W

J_{vH}	17,8	Qc (MPa)
J_{vV}	10,7	35
J_{vO}	18,7	
J_v	15,7	



Z 13

Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Irregolare
Area stendimento	(2 x 2) m ²
Latitudine	4235167,0797
Longitudine	568240,6956
Quota (m s.l.m.)	355
Direzione fronte	N 10 W

J_{vH}	30,0	Qc (MPa)
J_{vV}	26,7	58
J_{vO}	21,3	
J_v	26,0	



Z 14

Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Irregolare
Area stendimento	(3 x 2) m ²
Latitudine	4235442,1332
Longitudine	568388,6427
Quota (m s.l.m.)	452
Direzione fronte	N 60 W

J_{vH}	38,3	Qc (MPa)
J_{vV}	27,6	120
J_{vO}	30,4	25
J_v	32,1	



Z 15

Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Massivo
Area stendimento	(3 x 2) m ²
Latitudine	4233418,4480
Longitudine	567043,7789
Quota (m s.l.m.)	390
Direzione fronte	N - S

J_{vH}	20,2	Qc (MPa)	
J_{vV}	16,4		24
J_{vO}	24,0		38
J_v	20,2		



Z 16

Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Irregolare
Area stendimento	(3 x 2) m ²
Latitudine	4233512,8449
Longitudine	566784,7252
Quota (m s.l.m.)	418
Direzione fronte	N 20 E

J_{vH}	7,8	Qc (MPa)	
J_{vV}	6,4		34
J_{vO}	7,2		42
J_v	7,2		



Z 17

Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Massivo
Area stendimento	(3 x 2) m ²
Latitudine	4233646,1862
Longitudine	566753,8653
Quota (m s.l.m.)	450
Direzione fronte	N - S

J_{vH}	21,7	Qc (MPa)	
J_{vV}	11,6		28
J_{vO}	15,7		45
J_v	16,3		



Z 18

Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Irregolare
Area stendimento	(3 x 2) m ²
Latitudine	4233759,0929
Longitudine	566750,3465
Quota (m s.l.m.)	465
Direzione fronte	N 50 E

J_{vH}	19,3	Qc (MPa)
J_{vV}	20,0	24
J_{vO}	18,9	28
J_v	19,4	



Z 19

Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Int. Fratturato
Area stendimento	(3 x 2) m ²
Latitudine	4233878,6448
Longitudine	564913,9870
Quota (m s.l.m.)	288
Direzione fronte	N 30 W

J_{vH}	37,0	Qc (MPa)
J_{vV}	34,0	34
J_{vO}	35,3	
J_v	35,4	



Z 20

Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Irregolare
Area stendimento	(3 x 2) m ²
Latitudine	4236054,3642
Longitudine	568354,4639
Quota (m s.l.m.)	53
Direzione fronte	N 50 E

J_{vH}	23,8	Qc (MPa)
J_{vV}	15,0	75
J_{vO}	21,0	115
J_v	19,9	



Z 21

Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Irregolare
Area stendimento	(3 x 2) m ²
Latitudine	4235058,6565
Longitudine	566855,5694
Quota (m s.l.m.)	75
Direzione fronte	N 35 W

J_{vH}	25,0	Qc (MPa)	
J_{vV}	22,9		20
J_{vO}	30,0		51
J_v	26,0		



Z 22

Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Irregolare
Area stendimento	(3 x 2) m ²
Latitudine	4235087,3809
Longitudine	566829,0776
Quota (m s.l.m.)	85
Direzione fronte	N 50 W

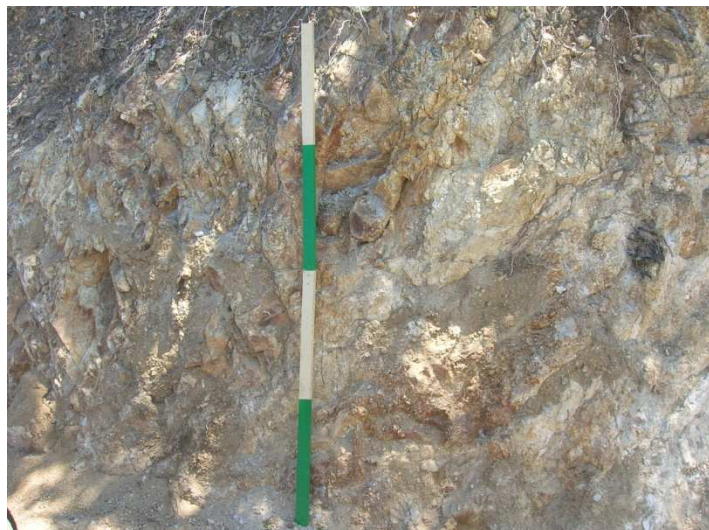
J_{vH}	17,5	Qc (MPa)	
J_{vV}	20,7		24
J_{vO}	18,3		20
			17
J_v	18,8		



Z 23

Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Int. Fratturato
Area stendimento	(3 x 2) m ²
Latitudine	4234957,8894
Longitudine	566972,7818
Quota (m s.l.m.)	170
Direzione fronte	N - S

J_{vH}	26,5	Qc (MPa)	
J_{vV}	19,1		38
J_{vO}	22,1		38
J_v	22,6		



Z 24

Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Int. Fratturato
Area stendimento	(2,5 x 2) m ²
Latitudine	4235090,0456
Longitudine	566902,5569
Quota (m s.l.m.)	115
Direzione fronte	N 30 E

J_{vH}	21,7	Qc (MPa)
J_{vV}	23,3	40
J_{vO}	21,0	29
J_v	22,0	



Z 25

Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Int. Fratturato
Area stendimento	(3 x 2) m ²
Latitudine	4234131,4639
Longitudine	565325,3510
Quota (m s.l.m.)	215
Direzione fronte	E - W

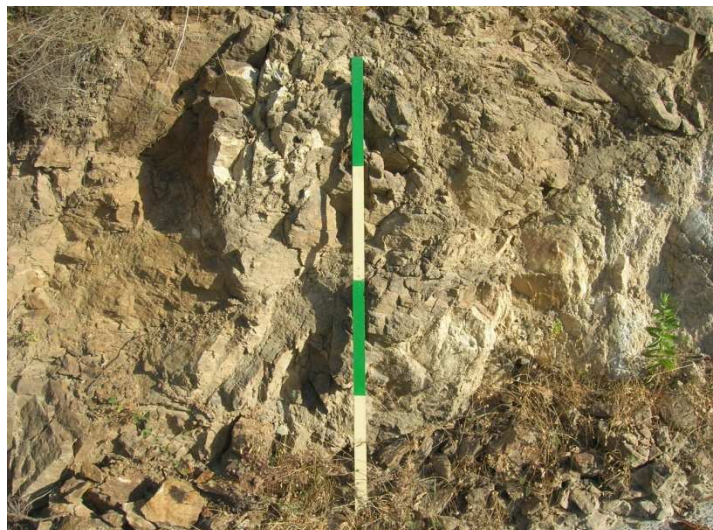
J_{vH}	29,8	Qc (MPa)
J_{vV}	23,0	28
J_{vO}	29,0	28
J_v	27,3	



Z 26

Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Irregolare
Area stendimento	(3 x 2) m ²
Latitudine	4234156,9216
Longitudine	565264,3380
Quota (m s.l.m.)	178
Direzione fronte	E - W

J_{vH}	21,7	Qc (MPa)
J_{vV}	24,4	20
J_{vO}	21,2	40
J_v	22,4	



Z 27	
Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Irregolare
Area stendimento	(3 x 2) m ²
Latitudine	4232914,8068
Longitudine	564852,9621
Quota (m s.l.m.)	585
Direzione fronte	N 30 W

J_{vH}	16,3	Qc (MPa)	
J_{vV}	13,3		123
J_{vO}	16,6		28
J_v	15,4		



Z 28	
Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Irregolare
Area stendimento	(3 x 1,5) m ²
Latitudine	4234007,2103
Longitudine	565827,4178
Quota (m s.l.m.)	390
Direzione fronte	E - W

J_{vH}	20,0	Qc (MPa)	
J_{vV}	20,3		24
J_{vO}	20,6		22
J_v	20,3		



Z 29	
Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Massivo
Area stendimento	(3 x 2) m ²
Latitudine	4232948,4792
Longitudine	565464,4581
Quota (m s.l.m.)	540
Direzione fronte	E - W

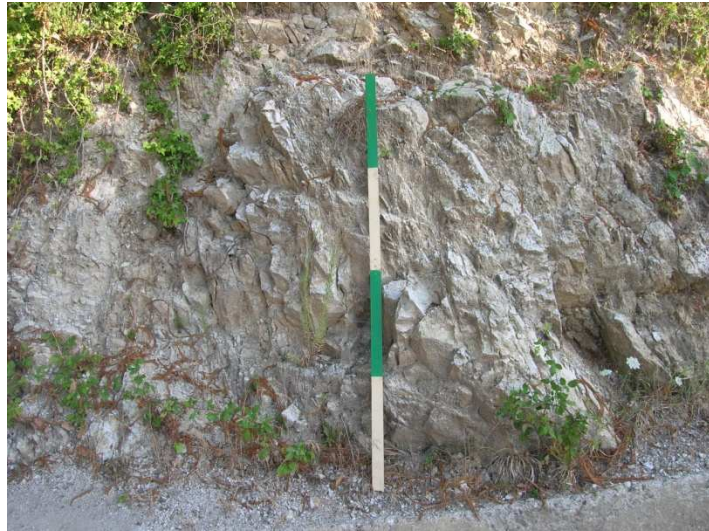
J_{vH}	15,5	Qc (MPa)	
J_{vV}	10,9		105
J_{vO}	16,1		36
J_v	14,2		



Z 30

Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Irregolare
Area stendimento	(3 x 2) m ²
Latitudine	4234050,1871
Longitudine	566541,6680
Quota (m s.l.m.)	505
Direzione fronte	N 10 W

J_{vH}	33,5	Qc (MPa)	
J_{vV}	17,6		51
J_{vO}	19,4		40
J_v	23,5		



Z 31

Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Irregolare
Area stendimento	(3 x 2) m ²
Latitudine	4232790,8818
Longitudine	565197,0068
Quota (m s.l.m.)	585
Direzione fronte	N 80 W

J_{vH}	19,7	Qc (MPa)	
J_{vV}	18,9		24
J_{vO}	18,9		24
J_v	19,1		



Z 32

Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Int. Fratturato
Area stendimento	(3 x 2) m ²
Latitudine	4233907,4650
Longitudine	564646,5520
Quota (m s.l.m.)	189
Direzione fronte	N 35 E

J_{vH}	45,2	Qc (MPa)	
J_{vV}	36,0		35
J_{vO}	37,1		44
J_v	38,4		



Z 33

Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Irregolare
Area stendimento	(3 x 2) m ²
Latitudine	4236307,8865
Longitudine	569579,6936
Quota (m s.l.m.)	465
Direzione fronte	N 30 W

J_{vH}	13,5	Qc (MPa)	
J_{vV}	11,8		26
J_{vO}	14,6		75
J_v	13,3		



Z 34

Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Int. fratturato
Area stendimento	(2,5 x 2) m ²
Latitudine	4233969,0931
Longitudine	562570,7641
Quota (m s.l.m.)	70
Direzione fronte	N 10 E

J_{vH}	24,0	Qc (MPa)	
J_{vV}	34,0		17
J_{vO}	33,0		54
			31
J_v	30,3		



Z 35

Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Int. fratturato
Area stendimento	(2,5 x 2) m ²
Latitudine	4233526,3491
Longitudine	562710,5461
Quota (m s.l.m.)	180
Direzione fronte	N 10 E

J_{vH}	27,8	Qc (MPa)	
J_{vV}	26,4		17
J_{vO}	30,9		20
J_v	28,4		



Z 36

Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Irregolare
Area stendimento	(2,5 x 2) m ²
Latitudine	4233125,2356
Longitudine	563044,6121
Quota (m s.l.m.)	223
Direzione fronte	N 20 E

J_{vH}	14,7	Qc (MPa)	
J_{vV}	14,7		25
J_{vO}	13,6		
J_v	14,3		



Z 37

Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Irregolare
Area stendimento	(3 x 2) m ²
Latitudine	4233103,9796
Longitudine	563145,8156
Quota (m s.l.m.)	260
Direzione fronte	N 40 E

J_{vH}	13,7	Qc (MPa)	
J_{vV}	10,9		31
J_{vO}	11,9		20
J_v	12,1		



Z 38

Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Irregolare
Area stendimento	(3 x 2) m ²
Latitudine	4232981,9231
Longitudine	562963,4802
Quota (m s.l.m.)	285
Direzione fronte	N 10 E

J_{vH}	11,8	Qc (MPa)	
J_{vV}	12,4		23
J_{vO}	15,0		19
J_v	13,1		



Z 39

Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Irregolare
Area stendimento	(2 x 2) m ²
Latitudine	4232722,6437
Longitudine	562579,7882
Quota (m s.l.m.)	415
Direzione fronte	N 25 E

J_{vH}	10,1	Qc (MPa)	
J_{vV}	6,7		47
J_{vO}	8,7		32
			38
J_v	8,5		



Z 40

Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Irregolare
Area stendimento	(2 x 2) m ²
Latitudine	4232411,0738
Longitudine	564409,2746
Quota (m s.l.m.)	592
Direzione fronte	N 70 E

J_{vH}	11,6	Qc (MPa)	
J_{vV}	12,7		21
J_{vO}	17,0		25
J_v	13,7		



S 1

Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Irregolare
Area stendimento	(3 x 2) m ²
Latitudine	4233141,6738
Longitudine	561615,6198
Quota (m s.l.m.)	440
Direzione fronte	N 20 W

J_{vH}	12,0	Qc (MPa)	
J_{vV}	11,0		38
J_{vO}	16,0		42
			34
J_v	13,0		



S 2		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Irregolare	
Area stendimento	(3 x 2) m ²	
Latitudine	4233092,9354	
Longitudine	561625,6906	
Quota (m s.l.m.)	435	
Direzione fronte	N 20 W	
J_{vH}	7,7	Qc (MPa)
J_{vV}	11,0	44
J_{vO}	8,1	44
J_v	8,9	



S 3		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Irregolare	
Area stendimento	(3 x 2) m ²	
Latitudine	4233075,2165	
Longitudine	561646,0085	
Quota (m s.l.m.)	435	
Direzione fronte	N 80 E	
J_{vH}	6,7	Qc (MPa)
J_{vV}	6,7	40
J_{vO}	10,0	41
		51
J_v	7,8	



S 4		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Irregolare	
Area stendimento	(3 x 2) m ²	
Latitudine	4233086,5320	
Longitudine	561664,3439	
Quota (m s.l.m.)	424	
Direzione fronte	N 40 E	
J_{vH}	15,3	Qc (MPa)
J_{vV}	10,7	38
J_{vO}	10,0	
J_v	12,0	



S 5		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Irregolare	
Area stendimento	(3 x 2) m ²	
Latitudine	4233188,2797	
Longitudine	561832,5530	
Quota (m s.l.m.)	404	
Direzione fronte	N 60 W	
J_{vH}	11,3	Qc (MPa)
J_{vV}	13,0	30
J_{vO}	10,0	44
		40
J_v	11,4	



S 6		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Irregolare	
Area stendimento	(3 x 2) m ²	
Latitudine	4233158,2582	
Longitudine	561839,4124	
Quota (m s.l.m.)	398	
Direzione fronte	N - S	
J_{vH}	11,3	Qc (MPa)
J_{vV}	10,0	44
J_{vO}	10,0	44
J_v	10,4	



S 7		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Irregolare	
Area stendimento	(3 x 2) m ²	
Latitudine	4233072,4906	
Longitudine	561867,2718	
Quota (m s.l.m.)	395	
Direzione fronte	N 20 W	
J_{vH}	22,0	Qc (MPa)
J_{vV}	20,0	17
J_{vO}	22,3	28
		51
J_v	21,4	



S 8		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Irregolare	
Area stendimento	(3 x 2) m ²	
Latitudine	4232987,1859	
Longitudine	561946,2658	
Quota (m s.l.m.)	382	
Direzione fronte	N 50 W	
J_{vH}	20,7	Qc (MPa)
J_{vV}	17,0	37
J_{vO}	10,7	
J_v	16,1	



S 9		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Irregolare	
Area stendimento	(3 x 2) m ²	
Latitudine	4233068,5414	
Longitudine	561880,0608	
Quota (m s.l.m.)	383	
Direzione fronte	N 25 W	
J_{vH}	12,0	Qc (MPa)
J_{vV}	9,3	44
J_{vO}	9,3	
J_v	10,2	



S 10		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Irregolare	
Area stendimento	(3 x 2) m ²	
Latitudine	4233133,3578	
Longitudine	561856,8499	
Quota (m s.l.m.)	380	
Direzione fronte	N 20 E	
J_{vH}	21,0	Qc (MPa)
J_{vV}	13,0	40
J_{vO}	19,0	32
		44
J_v	17,7	



S 11		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Irregolare	
Area stendimento	(3 x 2) m ²	
Latitudine	4233281,1109	
Longitudine	561822,3767	
Quota (m s.l.m.)	374	
Direzione fronte	N 30 W	
J_{vH}	15,3	Qc (MPa)
J_{vV}	14,0	37
J_{vO}	21,3	37
J_v	16,9	



S 12		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Irregolare	
Area stendimento	(2 x 2) m ²	
Latitudine	4233307,5709	
Longitudine	561660,2182	
Quota (m s.l.m.)	350	
Direzione fronte	E - W	
J_{vH}	13,0	Qc (MPa)
J_{vV}	14,0	38
J_{vO}	16,0	37
J_v	14,3	



S 13		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Irregolare	
Area stendimento	(2,5 x 2) m ²	
Latitudine	4233381,9243	
Longitudine	561602,6615	
Quota (m s.l.m.)	347	
Direzione fronte	N 10 W	
J_{vH}	13,3	Qc (MPa)
J_{vV}	17,0	52
J_{vO}	19,0	51
		16
J_v	16,4	28



S 14		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Irregolare	
Area stendimento	(3 x 2) m ²	
Latitudine	4233401,7106	
Longitudine	561646,6356	
Quota (m s.l.m.)	310	
Direzione fronte	N 30 W	
J_{vH}	16,0	Qc (MPa)
J_{vV}	10,0	38
J_{vO}	10,0	38
		38
J_v	12,0	



S 15		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Irregolare	
Area stendimento	(3 x 2) m ²	
Latitudine	4233422,9806	
Longitudine	561693,1105	
Quota (m s.l.m.)	296	
Direzione fronte	N 60 E	
J_{vH}	12,7	Qc (MPa)
J_{vV}	12,0	32
J_{vO}	6,7	56
		44
J_v	10,4	



S 16		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Irregolare	
Area stendimento	(3 x 2) m ²	
Latitudine	4233455,4262	
Longitudine	561867,1390	
Quota (m s.l.m.)	299	
Direzione fronte	N 70 E	
J_{vH}	12,0	Qc (MPa)
J_{vV}	8,7	44
J_{vO}	8,0	
J_v	9,6	



S 17		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Irregolare	
Area stendimento	(3 x 2) m ²	
Latitudine	4233379,2933	
Longitudine	561719,3192	
Quota (m s.l.m.)	335	
Direzione fronte	N 15 E	
J_{vH}	18,7	Qc (MPa)
J_{vV}	12,0	37
J_{vO}	15,0	
J_v	15,2	



S 18		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Irregolare	
Area stendimento	(3 x 2) m ²	
Latitudine	4233330,3945	
Longitudine	561722,7869	
Quota (m s.l.m.)	345	
Direzione fronte	N 50 E	
J_{vH}	16,0	Qc (MPa)
J_{vV}	14,0	39
J_{vO}	17,0	33
		37
J_v	15,7	



S 19		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Irregolare	
Area stendimento	(3 x 2) m ²	
Latitudine	4233116,6050	
Longitudine	561379,9286	
Quota (m s.l.m.)	454	
Direzione fronte	N 40 W	
J_{vH}	14,7	Qc (MPa)
J_{vV}	14,0	17
J_{vO}	20,0	51
		42
J_v	16,2	



S 20		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Irregolare	
Area stendimento	$(2 \times 1,5) \text{ m}^2$	
Latitudine	4233116,6453	
Longitudine	561472,0126	
Quota (m s.l.m.)	468	
Direzione fronte	N - S	
J_{vH}	11,3	Qc (MPa)
J_{vV}	12,0	42
J_{vO}	10,0	33
J_v	11,1	



S 21		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Irregolare	
Area stendimento	$(3 \times 2) \text{ m}^2$	
Latitudine	4233086,8737	
Longitudine	561486,6743	
Quota (m s.l.m.)	471	
Direzione fronte	N 20 W	
J_{vH}	24,0	Qc (MPa)
J_{vV}	18,0	32
J_{vO}	24,0	33
J_v	22,0	



S 22		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Irregolare	
Area stendimento	$(3 \times 2) \text{ m}^2$	
Latitudine	4233096,1999	
Longitudine	560950,9921	
Quota (m s.l.m.)	420	
Direzione fronte	N 20 E	
J_{vH}	19,3	Qc (MPa)
J_{vV}	12,0	44
J_{vO}	15,3	30
J_v	15,6	



S 23		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Int. Fratturato	
Area stendimento	$(2 \times 1,5) \text{ m}^2$	
Latitudine	4233344,1469	
Longitudine	561375,1356	
Quota (m s.l.m.)	374	
Direzione fronte	N 70 W	
J_{vH}	21,3	Qc (MPa)
J_{vV}	24,7	32
J_{vO}	20,7	32
J_v	22,2	



S 24		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Irregolare	
Area stendimento	$(2,5 \times 1,5) \text{ m}^2$	
Latitudine	4233147,3977	
Longitudine	561437,7985	
Quota (m s.l.m.)	448	
Direzione fronte	N - S	
J_{vH}	14,7	Qc (MPa)
J_{vV}	28,0	51
J_{vO}	16,0	23
		38
J_v	19,6	



S 25		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Int. Fratturato	
Area stendimento	$(3 \times 2) \text{ m}^2$	
Latitudine	4233317,8001	
Longitudine	561327,9117	
Quota (m s.l.m.)	392	
Direzione fronte	N - S	
J_{vH}	26,7	Qc (MPa)
J_{vV}	24,0	32
J_{vO}	29,0	33
		32
J_v	26,6	



S 26

Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Irregolare
Area stendimento	(3 x 2) m ²
Latitudine	4233712,6746
Longitudine	561153,2165
Quota (m s.l.m.)	154
Direzione fronte	E - W

J_{vH}	21,3	Qc (MPa)	
J_{vV}	26,0		32
J_{vO}	22,7		
J_v	23,3		



S 27

Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Irregolare
Area stendimento	(3 x 2) m ²
Latitudine	4233450,9930
Longitudine	560081,1894
Quota (m s.l.m.)	23
Direzione fronte	N - S

J_{vH}	30,0	Qc (MPa)	
J_{vV}	27,0		17
J_{vO}	34,0		44
J_v	30,3		



S 28

Litotipo	Gneiss
Tipo di ammasso	Irregolare
Area stendimento	(2 x 1,5) m ²
Latitudine	4233749,6194
Longitudine	560698,5338
Quota (m s.l.m.)	52
Direzione fronte	N 30 W

J_{vH}	12,0	Qc (MPa)	
J_{vV}	9,0		38
J_{vO}	13,0		38
J_v	11,3		



S 29		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Irregolare	
Area stendimento	(3 x 2) m ²	
Latitudine	4233343,4283	
Longitudine	561334,6237	
Quota (m s.l.m.)	376	
Direzione fronte	E - W	
J_{vH}	12,7	Qc (MPa)
J_{vV}	16,7	41
J_{vO}	10,0	42
		32
J_v	13,1	



STZ 1		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Irregolare	
Area stendimento	(2 x 2) m ²	
Latitudine	4232346,2905	
Longitudine	559500,7660	
Quota (m s.l.m.)	190	
Direzione fronte	N 80 W	
J_{vH}	18,2	Qc (MPa)
J_{vV}	15,3	54
J_{vO}	20,7	55
J_v	18,1	



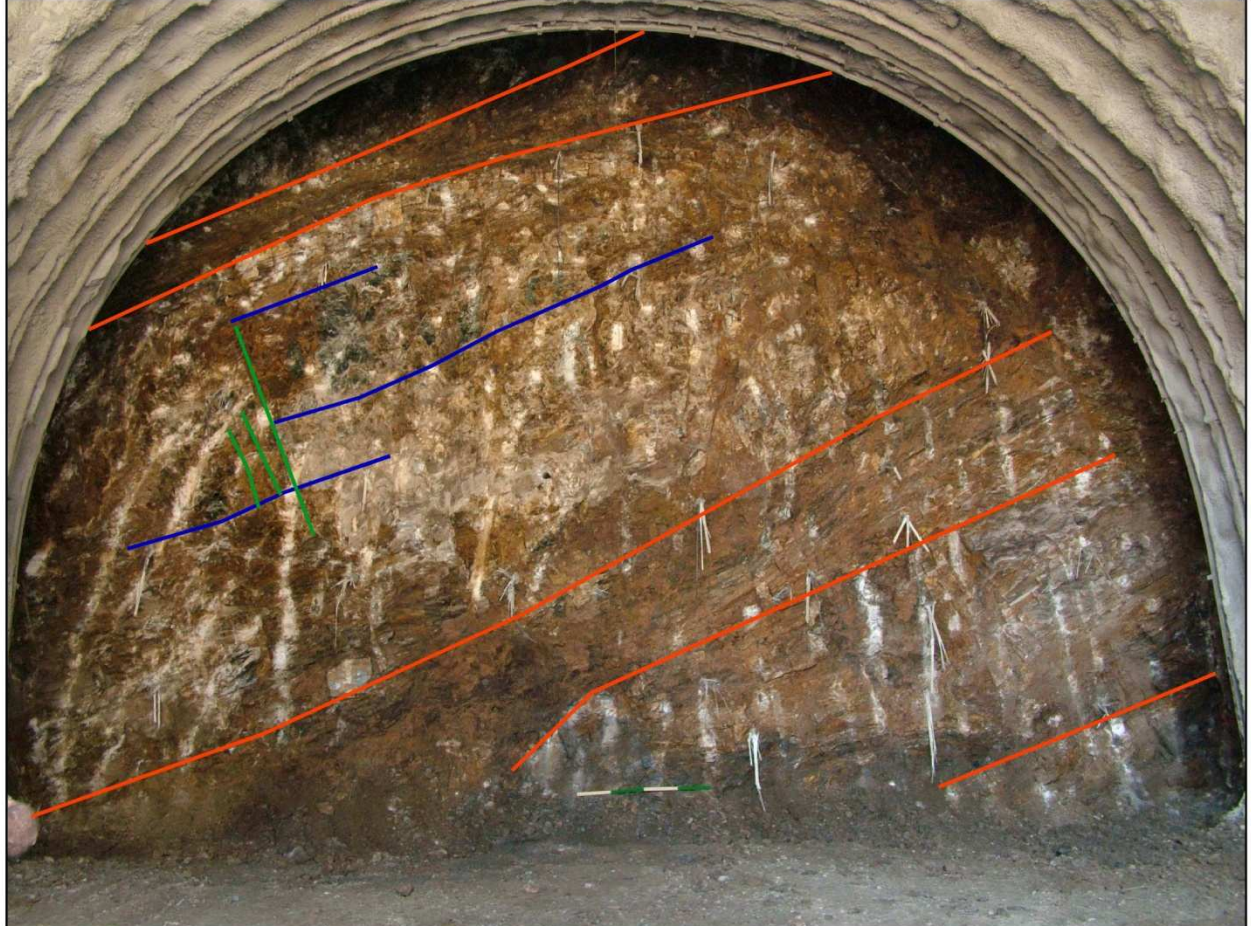
STZ 2		
Litotipo	Gneiss	
Tipo di ammasso	Int. fratturato	
Area stendimento	(3 x 2) m ²	
Latitudine	4232524,6698	
Longitudine	559331,4460	
Quota (m s.l.m.)	69	
Direzione fronte	N 70 W	
J_{vH}	25,2	Qc (MPa)
J_{vV}	22,3	21
J_{vO}	21,3	22
J_v	22,9	



APPENDICE 3

SCHEDE GEOMECCANICHE DI SINTESI DEI 27 RILIEVI SU FRONTI DI SCAVO IN GALLERIA

Data e ora:	N° stazione	Galleria	Canna	Imbocco	Sezione
12/07/2008	G2	Cacciapuiu	S	S	B2
Progressiva	Relativa (m)	13,00	Profondita' (m)		Quota (mslm)
	Assoluta (km)	412.041,79	36,40		461,60
Area stendimento (mq)	Direzione fronte		Litotipo		Stato di ammasso
140	N 50° W (310°)		Gneiss		Irregolare



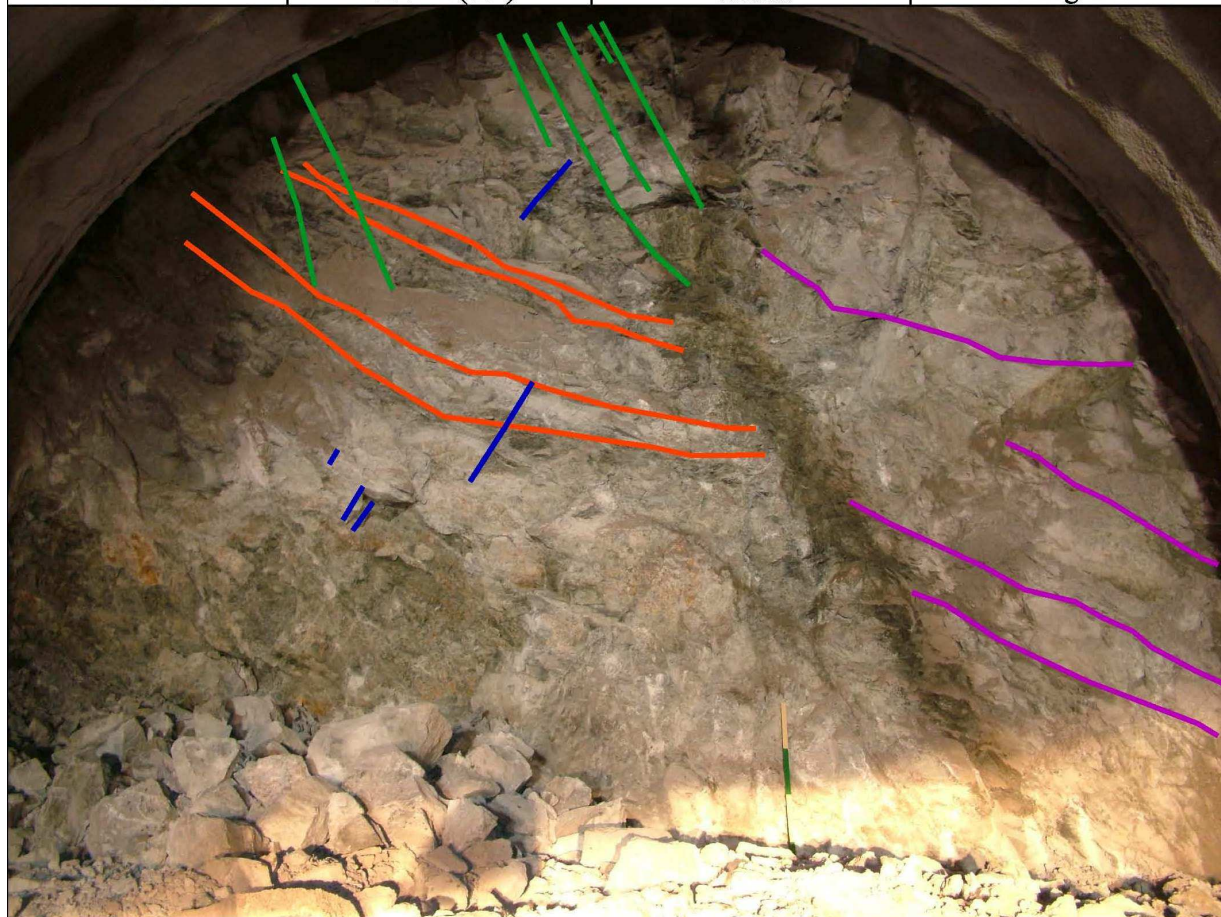
	Sistema	Immersione (°) *	Inclinazione (°) *	Spaziatura media (cm)	
				Disto	Foto
	Sistema 1	280	30	11,6	
	Sistema 2	220	40	44,1	
	Sistema 3	90	70	26,2	

* L'immersione e l'inclinazione sono ste misurate in sito.

		M*	C**	Ib (cm)	Disto	27,3
Jv	Standard	8,7	X		Foto	27,8
	Disto	3,8	X		Standard	15,9
	Foto	3,2	X			

*' M: Jv misurato; **' C: Jv ottenuto tramite correlazione.

Data e ora:	N° stazione	Galleria	Canna	Imbocco	Sezione
13/07/2008	G3	Muro	N	N	A1C
Progressiva	Relativa (m)	229,76	Profondità (m)		Quota (mslm)
	Assoluta (km)	416.481,60	100,60		320,40
Area stendimento (mq)	Direzione fronte		Litotipo		Stato di ammasso
140	N 60° E (60°)		Gneiss		Irregolare



	Sistema	Immersione (°) *	Inclinazione (°) *	Spaziatura media (cm)	
				Disto	Foto
	Sistema 1	30	50	43,6	38,0
	Sistema 2	180	55	73,9	29,1
	Sistema 3	340	60	14,9	64,7
	Sistema 4	250	70	62,0	60,0

* L'immersione e l'inclinazione sono state misurate in sito.

		M [*]	C ^{**}	Ib (cm)	Disto	40,2	
Jv	Standard	14,3	<input checked="" type="checkbox"/>			Foto	54,3
	Disto	5,6	<input checked="" type="checkbox"/>			Standard	15,1
	Foto	4,2	<input checked="" type="checkbox"/>				

*: Jv misurato in sito; **: Jv ottenuto tramite correlazione.

Data e ora:	N° stazione	Galleria	Canna	Imbocco	Sezione
14/07/2008	G6	Cacciapuiu	N	N	B0
Progressiva	Relativa (m)	135,00	Profondità (m)		Quota (mslm)
	Assoluta (km)	411.831,65	77,70		470,90
Area stendimento (mq)	Direzione fronte		Litotipo		Stato di ammasso
140	N 40° W (320°)		Gneiss		Irregolare



	Sistema	Immersione (°)*	Inclinazione (°)*	Spaziatura media (cm)	
				Disto	Foto
	Sistema 1	250	50	21,2	4,0
	Sistema 2	300	44	54,5	103,0
	Sistema 3	215	65	21,5	11,0

* L'immersione e l'inclinazione sono state misurate in sito.

		M*'	C*''	Ib (cm)	Disto	32,4
Jv	Standard	13,5	X		Foto	39,5
	Disto	5,3	X		Standard	12,4
	Foto	3,9	X			

*' M: Jv misurato in sito; *'' C: Jv ottenuto tramite correlazione.

Data e ora:	N° stazione	Galleria	Canna	Imbocco	Sezione
16/07/2008	G7	Brancato	N	N	B0
Progressiva	Relativa (m)	1.004,28	Profondita' (m)		Quota(mslm)
	Assoluta (km)	418.734,57	168,40		231,70
Area stendimento (mq)	Direzione fronte		Litotipo		Stato di ammasso
140	N 10° W (350°)		Gneiss		Irregolare



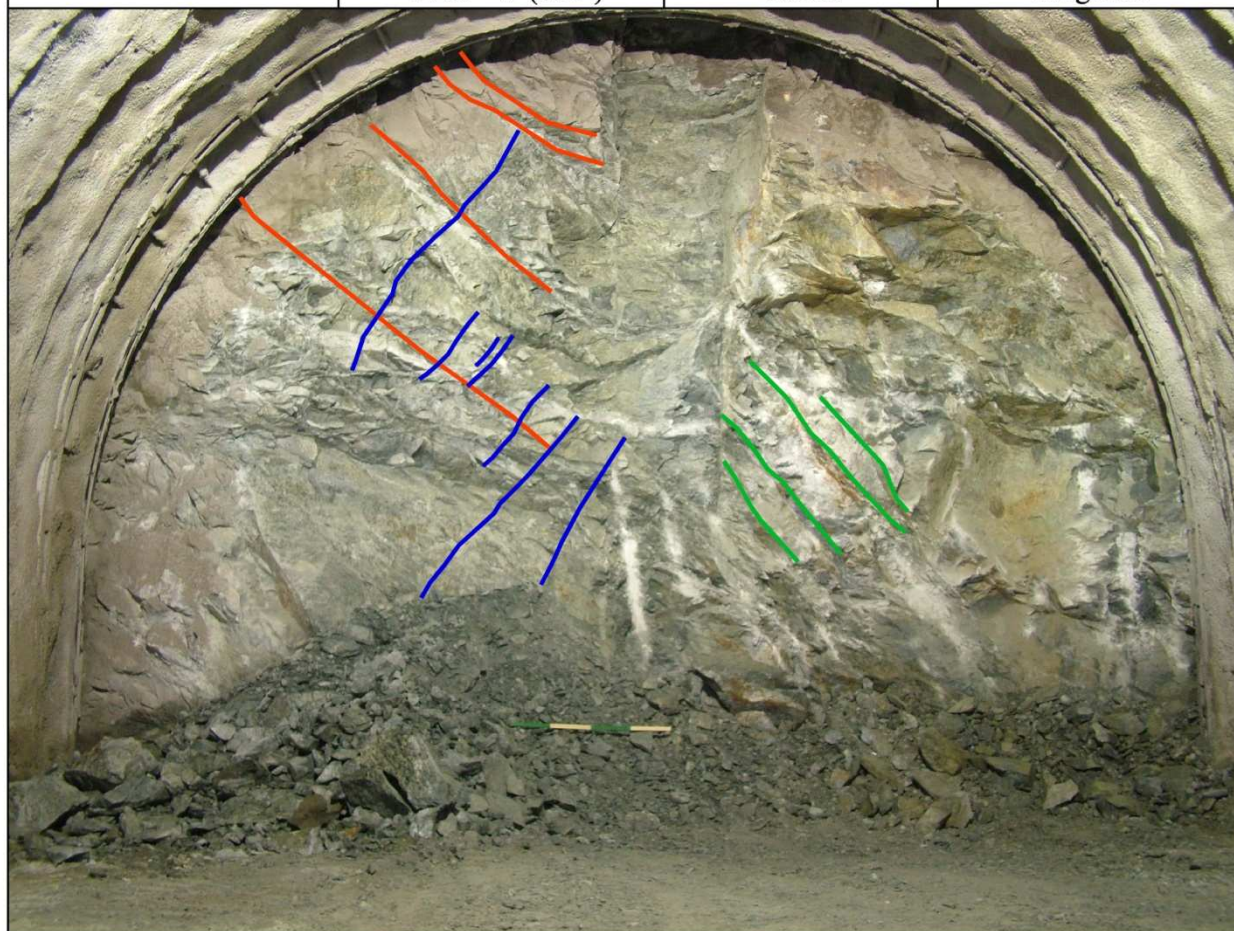
	Sistema	Immersione (°)*	Inclinazione (°)*	Spaziatura media (cm)	
				Disto	Foto
	Sistema 1	270	40	46,3	16,1
	Sistema 2	185	78	51,0	66,0
	Sistema 3	50	65	31,5	

* L'immersione e l'inclinazione sono state misurate in sito.

		M*'	C*''	Ib (cm)	Disto	42,9
Jv	Standard	11,4	X		Foto	43,8
	Disto	4,5	X		Standard	17,5
	Foto	3,3	X			

*' M: Jv misurato in sito; *'' C: Jv ottenuto tramite correlazione.

Data e ora:	N° stazione	Galleria	Canna	Imbocco	Sezione
17/07/2008	G9	Muro	N	N	A1C
Progressiva	Relativa (m)	236,96	Profondita' (m)		Quota (mslm)
	Assoluta (km)	416.488,80	103,30		320,00
Area stendimento (mq)	Direzione fronte		Litotipo		Stato di ammasso
140	N 50° W (310°)		Gneiss		Irregolare



	Sistema	Immersione (°)*	Inclinazione (°)*	Spaziatura media (cm)	
				Disto	Foto
	Sistema 1	250	35	79,6	108,9
	Sistema 2	290	70	53,7	57,1
	Sistema 3	160	50	65,6	42,8

* L'immersione e l'inclinazione sono state misurate in sito.

		M*'	C*''	Ib (cm)	Disto	66,3
Jv	Standard	11,0	X		Foto	69,6
	Disto	4,3	X		Standard	26,3
	Foto	3,2	X			

*' M: Jv misurato; *'' C: Jv ottenuto tramite correlazione.

Data e ora:	N° stazione	Galleria	Canna	Imbocco	Sezione
17/07/2008	G10	Cacciapuiu	N	N	B0
Progressiva	Relativa (m)	143,40	Profondità (m)		Quota (mslm)
	Assoluta (km)	411.840,05	79,10		470,60
Area stendimento (mq)	Direzione fronte		Litotipo		Stato di ammasso
140	N 50° W (310°)		Gneiss		Irregolare



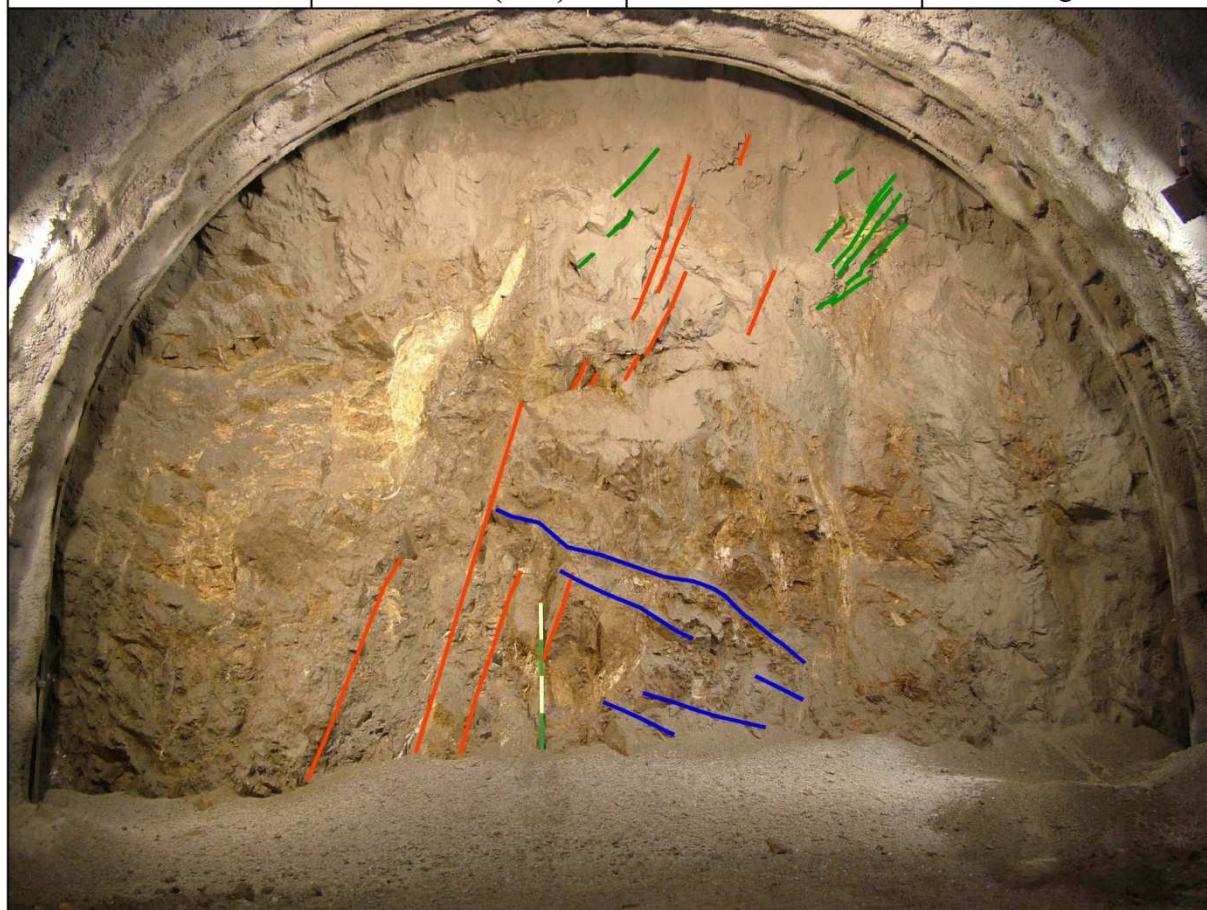
	Sistema	Immersione (°)*	Inclinazione (°)*	Spaziatura media (cm)	
				Disto	Foto
	Sistema 1	40	50	62,9	90,7
	Sistema 2	280	60	55,2	55,3
	Sistema 3	270	88	51,8	

* L'immersione e l'inclinazione sono state misurate in sito.

		M* ^I	C* ^{II}	Ib (cm)	Disto	56,6
Jv	Standard	7,2	X		Foto	57,7
	Disto	2,8	X		Standard	21,6
	Foto	2,1	X			

*^I M: Jv misurato; *^{II} C: Jv ottenuto tramite correlazione.

Data e ora:	N° stazione	Galleria	Canna	Imbocco	Sezione
19/07/2008	G11	Cacciapuiu	S	N	B0
Progressiva	Relativa (m)	130,40	Profondita' (m)		Quota (mslm)
	Assoluta (km)	411.793,05	73,50		471,00
Area stendimento (mq)	Direzione fronte		Litotipo		Stato di ammasso
140	N 40° W (320°)		Gneiss		Irregolare



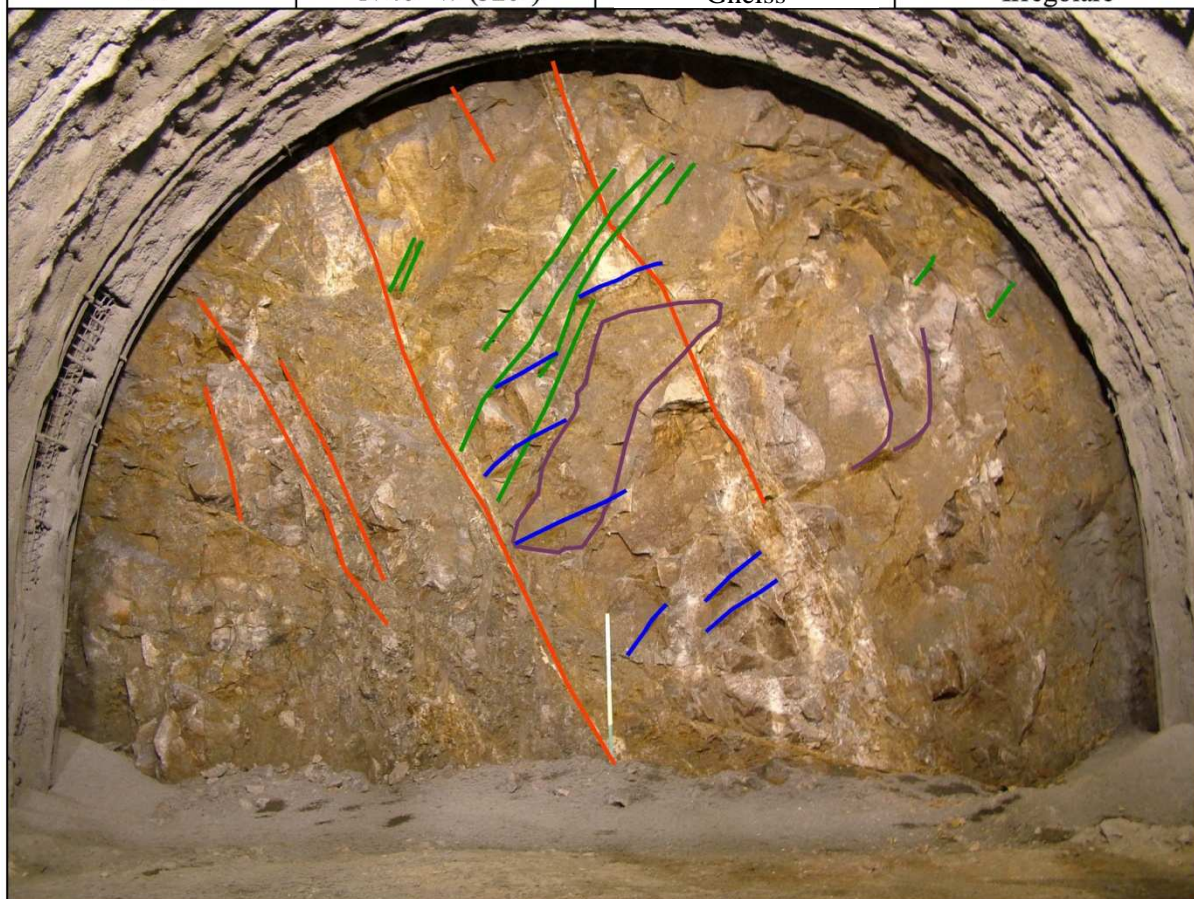
	Sistema	Immersione (°)*	Inclinazione (°)*	Spaziatura media (cm)	
				Disto	Foto
	Sistema 1	340	80	58,5	69,8
	Sistema 2	160	62	42,8	47,9
	Sistema 3	260	56	34,3	41,7

* L'immersione e l'inclinazione sono state misurate in sito.

		M*'	C*''	Ib (cm)	Disto	45,2
Jv	Standard	10,9	X		Foto	53,2
	Disto	4,8	X		Standard	17,2
	Foto	2,7	X			

*' M: Jv misurato; *'' C: Jv ottenuto tramite correlazione.

Data e ora:	N° stazione	Galleria	Canna	Imbocco	Sezione
21/07/2008	G12	Cacciapuiu	N	N	B0
Progressiva	Relativa (m)	153,20	Profondita' (m)		Quota (mslm)
	Assoluta (km)	411.849,85	79,90		470,20
Area stendimento (mq)	Direzione fronte		Litotipo		Stato di ammasso
140	N 40° W (320°)		Gneiss		Irregolare



	Sistema	Immersione (°)*	Inclinazione (°)*	Spaziatura media (cm)	
				Disto	Foto
	Sistema 1	300	60	109,2	112,1
	Sistema 2	80	50	29,5	22,3
	Sistema 3	180	60	75,5	49,8
	Sistema 4	60	80	27,6	29,0

* L'immersione e l'inclinazione sono state misurate in sito.

		M*	C**	Ib (cm)	Disto	44,2	
Jv	Standard	9,0	X			Foto	33,8
	Disto	4,5	X			Standard	16,4
	Foto	2,4	X				

*: Jv misurato in sito; **: Jv ottenuto tramite correlazione

Data e ora:	N° stazione	Galleria	Canna	Imbocco	Sezione
23/07/2008	G13	Cacciapuiu	S	N	B0
Progressiva	Relativa (m)	137,40	Profondita' (m)		Quota (mslm)
	Assoluta (km)	411.800,05	73,80		470,60
Area stendimento (mq)	Direzione fronte		Litotipo		Stato di ammasso
140	N 30° W (330°)		Gneiss		Irregolare



	Sistema	Immersione (°)*	Inclinazione (°)*	Spaziatura media (cm)	
				Disto	Foto
	Sistema 1	10	45	49,7	77,6
	Sistema 2	210	54	27,4	27,4
	Sistema 3	110	70	122,8	119,1

* L'immersione e l'inclinazione sono state misurate in sito.

		M*'	C*''	Ib (cm)	Disto	66,6	
Jv	Standard	10,6	X			Foto	74,7
	Disto	4,9	X			Standard	27,4
	Foto	4,6	X				

*' M: Jv misurato; *' C: Jv ottenuto tramite correlazione.

Data e ora:	N° stazione	Galleria	Canna	Imbocco	Sezione
24/07/2008	G14	Cacciapuiu	N	N	B0
Progressiva	Relativa (m)	156,00	Profondita' (m)		Quota (mslm)
	Assoluta (km)	411.852,65	80,00		470,10
Area stendimento (mq)	Direzione fronte		Litotipo		Stato di ammasso
140	N 40° W (320°)		Gneiss		Irregolare



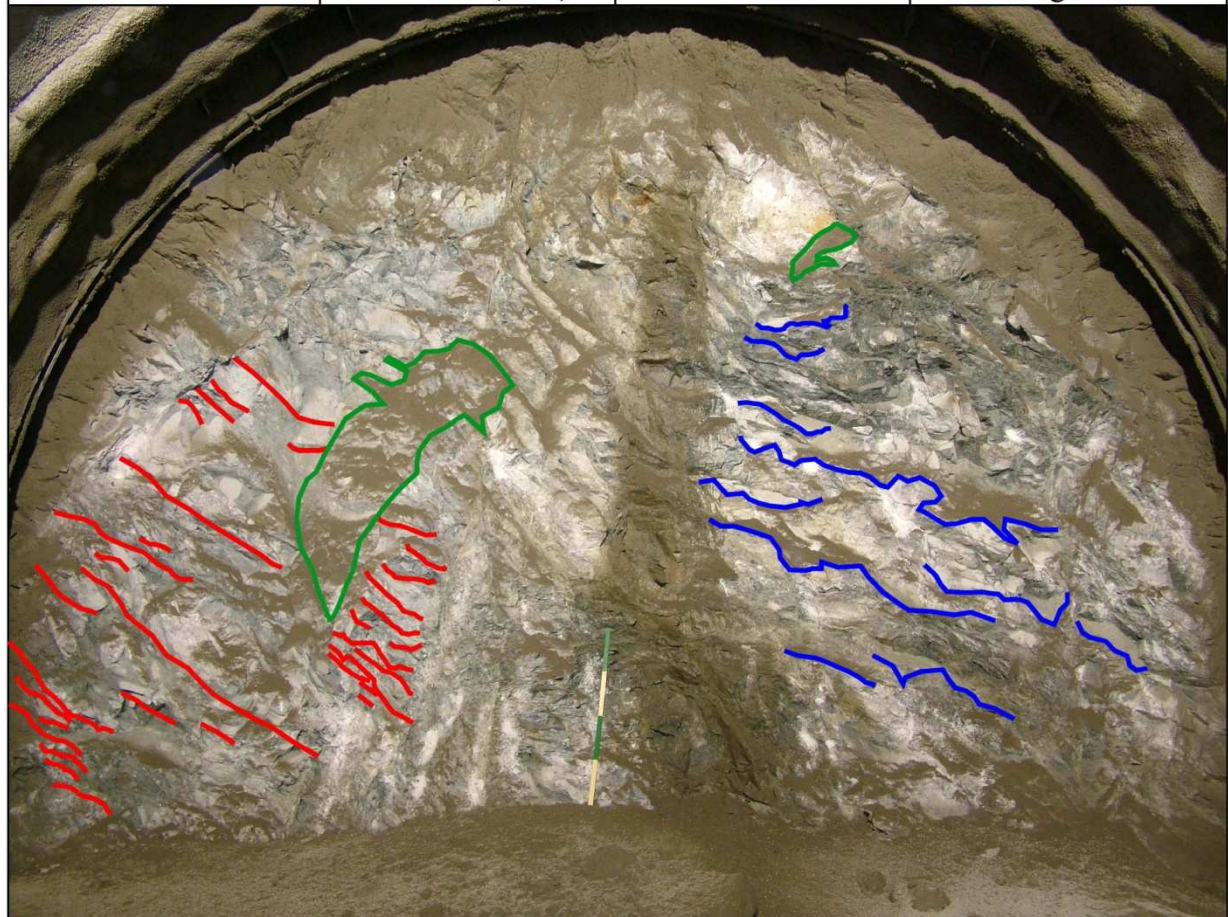
	Sistema	Immersione (°) *	Inclinazione (°) *	Spaziatura media (cm)	
				Disto	Foto
	Sistema 1	190	50	59,7	86,1
	Sistema 2	280	65	48,7	51,2
	Sistema 3	80	70	36,6	43,0

* L'immersione e l'inclinazione sono state misurate in sito.

		M*	C**	Ib (cm)	Disto	48,3
Jv	Standard	10,9	X		Foto	60,1
	Disto	4,4	X		Standard	19,3
	Foto	3,2	X			

*' M: Jv misurato; ** C: Jv ottenuto tramite correlazione.

Data e ora:	N° stazione	Galleria	Canna	Imbocco	Sezione
25/07/2008	G15	Muro	N	N	A1C
Progressiva	Relativa (m)	247,06	Profondita' (m)		Quota (mslm)
	Assoluta(km)	416.498,90	106,50		319,70
Area stendimento (mq)	Direzione fronte		Litotipo		Stato di ammasso
140	N 55° W (305°)		Gneiss		Irregolare



	Sistema	Immersione (°) *	Inclinazione (°) *	Spaziatura media (cm)	
				Disto	Foto
	Sistema 1	240	20	52,2	38,7
	Sistema 2	40	60	31,6	25,6
	Sistema 3	80	72	82,7	

* L'immersione e l'inclinazione sono state misurate in sito.

		M*' C**	Ib (cm)	Disto	55,5	
Jv	Standard	12,4		X	Foto	56,6
	Disto	5,5			Standard	22,3
	Foto	3,9				

*' M: Jv misurato; ** C: Jv ottenuto tramite correlazione.

Data e ora:	N° stazione	Galleria	Canna	Imbocco	Sezione
26/07/2008	G16	Cacciapuiu	S	N	B0
Progressiva	Relativa (m)	138,80	Profondita' (m)		Quota (mslm)
	Assoluta (km)	411.801,45	73,70		470,60
Area stendimento (mq)	Direzione fronte		Litotipo		Stato di ammasso
140	N 40° W (320°)		Gneiss		Irregolare



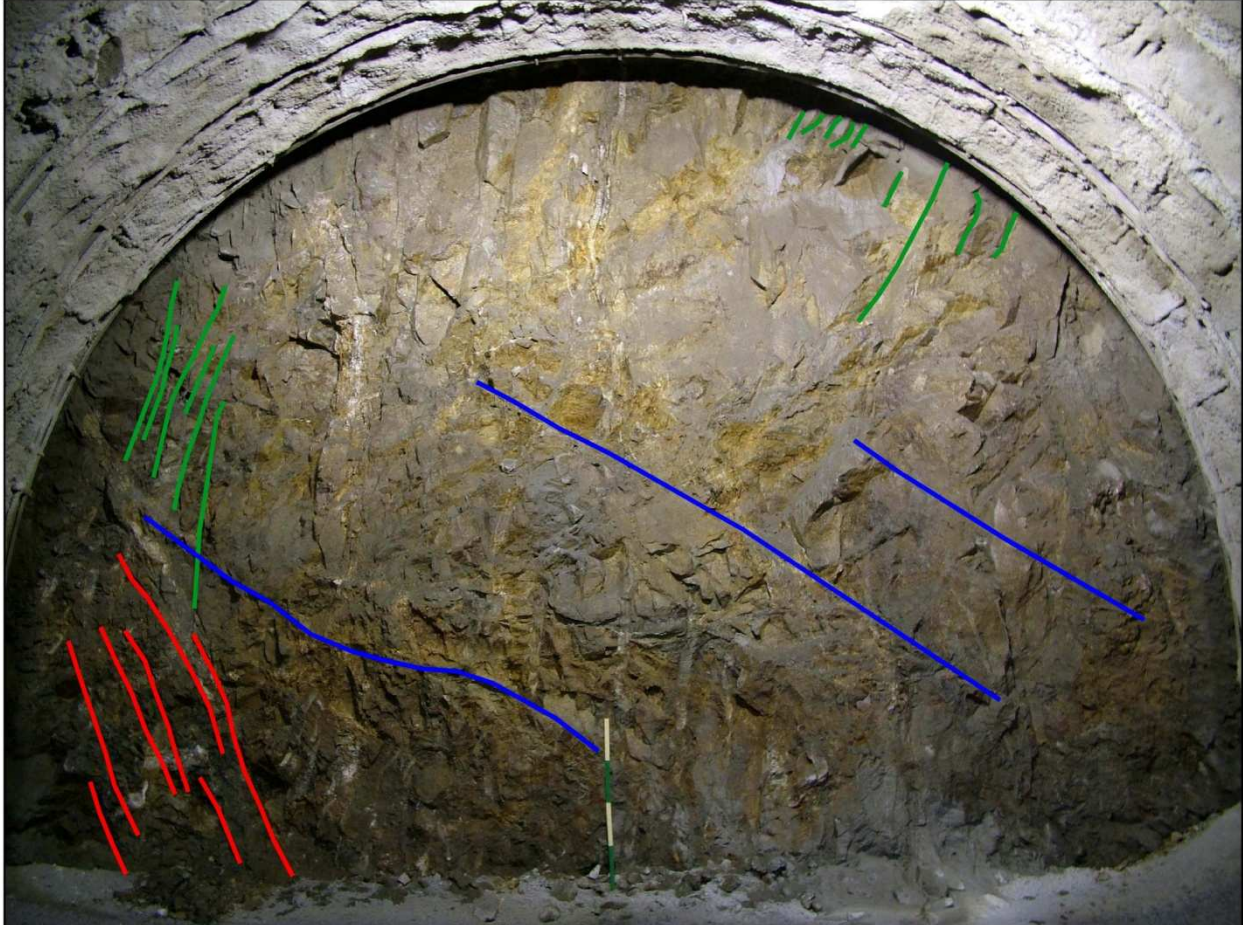
	Sistema	Immersione (°)*	Inclinazione (°)*	Spaziatura media (cm)	
				Disto	Foto
	Sistema 1	340	50	53,5	44,9
	Sistema 2	110	58	97,7	118,9
	Sistema 3	200	80	42,3	20,1

* L'immersione e l'inclinazione sono state misurate in sito.

		M*'	C*''	Ib (cm)		
Jv	Standard	10,5	X		Disto	64,5
	Disto	6,9	X		Foto	61,3
	Foto	3,5	X		Standard	25,1

*' M: Jv misurato; *'' C: Jv ottenuto tramite correlazione.

Data e ora:	N° stazione	Galleria	Canna	Imbocco	Sezione
26/07/2008	G17	Cacciapuiu	N	N	B0
Progressiva	Relativa (m)	160,20	Profondita' (m)		Quota (mslm)
	Assoluta (km)	411.856,85	80,30		469,90
Area stendimento (mq)	Direzione fronte		Litotipo		Stato di ammasso
140	N 40° W (320°)		Gneiss		Irregolare



	Sistema	Immersione (°)*	Inclinazione (°)*	Spaziatura media (cm)	
				Disto	Foto
	Sistema 1	300	80	75,9	28,7
	Sistema 2	340	28	77,4	159,6
	Sistema 3	120	85	74,0	16,7

* L'immersione e l'inclinazione sono state misurate in sito.

		M*'	C*''	Ib (cm)	Disto	75,8
Jv	Standard	12,1	⊗		Foto	68,3
	Disto	3,3	⊗		Standard	30,4
	Foto	3,2	⊗			

*' M: Jv misurato; *'' C: Jv ottenuto tramite correlazione.

Data e ora:	N° stazione	Galleria	Canna	Imbocco	Sezione
29/07/2008	G18	Cacciapuiu	S	N	B0
Progressiva	Relativa (m)	140,20	Profondita' (m)		Quota (mslm)
	Assoluta (km)	411.802,85	73,80		470,50
Area stendimento (mq)	Direzione fronte		Litotipo		Stato di ammasso
140	N 40° W (320°)		Gneiss		Irregolare



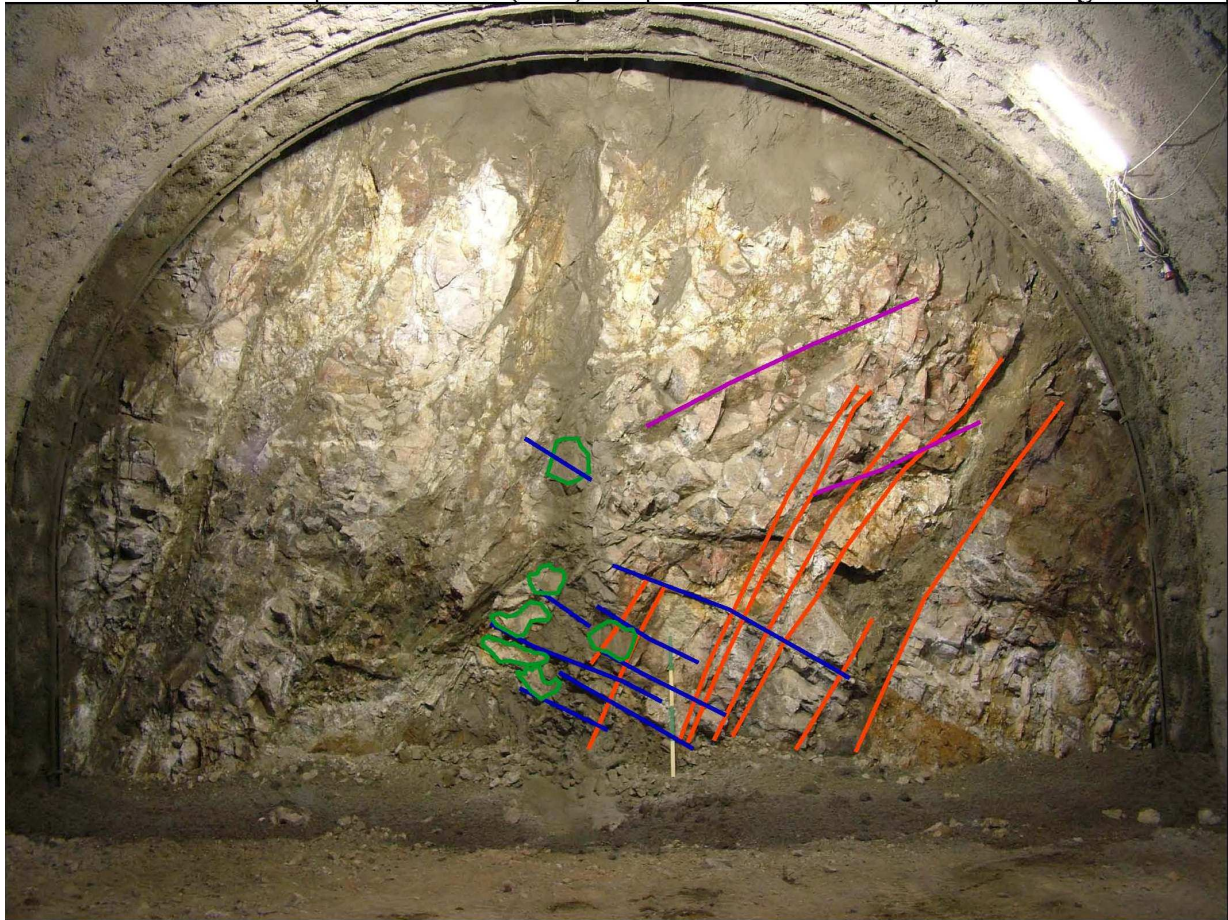
	Sistema	Immersione (°)*	Inclinazione (°)*	Spaziatura media (cm)	
				Disto	Foto
	Sistema 1	310	35	45,9	61,7
	Sistema 2	80	60	68,7	
	Sistema 3	15	84	30,7	35,6

* L'immersione e l'inclinazione sono state misurate in sito.

			M*'	C*''			
Jv	Standard	9,0	X		Ib (cm)	Disto	48,4
	Disto	5,3	X			Foto	49,4
	Foto	2,8	X			Standard	18,7

*' M: Jv misurato; *'' C: Jv ottenuto tramite correlazione.

Data e ora:	N° stazione	Galleria	Canna	Imbocco	Sezione
18/09/2008	G19	Cacciapuiu	N	N	B0
Progressiva	Relativa (m)	256,80	Profondita' (m)		Quota (mslm)
	Assoluta (km)	411.953,45	80,70		466,40
Area stendimento (mq)	Direzione fronte		Litotipo		Stato di ammasso
140	N 40° W (320°)		Gneiss		Irregolare



	Sistema	Immersione (°)*	Inclinazione (°)*	Spaziatura media (cm)	
				Disto	Foto
	Sistema 1	150	70	79,2	56,3
	Sistema 2	300	45	48,0	35,1
	Sistema 3	40	72	22,3	23,6
	Sistema 4	240	60	28,8	

* L'immersione e l'inclinazione sono state misurate in sito.

Jv	Standard	12,1	M*	C**	Ib (cm)	Disto	33,0		
								Foto	38,3
								Standard	13,5

* M: Jv misurato; ** C: Jv ottenuto tramite correlazione.

Data e ora:	N° stazione	Galleria	Canna	Imbocco	Sezione
19/09/2008	G20	Cacciapuiu	N	N	B0
Progressiva	Relativa (m)	258,20	Profondita' (m)		Quota (mslm)
	Assoluta (km)	411.954,85	80,90		466,20
Area stendimento (mq)	Direzione fronte		Litotipo		Stato di ammasso
140	N 45° W (315°)		Gneiss		Irregolare



	Sistema	Immersione (°)*	Inclinazione (°)*	Spaziatura media (cm)	
				Disto	Foto
	Sistema 1	140	55	114,1	106,8
	Sistema 2	350	40	46,6	57,6
	Sistema 3	260	70	31,0	

* L'immersione e l'inclinazione sono state misurate in sito.

		M*	C**	Ib (cm)		
Jv	Standard	12,0	X		Disto	63,9
	Disto	3,8	X		Foto	65,2
	Foto	3,5	X		Standard	30,7

*¹ M: Jv misurato; **¹ C: Jv ottenuto tramite correlazione.

Data e ora:	N° stazione	Galleria	Canna	Imbocco	Sezione
22/09/2008	G21	Cacciapuiu	N	N	B0
Progressiva	Relativa (m)	259,60	Profondità (m)		Quota (mslm)
	Assoluta (km)	411.956,24	80,80		466,30
Area stendimento (mq)	Direzione fronte		Litotipo		Stato di ammasso
140	N 40° W (320°)		Gneiss		Irregolare



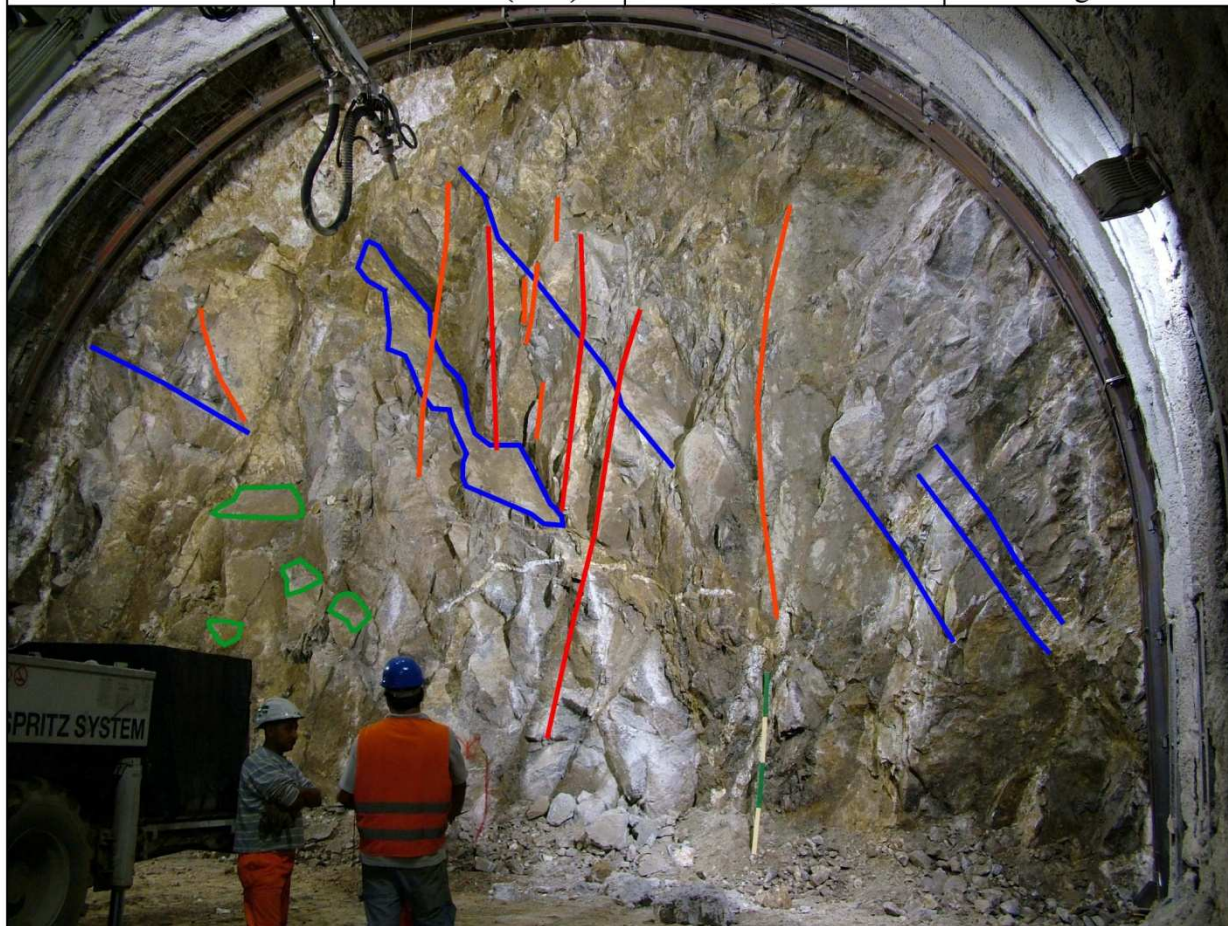
	Sistema	Immersione (°)*	Inclinazione (°)*	Spaziatura media (cm)	
				Disto	Foto
	Sistema 1	170	40	46,0	58,1
	Sistema 2	105	85	39,0	15,1
	Sistema 3	20	52	36,1	17,3

* L'immersione e l'inclinazione sono state misurate in sito.

		M* ¹	C* ¹¹	Ib (cm)	Disto	40,4			
Jv	Standard	13,0	⊗				Ib (cm)	Foto	30,2
	Disto	4,0	⊗					Standard	16,1
	Foto	3,2	⊗						

*¹ M: Jv misurato; *¹¹ C: Jv ottenuto tramite correlazione.

Data e ora:	N° stazione	Galleria	Canna	Imbocco	Sezione
22/09/2008	G22	Cacciapuiu	S	N	B0
Progressiva	Relativa (m)	230,48	Profondita' (m)		Quota (mslm)
	Assoluta (km)	411.893,13	73,30		467,20
Area stendimento (mq)	Direzione fronte		Litotipo		Stato di ammasso
140	N 30° W (330°)		Gneiss		Irregolare



	Sistema	Immersione (°)*	Inclinazione (°)*	Spaziatura media (cm)	
				Disto	Foto
	Sistema 1	100	85	66,8	48,5
	Sistema 2	340	35	80,1	52,6
	Sistema 3	40	40	58,4	35,5

* L'immersione e l'inclinazione sono state misurate in sito.

		M* ^I	C* ^{II}	Ib (cm)	Disto	68,4
Jv	Standard	11,9	X		Foto	45,5
	Disto	4,0	X		Standard	27,3
	Foto	3,5	X			

*^IM: Jv misurato; *^{II}C: Jv ottenuto tramite correlazione.

Data e ora:	N° stazione	Galleria	Canna	Imbocco	Sezione
26/09/2008	G23	Cacciapuiu	N	N	B0
Progressiva	Relativa (m)	262,40	Profondità (m)		Quota (mslm)
	Assoluta (km)	411.959,04	81,00		466,10
Area stendimento (mq)	Direzione fronte		Litotipo		Stato di ammasso
140	N 40° W (320°)		Gneiss		Irregolare



	Sistema	Immersione (°)*	Inclinazione (°)*	Spaziatura media (cm)	
				Disto	Foto
	Sistema 1	140	45	55,4	51,3
	Sistema 2	340	48	32,8	48,1
	Sistema 3	355	65	32,3	24,7

* L'immersione e l'inclinazione sono state misurate in sito.

		M*'	C*''	Ib (cm)	Disto	40,1		
Jv	Standard	14,8	⊗				Foto	41,3
	Disto	5,1	⊗					
	Foto	3,0	⊗					

*' M: Jv misurato; *'' C: Jv ottenuto tramite correlazione.

Data e ora:	N° stazione	Galleria	Canna	Imbocco	Sezione
24/09/2008	G24	Cacciapuiu	S	N	B0
Progressiva	Relativa (m)	237,48	Profondita' (m)		Quota (mslm)
	Assoluta (km)	411.900,13	73,10		466,90
Area stendimento (mq)	Direzione fronte		Litotipo		Stato di ammasso
140	N 40° W (320°)		Gneiss		Irregolare/massivo



	Sistema	Immersione (°)*	Inclinazione (°)*	Spaziatura media (cm)	
				Disto	Foto
	Sistema 1	315	45	59,8	97,0
	Sistema 2	220	62	37,3	9,4
	Sistema 3	145	65	72,4	84,2

* L'immersione e l'inclinazione sono state misurate in sito.

		M*	C**	Ib (cm)	Disto	56,5
Jv	Standard	14,4	X		Foto	63,5
	Disto	4,5	X		Standard	23,2
	Foto	4,2	X			

*' M: Jv misurato; ** C: Jv ottenuto tramite correlazione.

Data e ora:	N° stazione	Galleria	Canna	Imbocco	Sezione
24/09/2008	G25	Cacciapuiu	S	S	B2
Progressiva	Relativa (m)	49,00	Profondita' (m)		Quota (mslm)
	Assoluta (km)	412.005,08	55,10		462,90
Area stendimento (mq)	Direzione fronte		Litotipo		Stato di ammasso
100	N 50° W (310°)		Gneiss		Irregolare



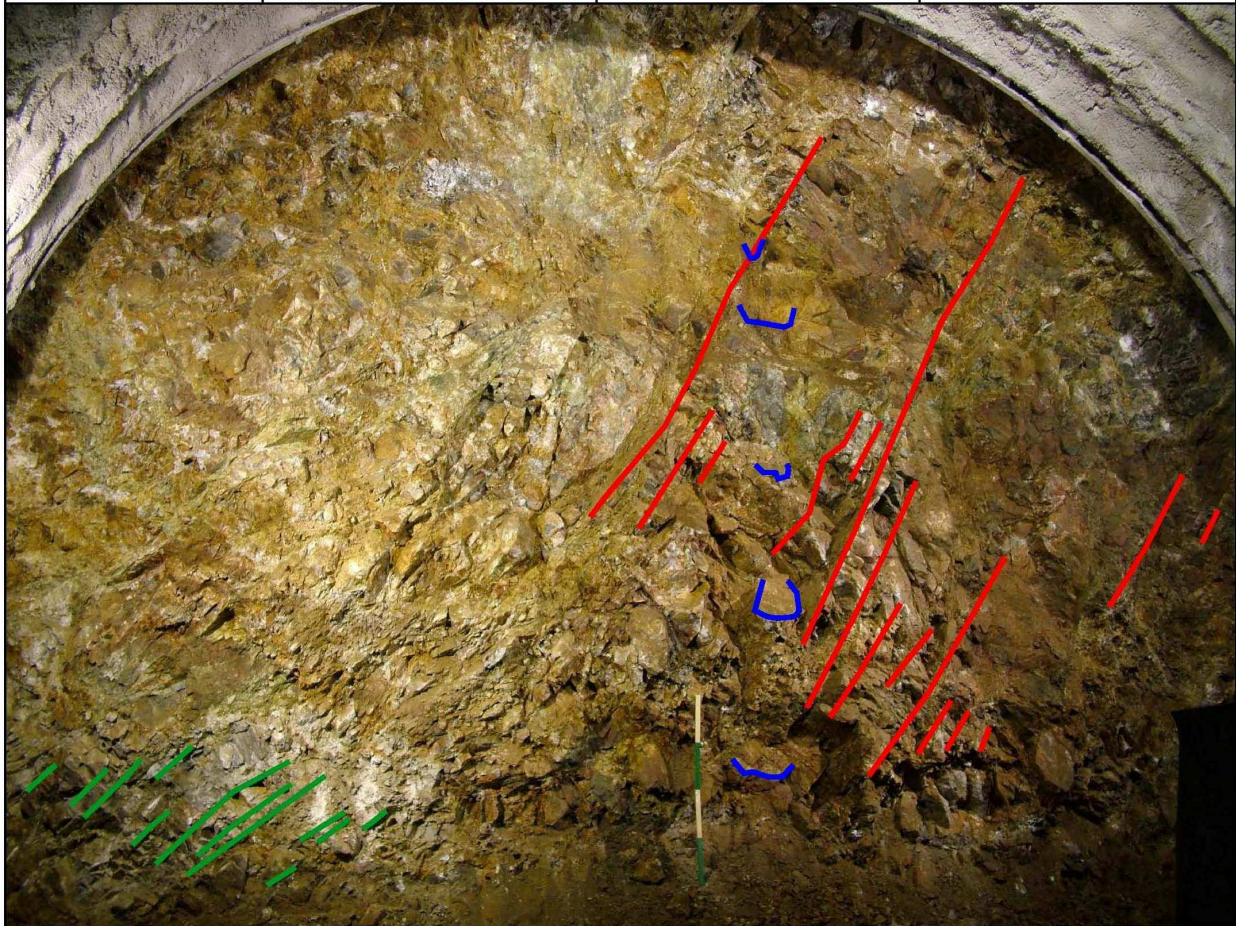
	Sistema	Immersione (°) *	Inclinazione (°) *	Spaziatura media (cm)	
				Disto	Foto
	Sistema 1	145	75	49,0	53,9
	Sistema 2	250	70	21,3	24,1
	Sistema 3	30	80	15,8	12,2

* L'immersione e l'inclinazione sono state misurate in sito.

		M*'	C*''	Ib (cm)	Disto	28,7
Jv	Standard	15,5	X		Foto	30,0
	Disto	5,9	X		Standard	11,7
	Foto	4,5	X			

*' M: Jv misurato; *'' C: Jv ottenuto tramite correlazione.

Data e ora:	N° stazione	Galleria	Canna	Imbocco	Sezione
27/10/2008	G26	Cacciapuiu	S	N	B0
Progressiva	Relativa (m)	290,64	Profondita' (m)		Quota (mslm)
	Assoluta (km)	411.953,29	69,70		464,90
Area stendimento	Direzione fronte		Litotipo		Stato di ammasso
140	N 60° W (300°)		Gneiss		Irregolare



	Sistema	Immersione (°) *	Inclinazione (°) *	Spaziatura media (cm)	
				Disto	Foto
	Sistema 1	100	60	79,4	45,0
	Sistema 2	50	40	85,6	103,4
	Sistema 3	180	40	14,9	12,9

* L'immersione e l'inclinazione sono state misurate in sito.

		M [#]	C ^{*1}	Ib (cm)	Disto	60,0
Jv	Standard	14,2	X		Foto	53,8
	Disto	5,6	X		Standard	24,1
	Foto	4,1	X			

*M: Jv misurato; *1 C: Jv ottenuto tramite correlazione.

Data e ora:	N° stazione	Galleria	Canna	Imbocco	Sezione
27/10/2008	G27	Cacciapuiu	N	N	B0
Progressiva	Relativa (m)	286,20	Profondità (m)		Quota (m.s.l.m.)
	Assoluta (km)	411.982,85	80,80		465,00
Area stendimento	Direzione fronte		Litotipo		Stato di ammasso
140	N 45° W (315°)		Gneiss		Irregolare



	Sistema	Immersione (°)*	Inclinazione (°)*	Spaziatura media (cm)	
				Disto	Foto
	Sistema 1	160	66	60,3	44,6
	Sistema 2	330	30	127,0	126,4
	Sistema 3	310	60	50,0	69,1
	Sistema 4	200	60	29,5	53,1

* L'immersione e l'inclinazione sono state misurate in sito.

		M*	C**	Ib (cm)	Disto	46,6		
Jv	Standard	9,1	⊗					
	Disto	2,5	⊗				Foto	55,6
	Foto	2,7	⊗				Standard	16,9

*': Jv misurato; *'': Jv ottenuto tramite correlazione.

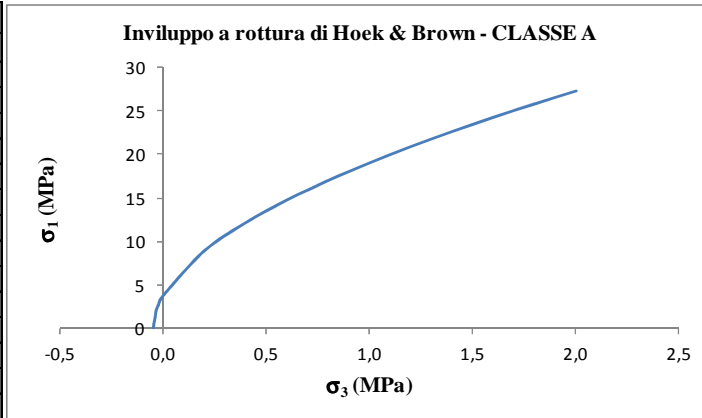
APPENDICE 4

DEFINIZIONE DEI PARAMETRI DI RESISTENZA

DI AMMASSO: CRITERIO DI ROTTURA

DI HOEK & BROWN (1980 e successive modifiche)

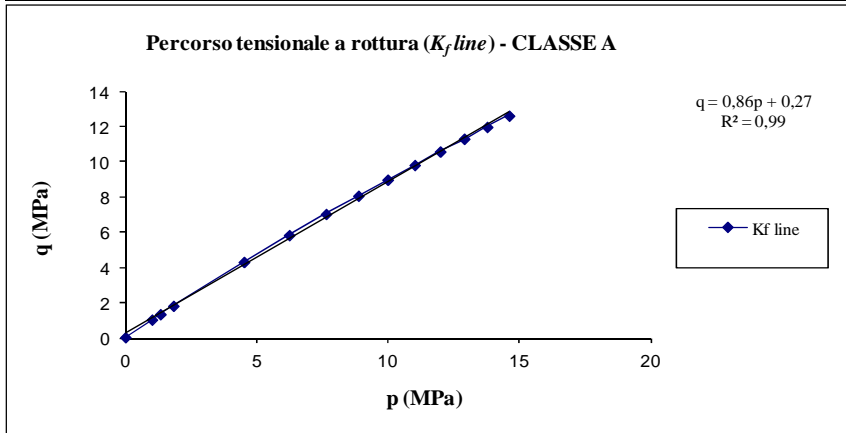
CLASSE di AMMASSO A	
σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)
0,1	-0,04
2,1	-0,03
2,7	-0,02
3,7	0,00
8,8	0,20
12,1	0,40
14,7	0,60
16,9	0,80
19,0	1,00
20,8	1,20
22,6	1,40
24,2	1,60
25,7	1,80
27,2	2,00



c (MPa)
0,53

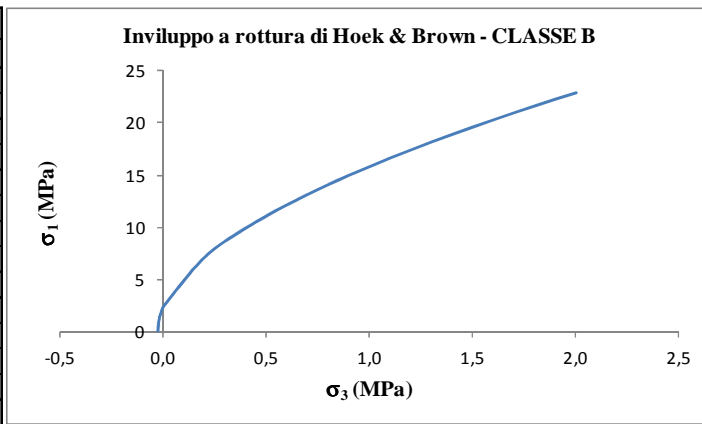
ϕ (°)
59,3

σ_{ci} (MPa)	m_i	D	RQD (%)	BRMR	GSI	m_b	s	a	J_v
53,4	33	0,05	83,7	58	53	5,8997	4,94E-03	0,50466	9,5



CLASSE A	
q	p
0,053	0,008
1,046	1,016
1,359	1,339
1,832	1,832
4,319	4,519
5,839	6,239
7,042	7,642
8,071	8,871
8,984	9,984
9,815	11,015
10,581	11,981
11,297	12,897
11,970	13,770
12,608	14,608

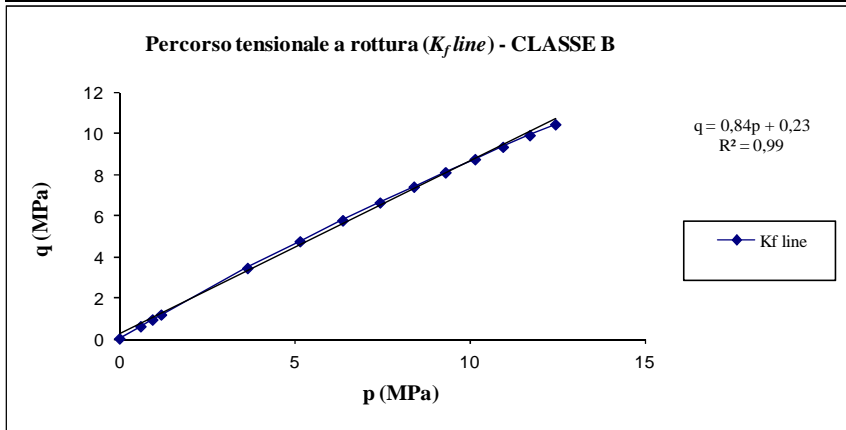
CLASSE di AMMASSO B	
σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)
0,0	-0,03
1,2	-0,02
1,9	-0,01
2,4	0,00
7,1	0,20
9,9	0,40
12,1	0,60
14,1	0,80
15,8	1,00
17,4	1,20
18,9	1,40
20,3	1,60
21,6	1,80
22,9	2,00



c (MPa)
0,42

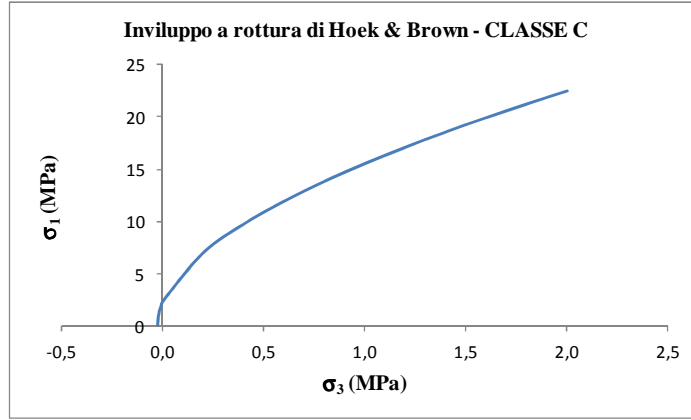
ϕ (°)
57,1

σ_{ci} (MPa)	m_i	D	RQD (%)	BRMR	GSI	m_b	s	a	J_v
48,3	33	0,20	70,8	55	50	4,5375	2,60E-03	0,50573	13,4



CLASSE B	
q	p
0,030	0,003
0,622	0,602
0,948	0,938
1,190	1,190
3,455	3,655
4,752	5,152
5,770	6,370
6,636	7,436
7,403	8,403
8,100	9,300
8,743	10,143
9,342	10,942
9,906	11,706
10,440	12,440

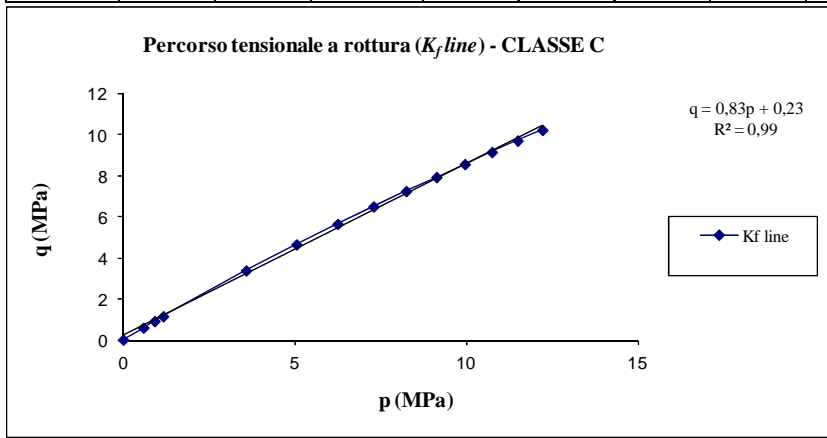
CLASSE di AMMASSO C	
σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)
0,0	-0,03
1,2	-0,02
1,8	-0,01
2,3	0,00
7,0	0,20
9,7	0,40
11,9	0,60
13,8	0,80
15,5	1,00
17,1	1,20
18,5	1,40
19,9	1,60
21,2	1,80
22,4	2,00



c (MPa)
0,41

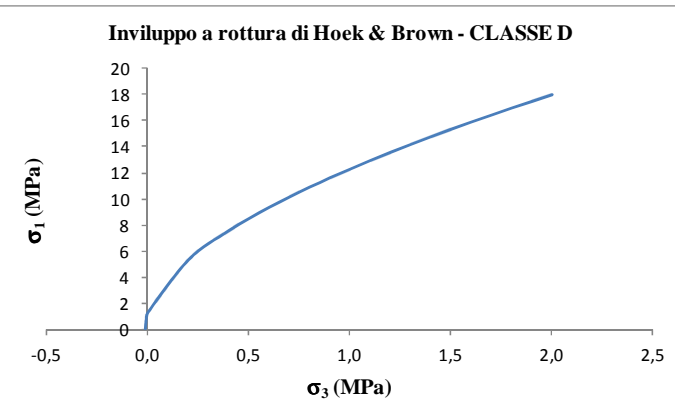
ϕ (°)
56,1

σ_{ci} (MPa)	m_i	D	RQD (%)	BRMR	GSI	m_b	s	a	J_v
46,9	33	0,25	87,0	56	51	4,4661	2,63E-03	0,50535	8,5



CLASSE C	
q	p
0,031	0,003
0,610	0,590
0,930	0,920
1,166	1,166
3,384	3,584
4,653	5,053
5,649	6,249
6,496	7,296
7,247	8,247
7,928	9,128
8,557	9,957
9,143	10,743
9,694	11,494
10,217	12,217

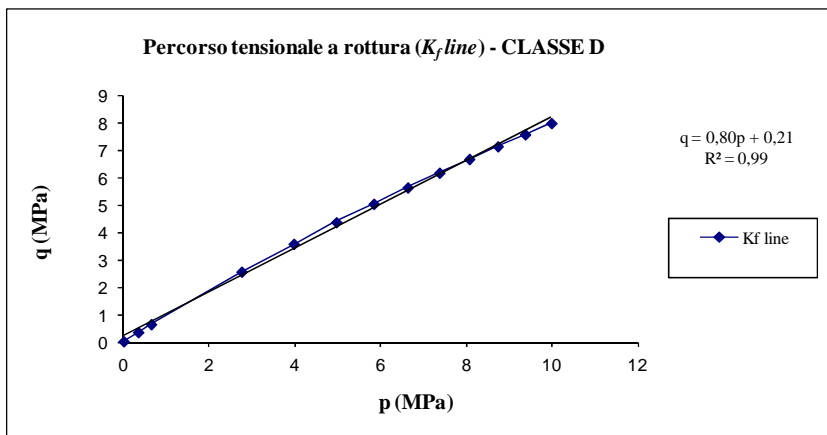
CLASSE di AMMASSO D	
σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)
0,0	-0,015
0,7	-0,010
1,3	0,000
5,3	0,200
7,6	0,400
9,3	0,600
10,9	0,800
12,3	1,000
13,5	1,200
14,7	1,400
15,9	1,600
16,9	1,800
18,0	2,000



c (MPa)
0,35

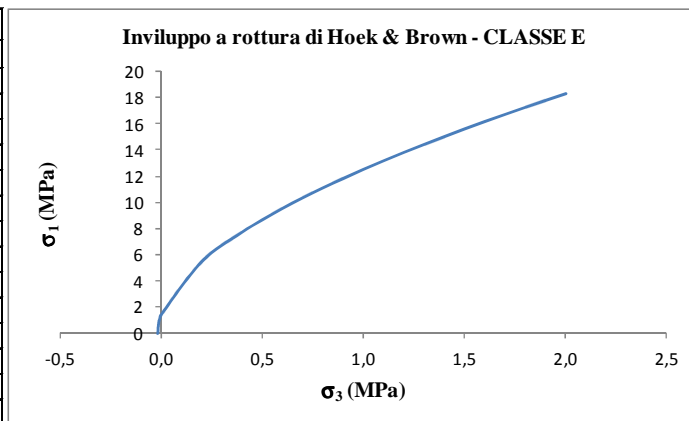
ϕ (°)
53,1

σ_{ci} (MPa)	m_i	D	RQD (%)	BRMR	GSI	m_b	s	a	J_v
44,0	33	0,40	57,9	51	46	2,9618	9,85E-04	0,50755	17,3



CLASSE D	
q	p
0,029	0,015
0,366	0,356
0,655	0,655
2,561	2,761
3,578	3,978
4,369	4,969
5,040	5,840
5,635	6,635
6,173	7,373
6,670	8,070
7,133	8,733
7,568	9,368
7,981	9,981

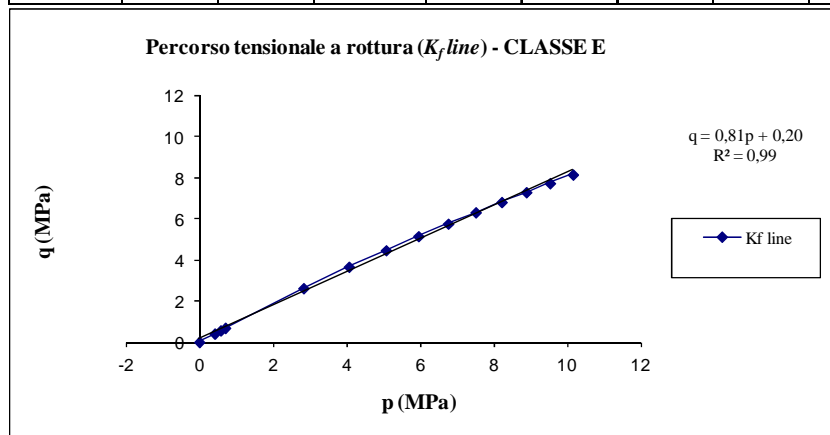
CLASSE di AMMASSO E	
σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)
0,0	-0,016
0,8	-0,010
1,1	-0,005
1,4	0,000
5,4	0,200
7,7	0,400
9,5	0,600
11,1	0,800
12,5	1,000
13,8	1,200
15,0	1,400
16,2	1,600
17,3	1,800
18,3	2,000



c (MPa)
0,34

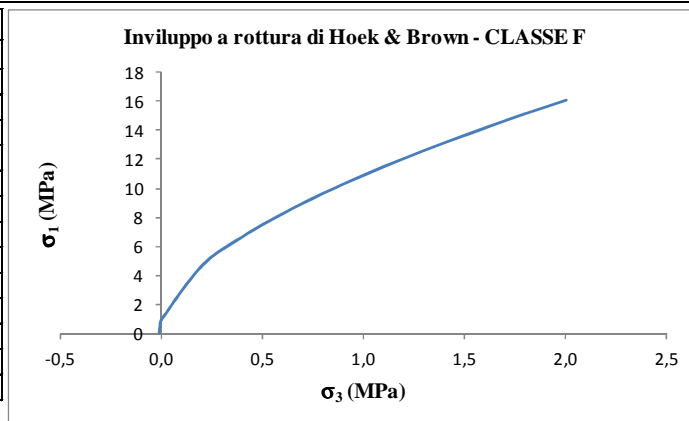
ϕ (°)
54,1

σ_{ci} (MPa)	m_i	D	RQD (%)	BRMR	GSI	m_b	s	a	J_v
43,7	33	0,40	72,1	52	47	3,0970	1,12E-03	0,50705	13,0



CLASSE E	
q	p
0,008	-0,007
0,419	0,409
0,575	0,570
0,697	0,697
2,624	2,824
3,659	4,059
4,466	5,066
5,150	5,950
5,756	6,756
6,305	7,505
6,811	8,211
7,283	8,883
7,727	9,527
8,148	10,148

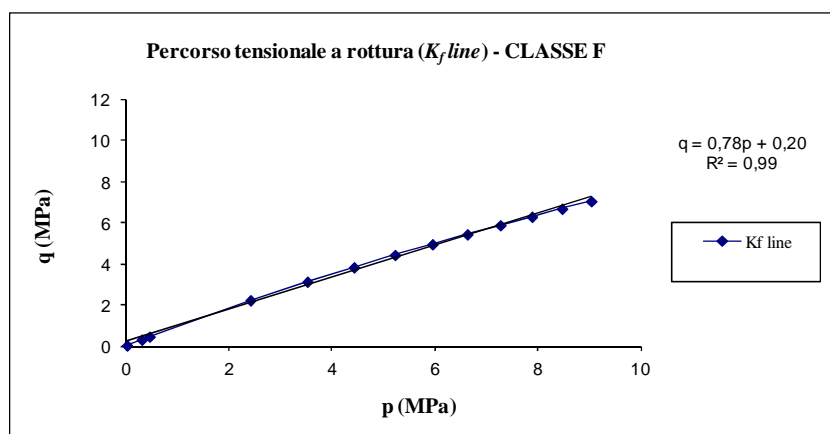
CLASSE di AMMASSO F	
σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)
0,0	-0,010
0,6	-0,005
0,9	0,000
4,6	0,200
6,6	0,400
8,3	0,600
9,6	0,800
10,9	1,000
12,1	1,200
13,1	1,400
14,2	1,600
15,1	1,800
16,1	2,000



c (MPa)
0,32

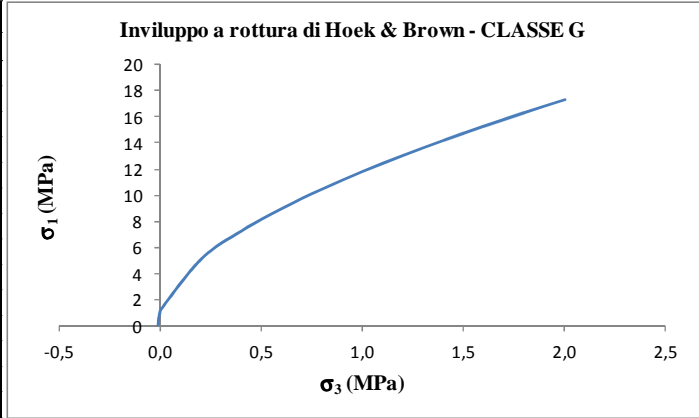
ϕ (°)
51,3

σ_{ci} (MPa)	m_i	D	RQD (%)	BRMR	GSI	m_b	s	a	J_v
43,6	33	0,40	39,1	46	41	2,3693	5,19E-04	0,51062	23,0



CLASSE F	
q	p
0,029	0,020
0,314	0,309
0,458	0,458
2,218	2,418
3,123	3,523
3,826	4,426
4,422	5,222
4,950	5,950
5,429	6,629
5,870	7,270
6,281	7,881
6,669	8,469
7,035	9,035

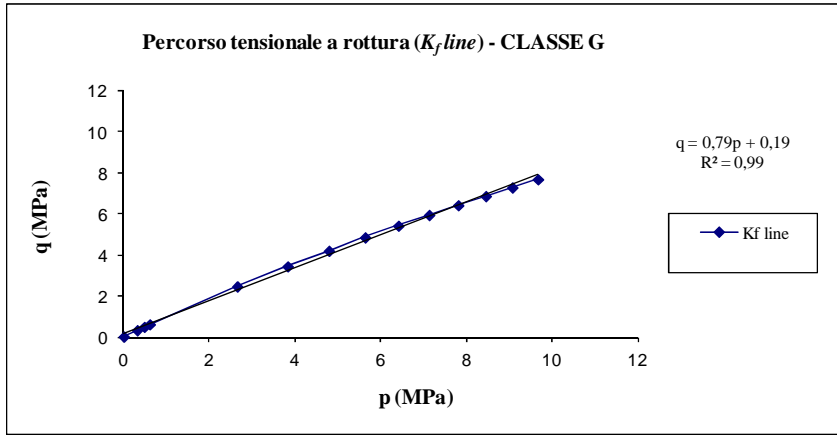
CLASSE di AMMASSO G	
σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)
0,0	-0,014
0,7	-0,010
1,0	-0,005
1,2	0,000
5,1	0,200
7,3	0,400
9,0	0,600
10,5	0,800
11,8	1,000
13,1	1,200
14,2	1,400
15,3	1,600
16,3	1,800
17,3	2,000



c (MPa)
0,31

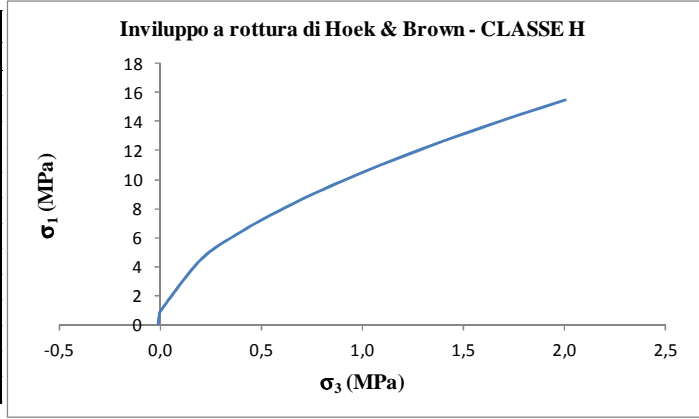
ϕ (°)
52,1

σ_{ci} (MPa)	m_i	D	RQD (%)	BRMR	GSI	m_b	s	a	J_v
41,8	33	0,45	74,7	52	47	2,8694	9,80E-04	0,50705	12,2



CLASSE G	
q	p
0,031	0,017
0,339	0,329
0,501	0,496
0,624	0,624
2,462	2,662
3,439	3,839
4,199	4,799
4,844	5,644
5,415	6,415
5,932	7,132
6,409	7,809
6,854	8,454
7,272	9,072
7,668	9,668

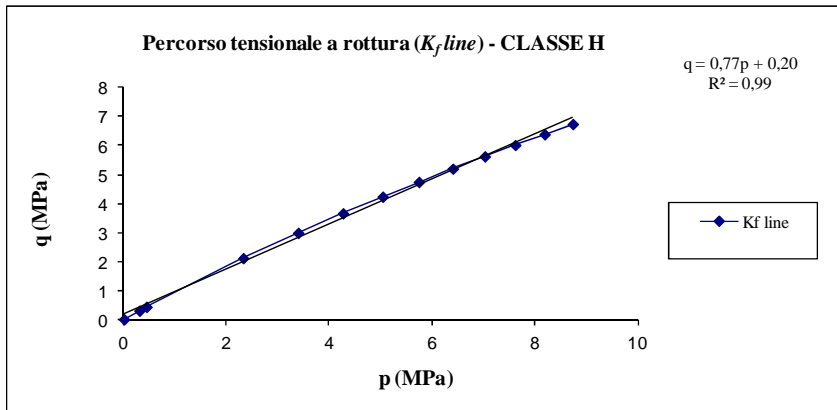
CLASSE di AMMASSO H	
σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)
0,0	-0,010
0,6	-0,005
0,9	0,000
4,5	0,200
6,4	0,400
7,9	0,600
9,3	0,800
10,5	1,000
11,6	1,200
12,6	1,400
13,6	1,600
14,6	1,800
15,5	2,000



c (MPa)
0,31

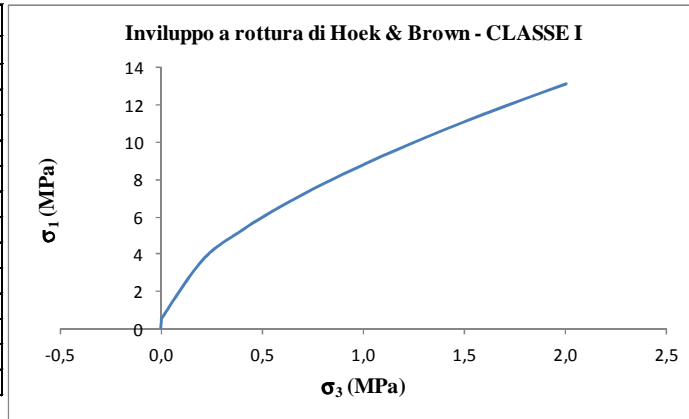
ϕ (°)
50,3

σ_{ci} (MPa)	m_i	D	RQD (%)	BRMR	GSI	m_b	s	a	J_v
40,9	33	0,50	56,6	49	44	2,2930	5,72E-04	0,50866	17,7



CLASSE H	
q	p
0,030	0,020
0,325	0,320
0,458	0,458
2,136	2,336
3,001	3,401
3,673	4,273
4,243	5,043
4,747	5,747
5,203	6,403
5,624	7,024
6,017	7,617
6,386	8,186
6,736	8,736

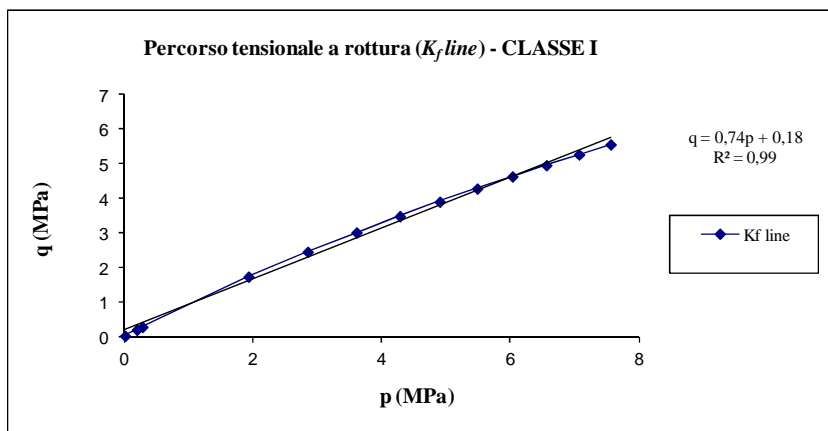
CLASSE di AMMASSO I	
σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)
0,0	-0,006
0,4	-0,003
0,6	0,000
3,7	0,200
5,3	0,400
6,6	0,600
7,8	0,800
8,8	1,000
9,8	1,200
10,7	1,400
11,5	1,600
12,3	1,800
13,1	2,000



c (MPa)
0,27

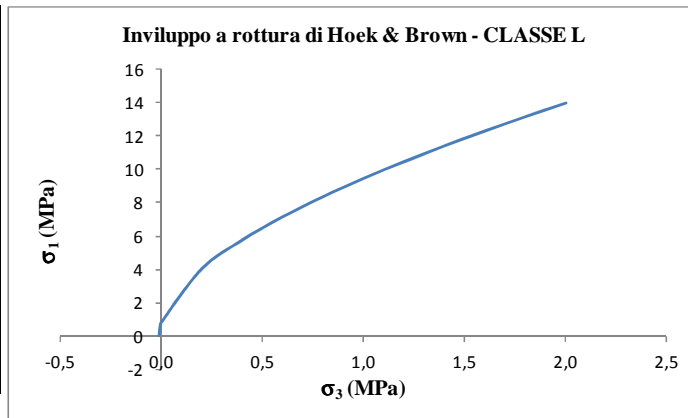
ϕ (°)
47,4

σ_{ci} (MPa)	m_i	D	RQD (%)	BRMR	GSI	m_b	s	a	J_v
40,1	33	0,55	39,4	44	39	1,6349	2,49E-04	0,51217	22,9



CLASSE I	
q	p
0,023	0,017
0,202	0,199
0,286	0,286
1,734	1,934
2,454	2,854
3,012	3,612
3,486	4,286
3,905	4,905
4,285	5,485
4,635	6,035
4,962	6,562
5,269	7,069
5,560	7,560

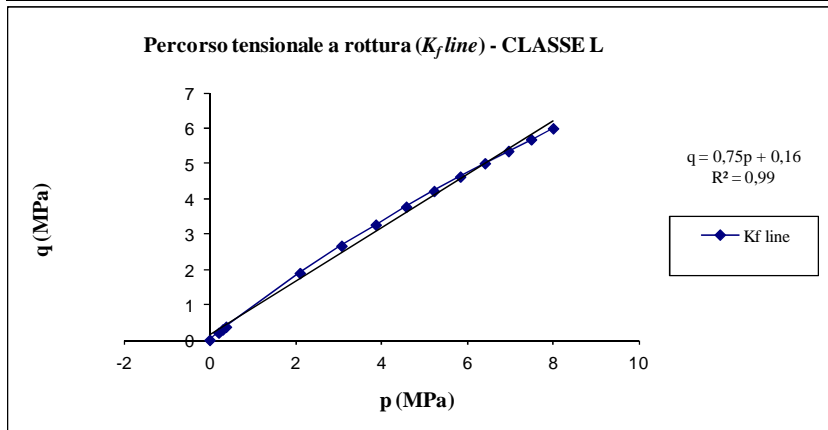
CLASSE di AMMASSO L	
σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)
0,0	-0,009
0,4	-0,006
0,6	-0,003
0,8	0,000
4,0	0,200
5,7	0,400
7,1	0,600
8,4	0,800
9,5	1,000
10,5	1,200
11,4	1,400
12,3	1,600
13,2	1,800
14,0	2,000



c (MPa)
0,24

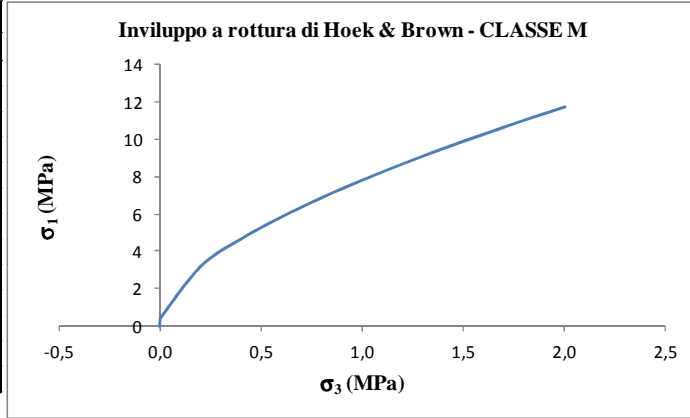
ϕ (°)
47,9

σ_{ci} (MPa)	m_i	D	RQD (%)	BRMR	GSI	m_b	s	a	J_v
39,4	33	0,60	61,5	49	44	1,8953	4,19E-04	0,50866	16,2



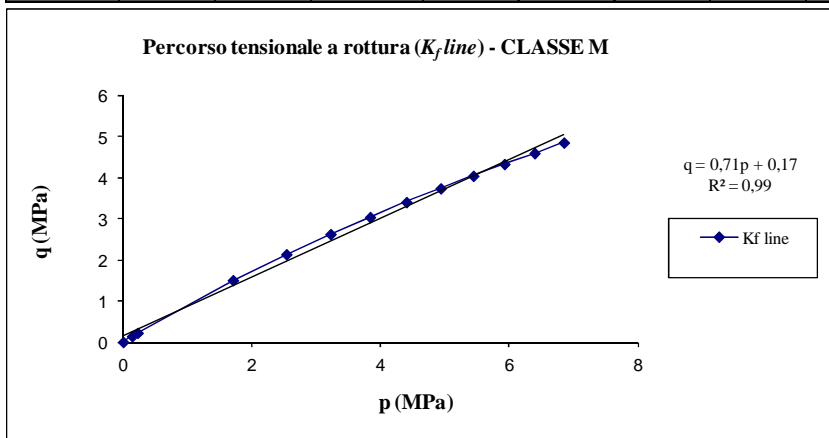
CLASSE L	
q	p
0,002	-0,007
0,208	0,202
0,304	0,301
0,377	0,377
1,896	2,096
2,668	3,068
3,268	3,868
3,776	4,576
4,225	5,225
4,632	5,832
5,008	6,408
5,357	6,957
5,686	7,486
5,998	7,998

CLASSE di AMMASSO M	
σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)
0,0	-0,005
0,3	-0,003
0,5	0,000
3,2	0,200
4,7	0,400
5,8	0,600
6,9	0,800
7,8	1,000
8,7	1,200
9,5	1,400
10,3	1,600
11,0	1,800
11,7	2,000



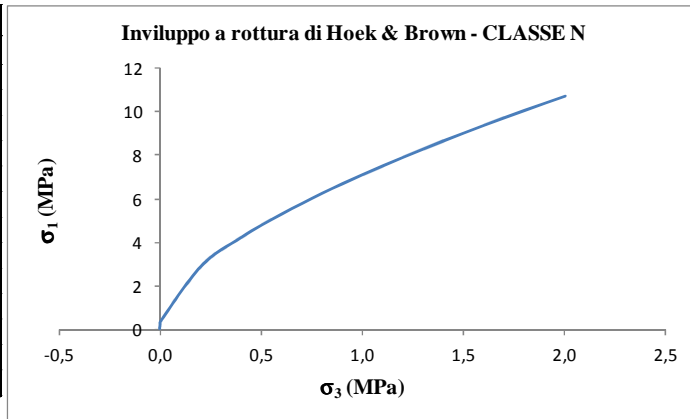
c (MPa)
0,24
ϕ (°)
45,2

σ_{ci} (MPa)	m_i	D	RQD (%)	BRMR	GSI	m_b	s	a	J_v
38,2	33	0,65	39,8	44	39	1,3086	1,75E-04	0,51217	22,8



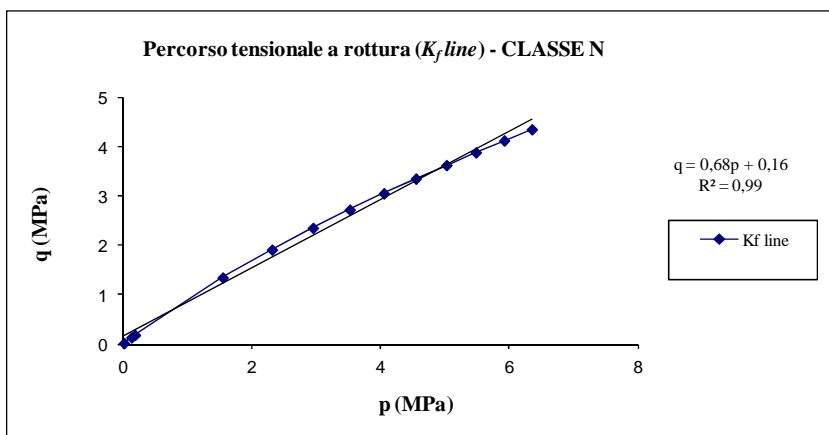
CLASSE M	
q	p
0,007	0,001
0,145	0,142
0,227	0,227
1,508	1,708
2,137	2,537
2,625	3,225
3,038	3,838
3,404	4,404
3,735	4,935
4,041	5,441
4,326	5,926
4,594	6,394
4,848	6,848

CLASSE di AMMASSO N	
σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)
0,0	-0,004
0,3	-0,002
0,4	0,000
2,9	0,200
4,2	0,400
5,3	0,600
6,2	0,800
7,1	1,000
7,9	1,200
8,6	1,400
9,4	1,600
10,0	1,800
10,7	2,000



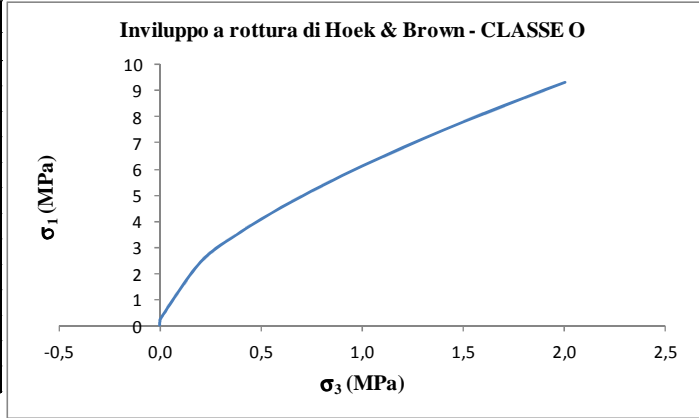
c (MPa)
0,22
ϕ (°)
42,4

σ_{ci} (MPa)	m_i	D	RQD (%)	BRMR	GSI	m_b	s	a	J_v
37,2	33	0,70	45,7	43	38	1,0941	1,25E-04	0,51302	21,0



CLASSE N	
q	p
0,019	0,015
0,133	0,131
0,185	0,185
1,348	1,548
1,913	2,313
2,351	2,951
2,723	3,523
3,052	4,052
3,350	4,550
3,624	5,024
3,880	5,480
4,122	5,922
4,350	6,350

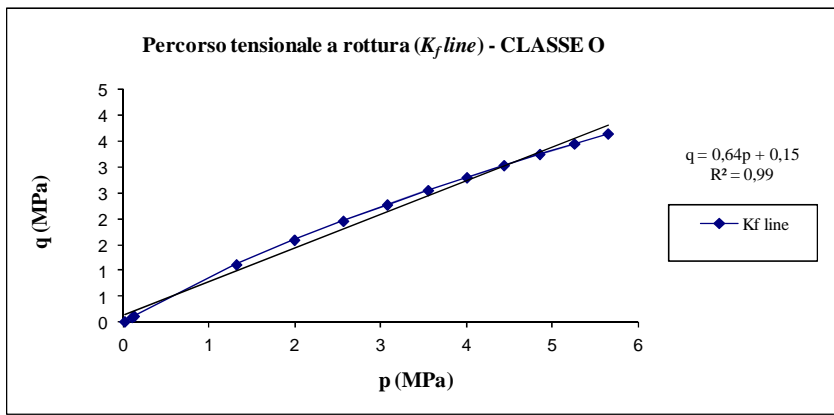
CLASSE di AMMASSO O	
σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)
0,0	-0,003
0,2	-0,001
0,3	0,000
2,4	0,200
3,6	0,400
4,5	0,600
5,4	0,800
6,1	1,000
6,8	1,200
7,5	1,400
8,1	1,600
8,7	1,800
9,3	2,000



c (MPa)
0,20

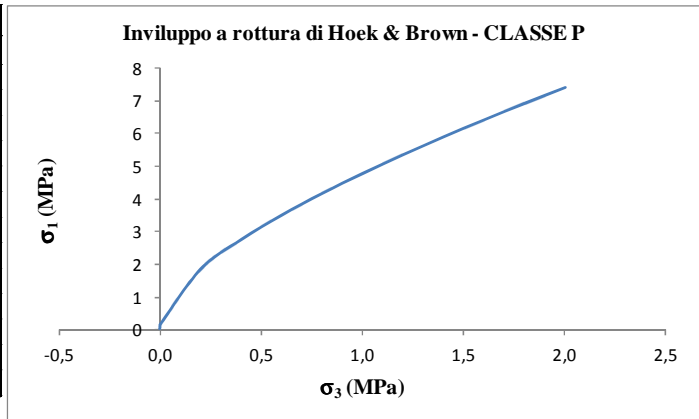
ϕ (°)
39,3

σ_{ci} (MPa)	m_i	D	RQD (%)	BRMR	GSI	m_b	s	a	J_v
36,5	33	0,75	24,3	40	35	0,8043	6,58E-05	0,51595	27,5



CLASSE O	
q	p
0,020	0,017
0,103	0,102
0,127	0,127
1,120	1,320
1,595	1,995
1,963	2,563
2,276	3,076
2,553	3,553
2,804	4,004
3,036	4,436
3,252	4,852
3,455	5,255
3,648	5,648

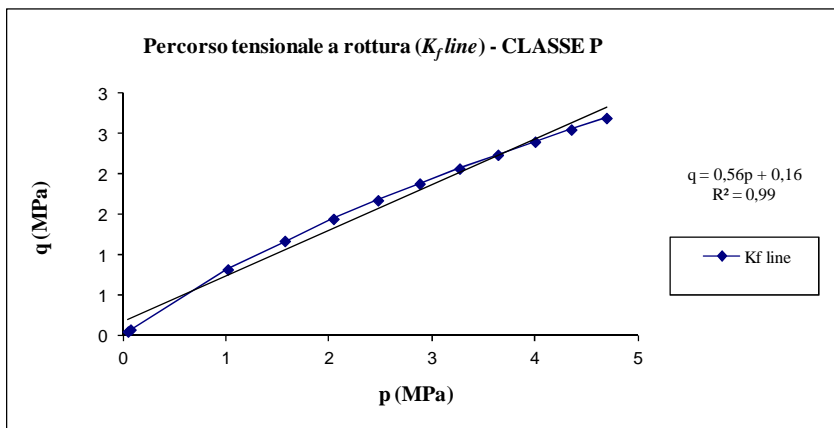
CLASSE di AMMASSO P	
σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)
0,0	-0,002
0,1	-0,001
0,1	0,000
1,8	0,200
2,7	0,400
3,5	0,600
4,2	0,800
4,8	1,000
5,3	1,200
5,9	1,400
6,4	1,600
6,9	1,800
7,4	2,000



c (MPa)
0,19

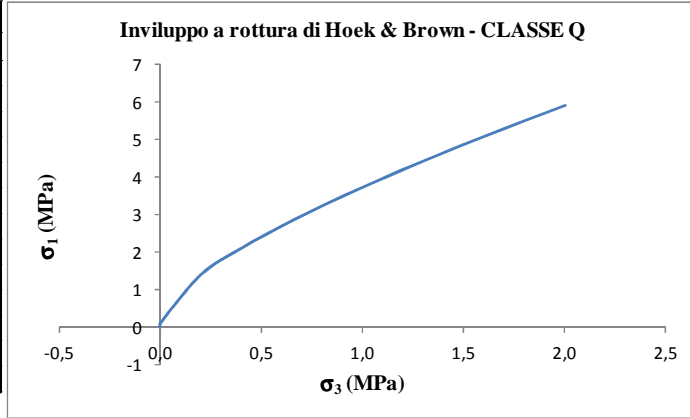
ϕ (°)
34,1

σ_{ci} (MPa)	m_i	D	RQD (%)	BRMR	GSI	m_b	s	a	J_v
34,5	33	0,85	12,7	37	32	0,4833	2,64E-05	0,51953	31,0



CLASSE P	
q	p
0,009	0,007
0,049	0,048
0,072	0,072
0,818	1,018
1,170	1,570
1,443	2,043
1,675	2,475
1,881	2,881
2,067	3,267
2,239	3,639
2,400	4,000
2,551	4,351
2,695	4,695

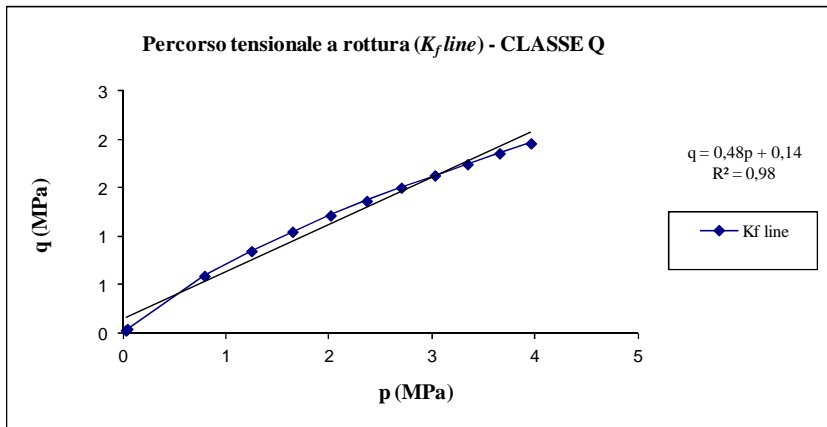
CLASSE di AMMASSO Q	
σ_1 (MPa)	σ_3 (MPa)
0,0	-0,0013
0,1	-0,0007
0,1	0,0000
1,4	0,2000
2,1	0,4000
2,7	0,6000
3,2	0,8000
3,7	1,0000
4,2	1,2000
4,7	1,4000
5,1	1,6000
5,5	1,8000
5,9	2,0000



c (MPa)
0,16

ϕ (°)
28,7

σ_{ci} (MPa)	m_i	D	RQD (%)	BRMR	GSI	m_b	s	a	J_v
32,7	33	0,95	0,0	35	30	0,2821	1,14E-05	0,52234	35,7



CLASSE Q	
q	p
0,003	0,002
0,029	0,028
0,043	0,043
0,591	0,791
0,847	1,247
1,046	1,646
1,216	2,016
1,366	2,366
1,502	2,702
1,628	3,028
1,745	3,345
1,856	3,656
1,961	3,961

APPENDICE 5

FRANA FELICIUSU

ANALISI DI STABILITA' ALL'EQUILIBRIO LIMITE

GLOBALE - METODO DI FELLENIUS (1936)

SUDDIVISIONE IN CONCI E TABELLE DI CALCOLO

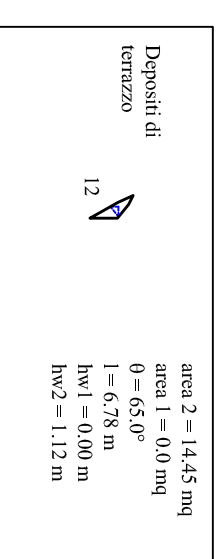
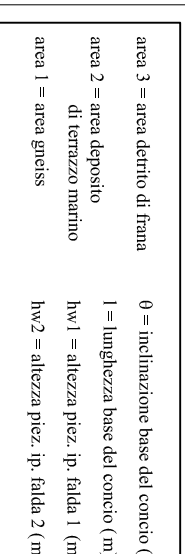
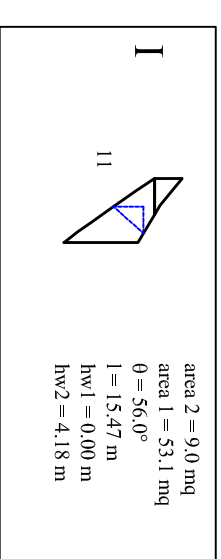
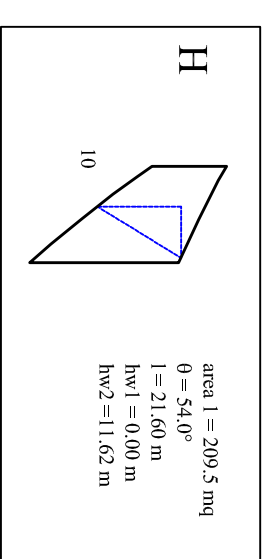
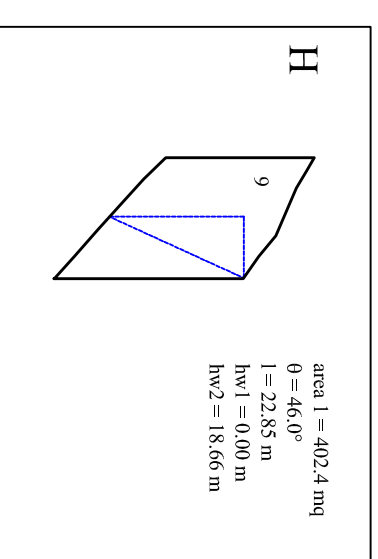
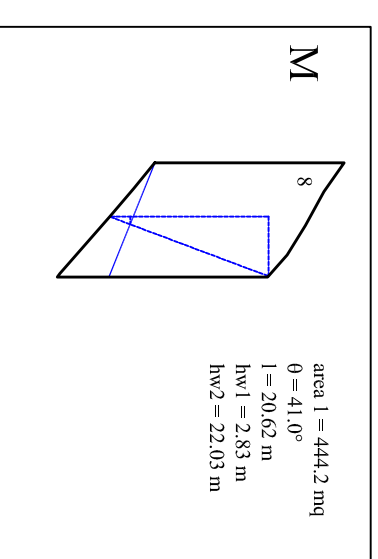
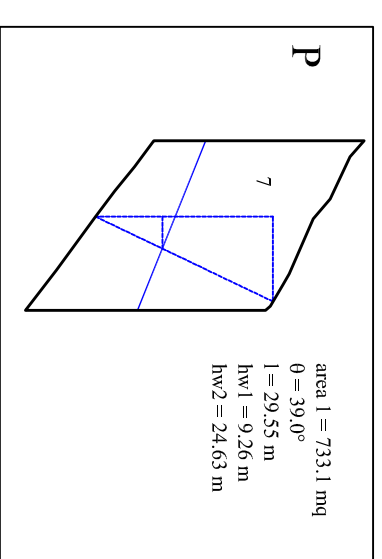
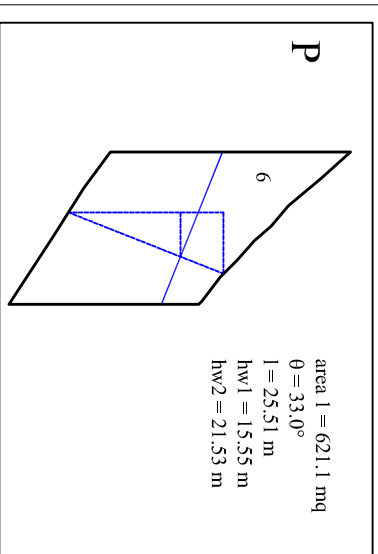
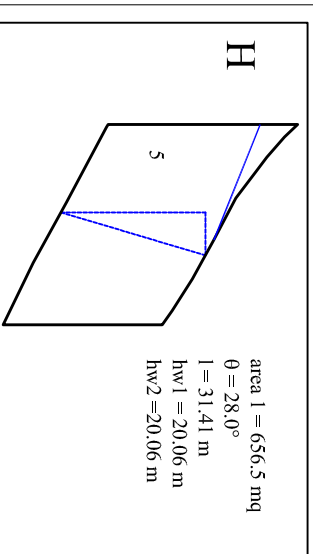
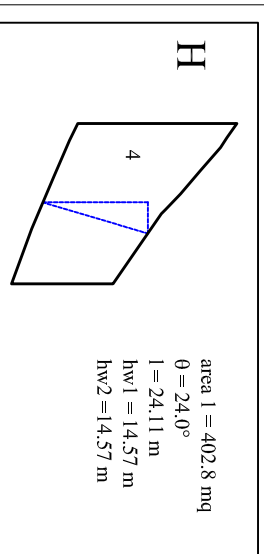
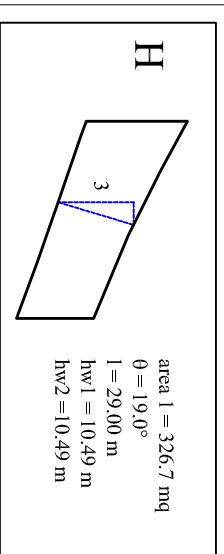
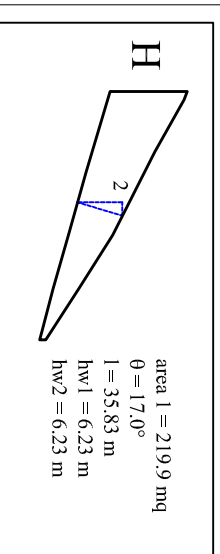
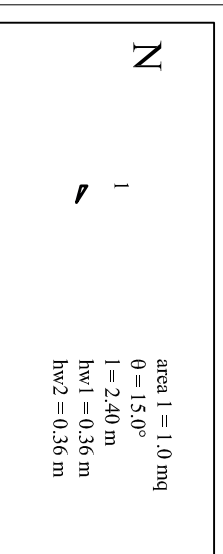
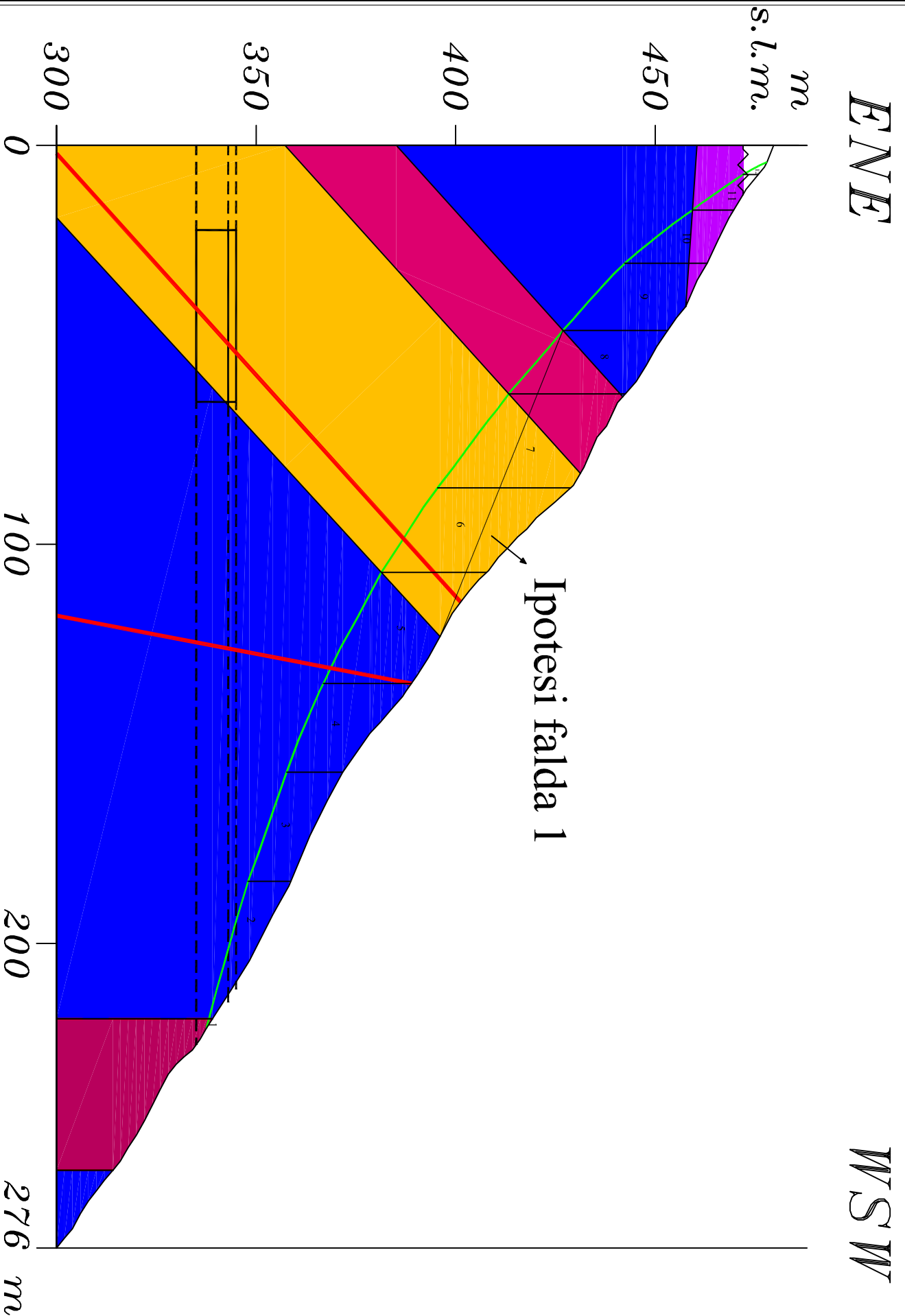
Frana Felicissu.

Analisi di stabilità all'Equilibrio Limite Globale (metodo di Fellenius).

Stralcio della sezione geologico-technica cinematica pre-frana (L-L').

Suddivisione in conchi dell'area in frana.

Legenda in Allegato 3 – Tavola 3.2.



Frana di prima generazione - Pendio asciutto												
Concio	CLASSE	A ₁ (m ²)	A ₂ (m ²)	γ ₁ (kN/m ³)	γ ₂ (kN/m ³)	W _{tot} (kN)	α (°)	l (m)	φ (°)	c (kN/m ²)	Tagenti (kN)	T _{max} (kN)
1	N	1,0		26,9		26,9	15,0	2,4	42,0	220,0	7,0	551,4
2	H	219,9		26,9		5915,3	17,0	35,8	50,0	310,0	1729,5	17848,9
3	H	326,7		26,9		8788,2	19,0	29,0	50,0	310,0	2861,2	18892,8
4	H	402,8		26,9		10835,3	24,0	24,1	50,0	310,0	4407,1	19270,7
5	H	656,5		26,9		17659,9	28,0	31,4	50,0	310,0	8290,8	28319,8
6	P	621,1		26,9		16707,6	33,0	25,5	34,0	190,0	9099,6	14298,2
7	P	733,1		26,9		19720,4	39,0	29,6	34,0	190,0	12410,4	15951,8
7	M	444,2		26,9		11949,0	41,0	20,6	45,0	240,0	7839,2	13966,8
9	H	402,4		26,9		10824,6	46,0	22,9	50,0	310,0	7786,5	16044,7
10	H	209,5		26,9		5635,6	54,0	21,6	50,0	310,0	4559,3	10643,7
11	I	53,1	53,1	26,9	18,0	2384,2	56,0	15,5	47,0	270,0	1976,6	5606,6
12	TERR.		14,5	26,9	18,0	260,1	65,0	6,8	33,0	0,0	235,7	71,4

FS = 2,6

Frana di prima generazione - Pendio con falda 1														
Concio	CLASSE	A ₁ (m ²)	A ₂ (m ²)	γ ₁ (kN/m ³)	γ ₂ (kN/m ³)	W _{tot} (kN)	α (°)	hw (m)	l (m)	U (kN)	φ (°)	c (kN/m ²)	Tagenti (kN)	T _{max} (kN)
1	N	1,0		26,9		26,9	15,0	0,4	25,7	8,5	42,0	220,0	7,0	543,8
2	H	219,9		26,9		5915,3	17,0	6,2	26,1	2187,6	50,0	310,0	1729,5	15241,8
3	H	326,7		26,9		8788,2	19,0	10,5	26,4	2981,3	50,0	310,0	2861,2	15339,9
4	H	402,8		26,9		10835,3	24,0	14,6	3,4	3442,6	50,0	310,0	4407,1	15168,0
5	H	656,5		26,9		17659,9	28,0	20,1	28,1	6174,8	50,0	310,0	8290,8	20960,9
6	P	621,1		26,9		16707,6	33,0	15,6	29,4	3887,5	34,0	190,0	9099,6	11676,1
7	P	733,1		26,9		19720,4	39,0	9,3	6,3	2681,6	34,0	190,0	12410,4	14143,0
7	M	444,2		26,9		11949,0	41,0	2,8	22,9	571,9	45,0	240,0	7839,2	13394,9
9	H	402,4		26,9		10824,6	46,0	0,0	28,2	0,0	50,0	310,0	7786,5	16044,7
10	H	209,5		26,9		5635,6	54,0	0,0	15,3	0,0	50,0	310,0	4559,3	10643,7
11	I	53,1	53,1	26,9	18,0	2384,2	56,0	0,0	11,1	0,0	47,0	270,0	1976,6	5606,6
12	TERR.		14,5	26,9	18,0	260,1	65,0	0,0	20,0	0,0	33,0	0,0	235,7	71,4

FS = 2,3

Frana di prima generazione - Pendio con falda 2														
Concio	CLASSE	A ₁ (m ²)	A ₂ (m ²)	γ ₁ (kN/m ³)	γ ₂ (kN/m ³)	W _{tot} (kN)	α (°)	hw (m)	l (m)	U (kN)	φ (°)	c (kN/m ²)	Tagenti (kN)	T _{max} (kN)
1	N	1,0		26,9		26,9	15,0	0,4	25,7	8,5	42,0	220,0	7,0	543,8
2	H	219,9		26,9		5915,3	17,0	6,2	26,1	2187,6	50,0	310,0	1729,5	15241,8
3	H	326,7		26,9		8788,2	19,0	10,5	26,4	2981,3	50,0	310,0	2861,2	15339,9
4	H	402,8		26,9		10835,3	24,0	14,6	3,4	3442,6	50,0	310,0	4407,1	15168,0
5	H	656,5		26,9		17659,9	28,0	20,1	28,1	6174,8	50,0	310,0	8290,8	20960,9
6	P	621,1		26,9		16707,6	33,0	21,5	29,4	5382,5	34,0	190,0	9099,6	10667,7
7	P	733,1		26,9		19720,4	39,0	24,6	6,3	7132,6	34,0	190,0	12410,4	11140,8
7	M	444,2		26,9		11949,0	41,0	22,0	22,9	4451,7	45,0	240,0	7839,2	9515,1
9	H	402,4		26,9		10824,6	46,0	18,7	28,2	4178,5	50,0	310,0	7786,5	11065,0
10	H	209,5		26,9		5635,6	54,0	11,6	15,3	2459,7	50,0	310,0	4559,3	7712,3
11	I	53,1	53,1	26,9	18,0	2384,2	56,0	4,2	11,1	633,7	47,0	270,0	1976,6	4927,0
12	TERR.		14,5	26,9	18,0	260,1	65,0	1,1	20,0	74,4	33,0	0,0	235,7	23,1

FS = 1,9

Frana di prima generazione - Pendio asciutto + forzante pseudostatica													
Concio	CLASSE	A ₁ (m ²)	A ₂ (m ²)	γ ₁ (kN/m ³)	γ ₂ (kN/m ³)	W _{tot} (kN)	ag (g)	α (°)	l (m)	φ (°)	c (kN/m ²)	Tagenti (kN)	T _{max} (kN)
1	N	1,0		26,9		26,9	0,26	15,0	2,4	42,0	220,0	13,8	549,7
2	H	219,9		26,9		5915,3	0,26	17,0	35,8	50,0	310,0	3224,5	17304,2
3	H	326,7		26,9		8788,2	0,26	19,0	29,0	50,0	310,0	5057,2	17991,7
4	H	402,8		26,9		10835,3	0,26	24,0	24,1	50,0	310,0	7023,1	17882,7
5	H	656,5		26,9		17659,9	0,26	28,0	31,4	50,0	310,0	12411,6	25708,6
6	P	621,1		26,9		16707,6	0,26	33,0	25,5	34,0	190,0	12802,7	12676,1
7	P	733,1		26,9		19720,4	0,26	39,0	29,6	34,0	190,0	16460,7	13739,5
7	M	444,2		26,9		11949,0	0,26	41,0	20,6	45,0	240,0	10222,5	11895,1
9	H	402,4		26,9		10824,6	0,26	46,0	22,9	50,0	310,0	9773,7	13592,3
10	H	209,5		26,9		5635,6	0,26	54,0	21,6	50,0	310,0	5434,7	9207,7
11	I	53,1	53,1	26,9	18,0	2384,2	0,26	56,0	15,5	47,0	270,0	2328,9	5046,4
12	TERR.		14,5	26,9	18,0	260,1	0,26	65,0	6,8	33,0	0,0	264,8	30,9

FS = 1,6

Frana di prima generazione - Pendio asciutto + ipotesi falda 2 + forzante pseudostatica															
Concio	CLASSE	A₁ (m²)	A₂ (m²)	γ₁ (kN/m³)	γ₂ (kN/m³)	W_{tot} (kN)	ag (g)	α (°)	hw (m)	l (m)	U (kN)	φ (°)	c (kN/m²)	Tagenti (kN)	Tmax (kN)
1	N	1,0		26,9		26,9	0,26	15,0	0,4	2,4	8,5	42,0	220,0	15,2	492,8
2	H	219,9		26,9		5915,3	0,26	17,0	6,2	35,8	2187,6	50,0	310,0	3546,9	13361,0
3	H	326,7		26,9		8788,2	0,26	19,0	10,5	29,0	2981,3	50,0	310,0	5562,9	13126,1
4	H	402,8		26,9		10835,3	0,26	24,0	14,6	24,1	3442,6	50,0	310,0	7725,4	12527,3
5	H	656,5		26,9		17659,9	0,26	28,0	20,1	31,4	6174,8	50,0	310,0	13652,8	16681,5
6	P	621,1		26,9		16707,6	0,26	33,0	21,5	25,5	5382,5	34,0	190,0	14083,0	8223,3
7	P	733,1		26,9		19720,4	0,26	39,0	24,6	29,6	7132,6	34,0	190,0	18106,8	8116,8
7	M	444,2		26,9		11949,0	0,26	41,0	22,0	20,6	4451,7	45,0	240,0	11244,8	6766,7
9	H	402,4		26,9		10824,6	0,26	46,0	18,7	22,9	4178,5	50,0	310,0	10751,1	7829,6
10	H	209,5		26,9		5635,6	0,26	54,0	11,6	21,6	2459,7	50,0	310,0	5978,1	5705,8
11	I	53,1	53,1	26,9	18,0	2384,2	0,26	56,0	4,2	15,5	633,7	47,0	270,0	2561,8	3969,9
12	TERR.		14,5	26,9	18,0	260,1	0,26	65,0	1,1	6,8	74,4	33,0	0,0	291,3	-15,8

FS = 1,0

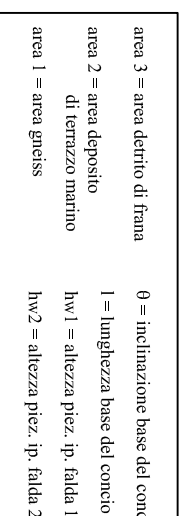
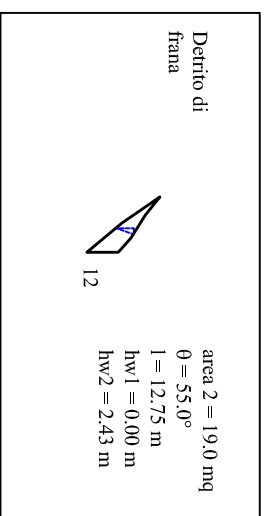
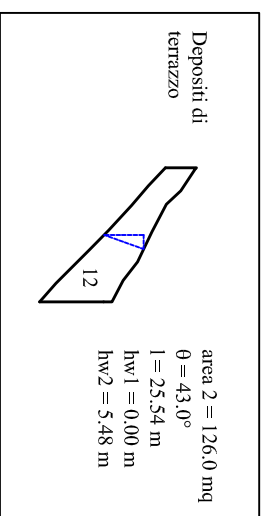
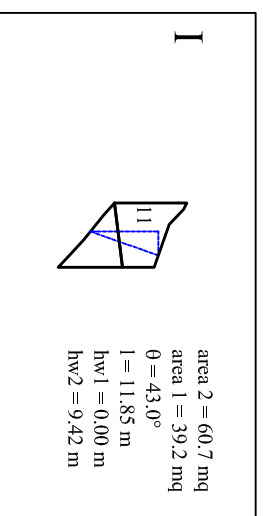
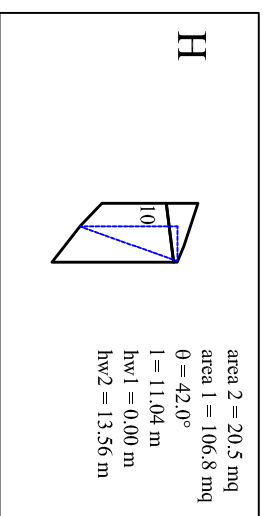
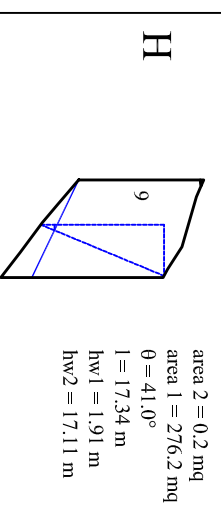
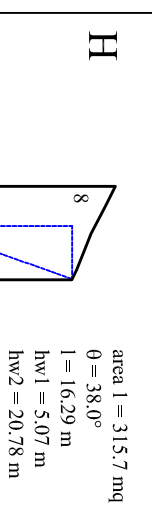
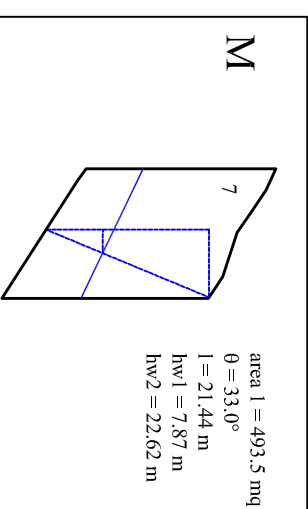
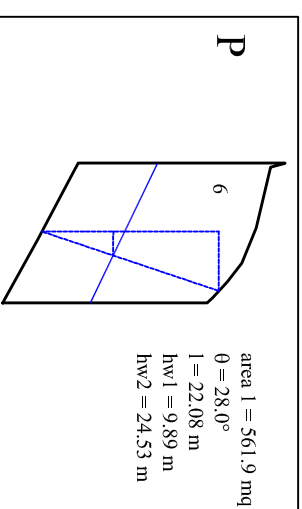
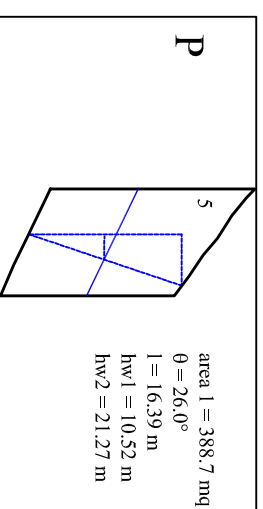
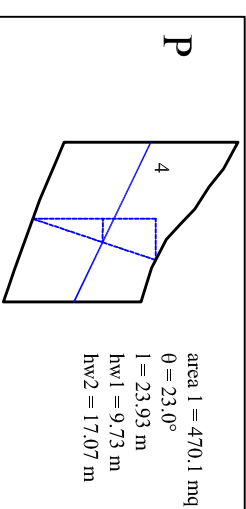
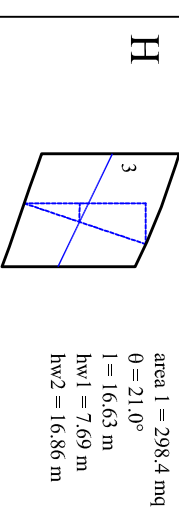
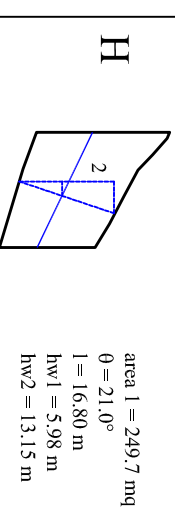
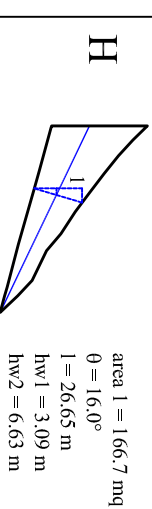
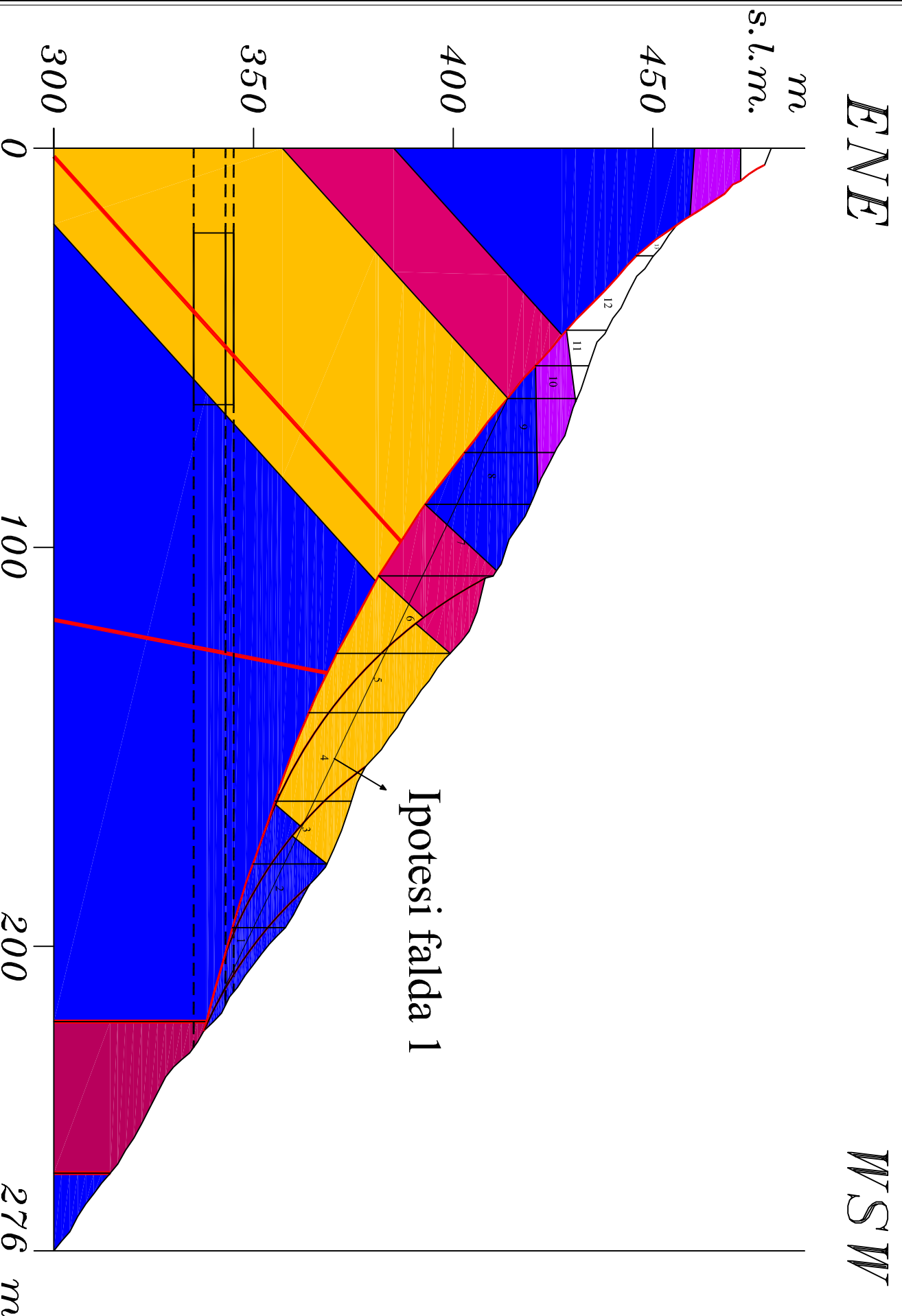
Frana Felicissu.

Analisi di stabilità all'Equilibrio Limite Globale (metodo di Fellenius).

Stralcio della sezione geologico-technica cinematica attuale (L-L').

Suddivisione in conchi dell'area in frana.

Legenda in Allegato 3 – Tavola 3.2.



Frana di seconda generazione - Pendio asciutto												
Concio	CLASSE	A ₁ (m ²)	A ₂ (m ²)	γ ₁ (kN/m ³)	γ ₂ (kN/m ³)	W _{tot} (kN)	α (°)	l (m)	φ (°)	c (kN/m ²)	Tagenti (kN)	T _{max} (kN)
1	H	166,7		26,9		4484,2	16,0	26,7	50,0	0,0	1236,0	5137,1
2	H	249,7		26,9		6716,9	21,0	16,8	50,0	0,0	2407,1	7473,2
3	H	298,4		26,9		8027,0	21,0	16,6	50,0	0,0	2876,6	8930,8
4	P	470,1		26,9		12645,7	23,0	23,9	34,0	0,0	4941,1	7851,6
5	P	388,7		26,9		10456,0	26,0	16,4	34,0	0,0	4583,6	6338,9
6	P	561,9		26,9		15115,1	28,0	22,1	34,0	0,0	7096,1	9001,9
7	M	493,5		26,9		13275,2	33,0	21,4	45,0	0,0	7230,2	11133,5
7	H	315,7		26,9		8492,3	38,0	16,3	50,0	0,0	5228,4	7975,3
9	H	276,2	0,2	26,9	18,0	7433,4	41,0	17,3	50,0	0,0	4876,7	6685,8
10	H	106,8	20,5	26,9	18,0	3241,9	42,0	11,0	50,0	0,0	2169,3	2871,2
11	I	39,2	60,7	26,9	18,0	2147,1	43,0	11,9	47,0	0,0	1464,3	1683,9
12	Terr.		126,0	26,9	18,0	2268,0	43,0	25,5	33,0	0,0	1546,8	1077,2
13	Terr.		2,4	26,9	18,0	43,7	55,0	12,8	33,0	0,0	35,8	16,3

FS = 1,7

Frana di seconda generazione - Pendio asciutto + forzante pseudostatica													
Concio	CLASSE	A ₁ (m ²)	A ₂ (m ²)	γ ₁ (kN/m ³)	γ ₂ (kN/m ³)	W _{tot} (kN)	ag (g)	α (°)	l (m)	φ (°)	c (kN/m ²)	Tagenti (kN)	T _{max} (kN)
1	H	166,7		26,9		4484,2	0,26	16,0	26,7	50,0	0,0	4747,8	2375,2
2	H	249,7		26,9		6716,9	0,26	21,0	16,8	50,0	0,0	6715,1	4064,4
3	H	298,4		26,9		8027,0	0,26	21,0	16,6	50,0	0,0	8024,8	4857,1
4	P	470,1		26,9		12645,7	0,26	23,0	23,9	34,0	0,0	6970,8	8017,4
5	P	388,7		26,9		10456,0	0,26	26,0	16,4	34,0	0,0	5521,8	7067,3
6	P	561,9		26,9		15115,1	0,26	28,0	22,1	34,0	0,0	7736,9	10623,1
7	M	493,5		26,9		13275,2	0,26	33,0	21,4	45,0	0,0	9222,7	10172,5
7	H	315,7		26,9		8492,3	0,26	38,0	16,3	50,0	0,0	6328,6	6997,0
9	H	276,2	0,2	26,9	18,0	7429,8	0,26	41,0	17,3	50,0	0,0	5147,3	6356,3
10	H	106,8	20,5	26,9	18,0	2872,9	0,26	42,0	11,0	50,0	0,0	1938,9	2486,6
11	I	39,2	60,7	26,9	18,0	2147,1	0,26	43,0	11,9	47,0	0,0	1268,9	1879,3
12	Terr.		126,0	26,9	18,0	2268,0	0,26	43,0	25,5	33,0	0,0	811,7	1985,1
13	Terr.		2,4	26,9	18,0	43,7	0,26	55,0	12,8	33,0	0,0	10,1	42,5

FS = 1,0





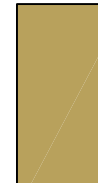



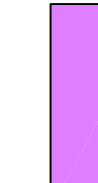
Frana di seconda generazione - Pendio con falda 1														
Concio	CLASSE	A ₁ (m ²)	A ₂ (m ²)	γ ₁ (kN/m ³)	γ ₂ (kN/m ³)	Wtot (kN)	α (°)	hw (m)	l (m)	U (kN)	φ (°)	c (kN/m ²)	Tagenti (kN)	Tmax (kN)
1	H	166,7		26,9		4484,2	16,0	3,1	26,7	807,0	50,0	0,0	1236,0	4175,3
2	H	249,7		26,9		6716,9	21,0	6,0	16,8	984,5	50,0	0,0	2407,1	6299,9
3	H	298,4		26,9		8027,0	21,0	7,7	16,6	1253,3	50,0	0,0	2876,6	7437,2
4	P	470,1		26,9		12645,7	23,0	9,7	23,9	2281,8	34,0	0,0	4941,1	6312,5
5	P	388,7		26,9		10456,0	26,0	10,5	16,4	1689,7	34,0	0,0	4583,6	5199,2
6	P	561,9		26,9		15115,1	28,0	9,9	22,1	2140,0	34,0	0,0	7096,1	7558,4
7	M	493,5		26,9		13275,2	33,0	7,9	21,4	1653,6	45,0	0,0	7230,2	9479,9
7	H	315,7		26,9		8492,3	38,0	5,1	16,3	809,4	50,0	0,0	5228,4	7010,7
9	H	276,2	0,2	26,9	18,0	7433,4	41,0	1,9	17,3	324,6	50,0	0,0	4876,7	6299,0
10	H	106,8	20,5	26,9	18,0	3241,9	42,0	0,0	11,0	0,0	50,0	0,0	2169,3	2871,2
11	I	39,2	60,7	26,9	18,0	2147,1	43,0	0,0	11,9	0,0	47,0	0,0	1464,3	1683,9
12	Terr.		126,0	26,9	18,0	2268,0	43,0	0,0	25,5	0,0	33,0	0,0	1546,8	1077,2
13	Terr.		2,4	26,9	18,0	43,7	55,0	0,0	12,8	0,0	33,0	0,0	35,8	16,3

FS = 1,4


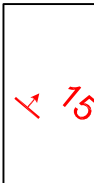
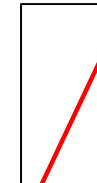
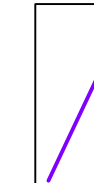


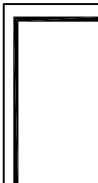
Frana di seconda generazione - Pendio con falda 2														
Concio	CLASSE	A ₁ (m ²)	A ₂ (m ²)	γ ₁ (kN/m ³)	γ ₂ (kN/m ³)	Wtot (kN)	α (°)	hw (m)	l (m)	U (kN)	φ (°)	c (kN/m ²)	Tagenti (kN)	Tmax (kN)
1	H	166,7		26,9		4484,2	16,0	6,6	26,7	1731,6	50,0	0,0	1236,0	3073,5
2	H	249,7		26,9		6716,9	21,0	13,2	16,8	2165,0	50,0	0,0	2407,1	4893,1
3	H	298,4		26,9		8027,0	21,0	16,9	16,6	2747,7	50,0	0,0	2876,6	5656,1
4	P	470,1		26,9		12645,7	23,0	17,1	23,9	4003,2	34,0	0,0	4941,1	5151,4
5	P	388,7		26,9		10456,0	26,0	21,3	16,4	3416,4	34,0	0,0	4583,6	4034,5
6	P	561,9		26,9		15115,1	28,0	24,5	22,1	5307,9	34,0	0,0	7096,1	5421,7
7	M	493,5		26,9		13275,2	33,0	22,6	21,4	4752,7	45,0	0,0	7230,2	6380,7
7	H	315,7		26,9		8492,3	38,0	20,8	16,3	3317,4	50,0	0,0	5228,4	4021,8
9	H	276,2	0,2	26,9	18,0	7433,4	41,0	17,1	17,3	2907,5	50,0	0,0	4876,7	3220,7
10	H	106,8	20,5	26,9	18,0	3241,9	42,0	13,6	11,0	1467,1	50,0	0,0	2169,3	1122,8
11	I	39,2	60,7	26,9	18,0	2147,1	43,0	9,4	11,9	1093,9	47,0	0,0	1464,3	510,8
12	Terr.		126,0	26,9	18,0	2268,0	43,0	5,5	25,5	1371,6	33,0	0,0	1546,8	186,5
13	Terr.		2,4	26,9	18,0	43,7	55,0	2,4	12,8	303,6	33,0	0,0	35,8	-180,9

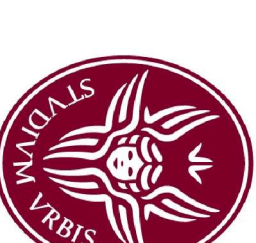
FS = 1,0

LEGENDA GEOLOGICA

-  **Depositi di versante.**
Dentro di versanti non differenziato in base alle differenti tipologie di fenomeni gravitativi. Lungo la costa spesso sono rappresentati da enormi blocchi di roccia comparsa dal movimento del versante. (OLOCENI)
-  **Depositi di piana costiera recenti ed alluvionali**
Depositi di conoidi alluvionali, depositi alluvionali recenti e depositi costieri attuali, da (OLOCENI)
-  **Depositi di versante ed aluvio-colluviale.**
Depositi alluvionali derivanti dalla degradazione incoerente del fango alluvionali, ma sono composti da grossi ciottoli di calcare e sabbie. Sono presenti in alcune zone di versante di versante marino del IV ordine. (OLOCENI)
-  **Depositi di riacordo, antichi e recenti.**
Depositi quarternari costali, non stratificati e con cunei spigolati di natura cristallino-metamorfica. Sono prevalentemente costituiti da sabbie e ghiaie. Sono presenti in alcune zone di versante marino del IV ordine. (OLOCENI)
-  **Depositi marini terrazzati** (districabili in più ordini gerarchici).
Facies da marino a continentali, dai spessori variabili da pochi metri alle alcune decine di metri. (PLISTOCENE MEDIO-SUPERIORE)
-  **Sabbie Plio-pliostoceniche**
Sabbie di origine marina, da medie a fini, giallastre, con livelli conglomeratici continentali (PLIO-PLISTOCENE INFERIORE)
-  **Migmatiti della roccia di Scilla.**
Gneiss migmatitici, scissurabili all'origine e tendenti a diventare granitici. Presentano una certa differenziazione tra versante a sud-ovest e nord-ovest.
-  **Substrato cristallino-metamorfico.**
Gneiss, plutoni da intervento fatturati a cadassati.
-  **Substrato cristallino-metamorfico.**
Basamento costituito da gneiss e graniti. Sono presenti in alcune zone di versante marino del IV ordine. (CARBONIFERO-FERRINIANO)

Altri simboli

-  Limite stratigrafico.
-  Gabbura (SB).
-  Faglia certa.
-  Faglia presunta.
-  O 28
Rilievo geomorfologico in gneiss.
-  ST 12
Rilievo geomorfologico in roccie granitoidi.
-  Aree interessate dalle frane studiate in dettaglio e cartografate a scala maggiore in allegato 2.



UNIVERSITA' DI ROMA SAPIENZA

FAOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE,
FISICHE E NATURALI

DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE DELLA TERRA
XXIII CICLO

Approcci equivalenti continui
nella costruzione di modelli geologico-tecnici
di versanti naturali in roccia

ALLEGATO 1 - TAVOLA 1,1

Carta geologica - ZONA A

Scala 1:10.000

Docente guida:

Prof. Alberto Preslinzi

Codocenti guida:

Prof.ssa Francesca Bozzano

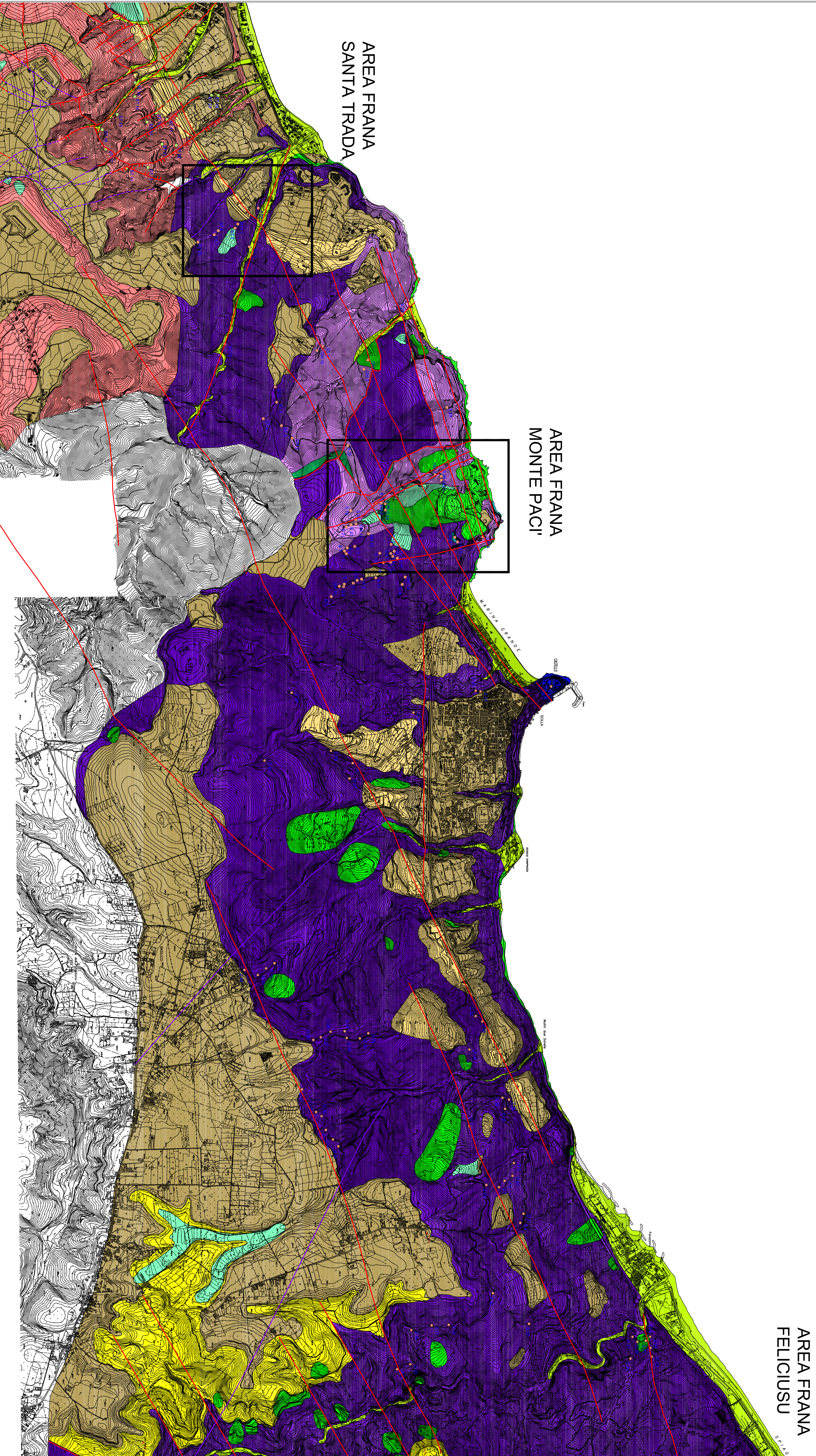
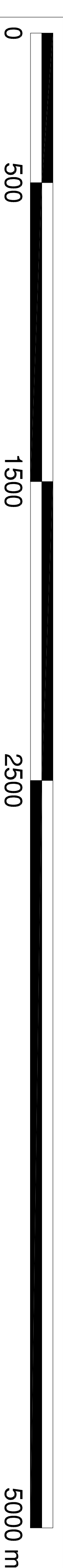
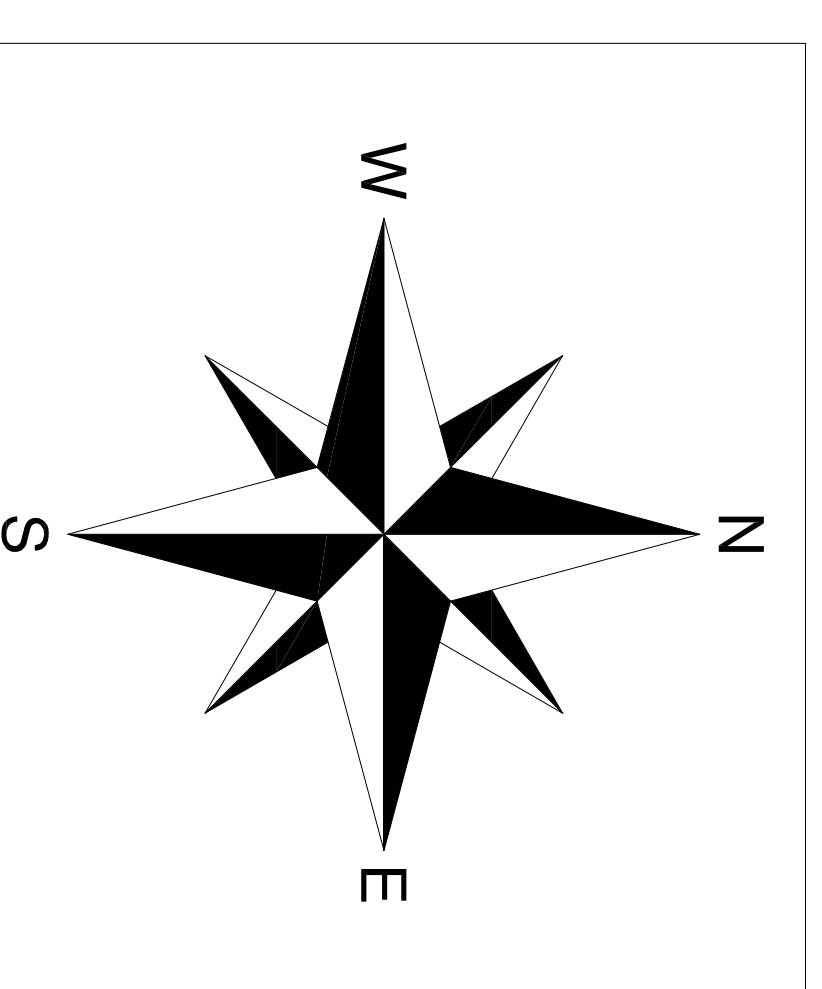
Dott. Salvatore Marino

Dottorando:



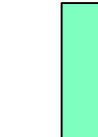

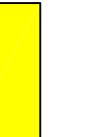


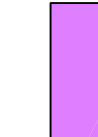


Dott. Alfredo Montagna

Matr. 692784



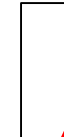

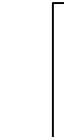


ANNO ACCADEMICO 2010 - 2011



LEGENDA GEOLOGICA

-  **Depositi di versante.**
Dentro di versanti non differenziato in base alle differenti tipologie di fenomeni gravitativi. Lungo la costa spesso sono rappresentati da enormi blocchi di roccia conseguenza dell'interamento della massa. (CLOCENI)
-  **Depositi di piana costiera recenti ed alluvionali**
Depositi di conoidi alluvionali, depositi alluvionali recenti e depositi costieri attuali, da (CLOCENI)
-  **Depositi di versante ed alivio-collinare.**
Depositi alluvionali derivanti dalla degradazione incoerente dei fanghi affluenti. Sono compattati e spessi. Sono formati dalla sovrapposizione di versanti marino del IV ordine. (CLOCENI)
-  **Depositi di raccordo, antichi e recenti.**
Depositi quarziferi corali, non stratificati e con cunei spigolati di natura cristallino-metamorfica. Sono gravo-sedimentari e con presenza di matrici sabbiose rossastre. (CLOCENI)
-  **Depositi marini terrazzati** (districabili in più ordini spaziali).
Facies da marine a continentali, dai spessori variabili da pochi metri alle alcune decine di metri. (CLOCENI MEDIO-SUPERIORE)
-  **Sabbie Pilo-pleistoceniche**
Sabbie di origine marina, da medie a fini, giallastre, con livelli conglomeratici continentali (PILLO-PLEISTOCENE INVERSONE)
-  **Migmatiti della roccia di Scilla.**
Gneiss migmatitici, strutturali all'origine e tendenti a melanomafici e melanomafici. Presentano una certa differenziazione tra versante e melanomafici.
-  **Diacli sedimentari carbonatici.**
Diacli sedimentari corali, non stratificati e con cunei spigolati di natura cristallino-metamorfica. Sono gravo-sedimentari e con presenza di matrici sabbiose rossastre. (CLOCENI)
-  **Substrato cristallino-metamorfico.**
Gneiss, plutoni di intervento fatturati a cadastri.
-  **Substrato cristallino-metamorfico.**
Basamento costituito da gneiss e graniti. (S) gneiss in associazione a melanomafici terrazzati (CARBONIFERO-FERRIANO)

Altri simboli

-  Limite stratigrafico.
-  Cambria (SB).
-  Faglia certa.
-  Faglia presunta.
-  O 28
Rilievo geomorfologico in gneiss.
-  ST 12
Rilievo geomorfologico in roccia granitoida.
-  Area interessata dalle frane studiate in dettaglio e cartografate a scala maggiore in allegato 2.

UNIVERSITA' DI ROMA SAPIENZA
 FACOLTA' DI SCIENZE MATEMATICHE,
 FISICHE E NATURALI

DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE DELLA TERRA
 XXIII CICLO

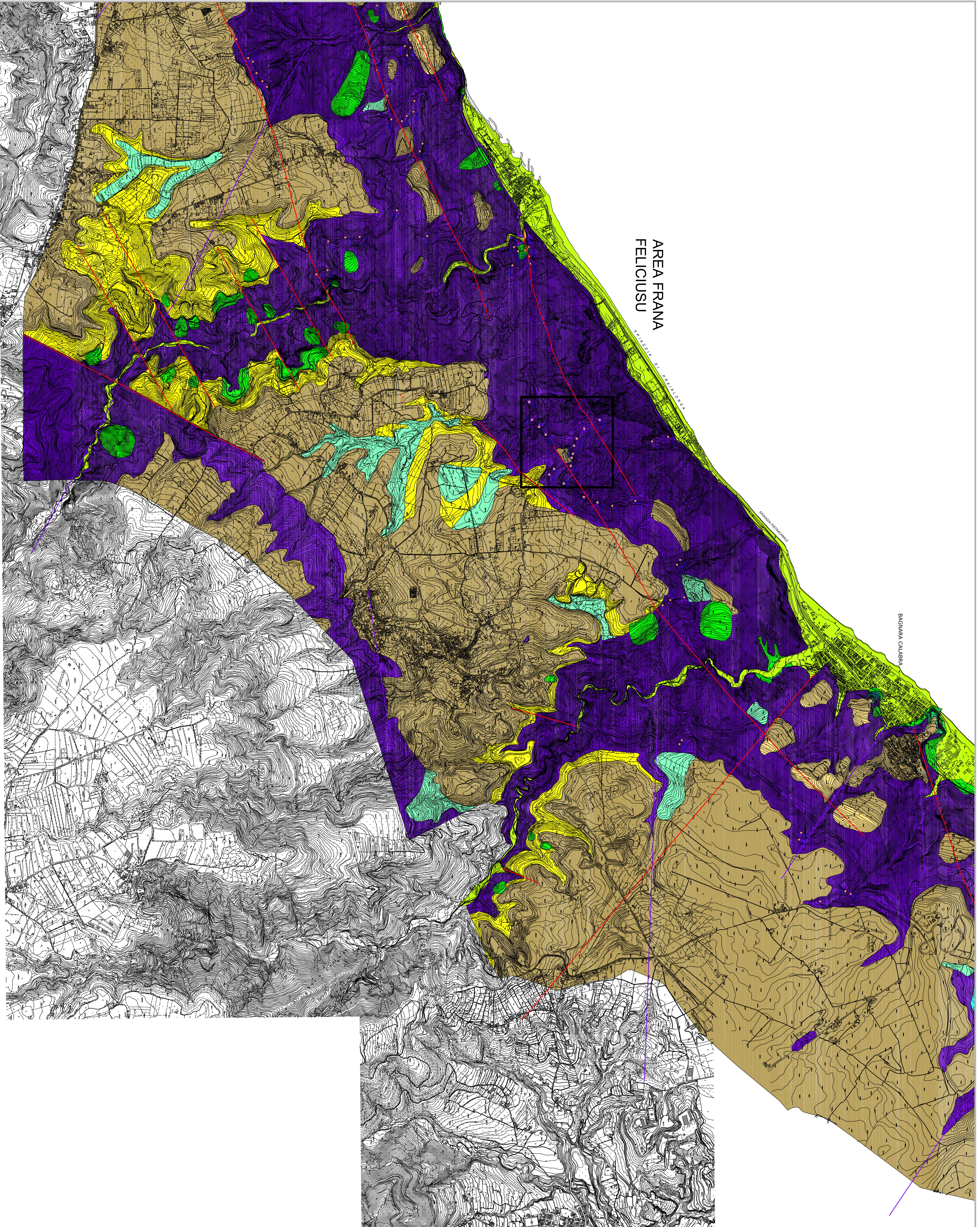
Approcci equivalenti continui
 nella costruzione di modelli geologico-tecnici
 di versanti naturali in roccia

ALLEGATO 1 - TAVOLA 1,2
 Carta geologica - ZONA B
 Scala 1:10.000

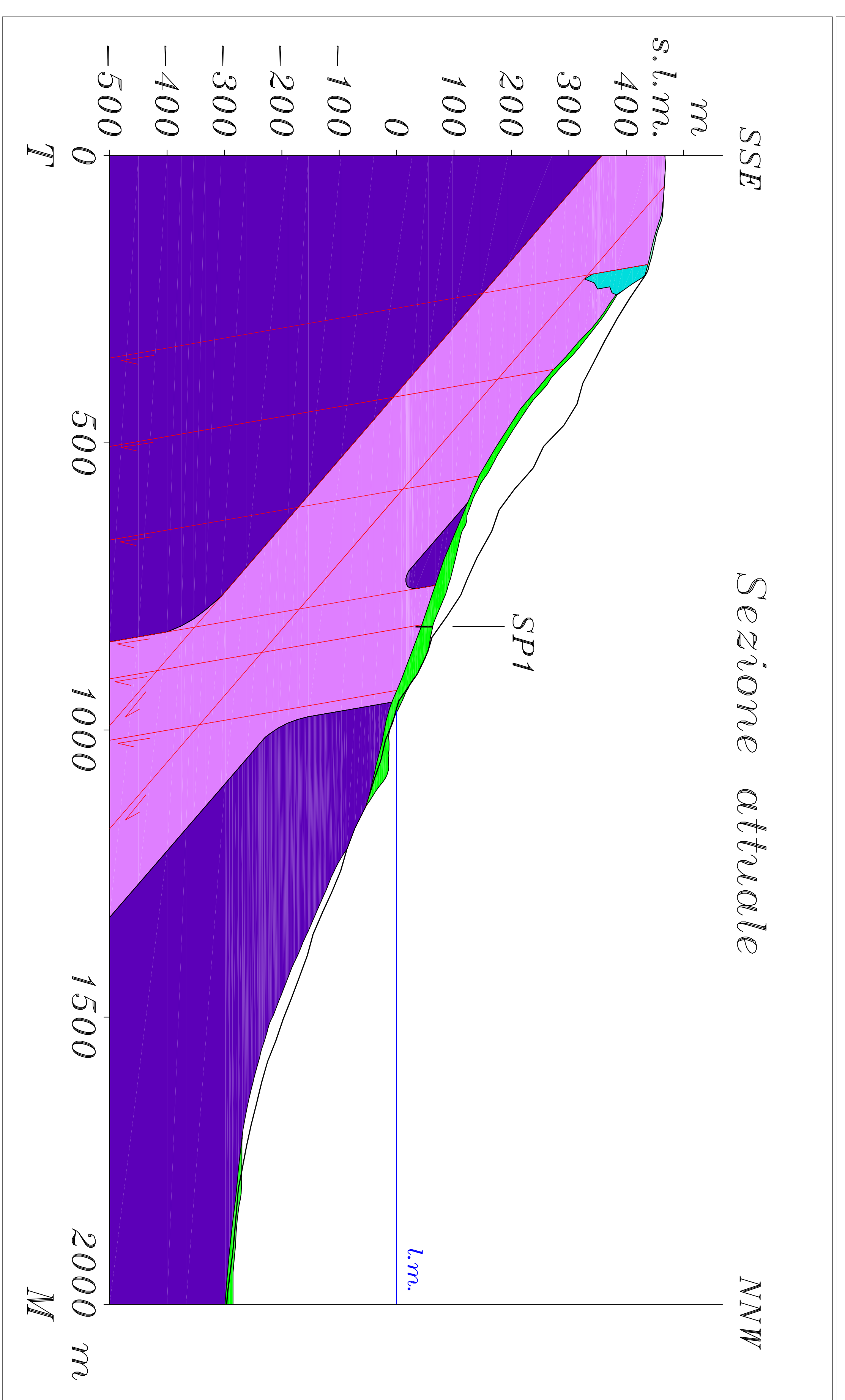
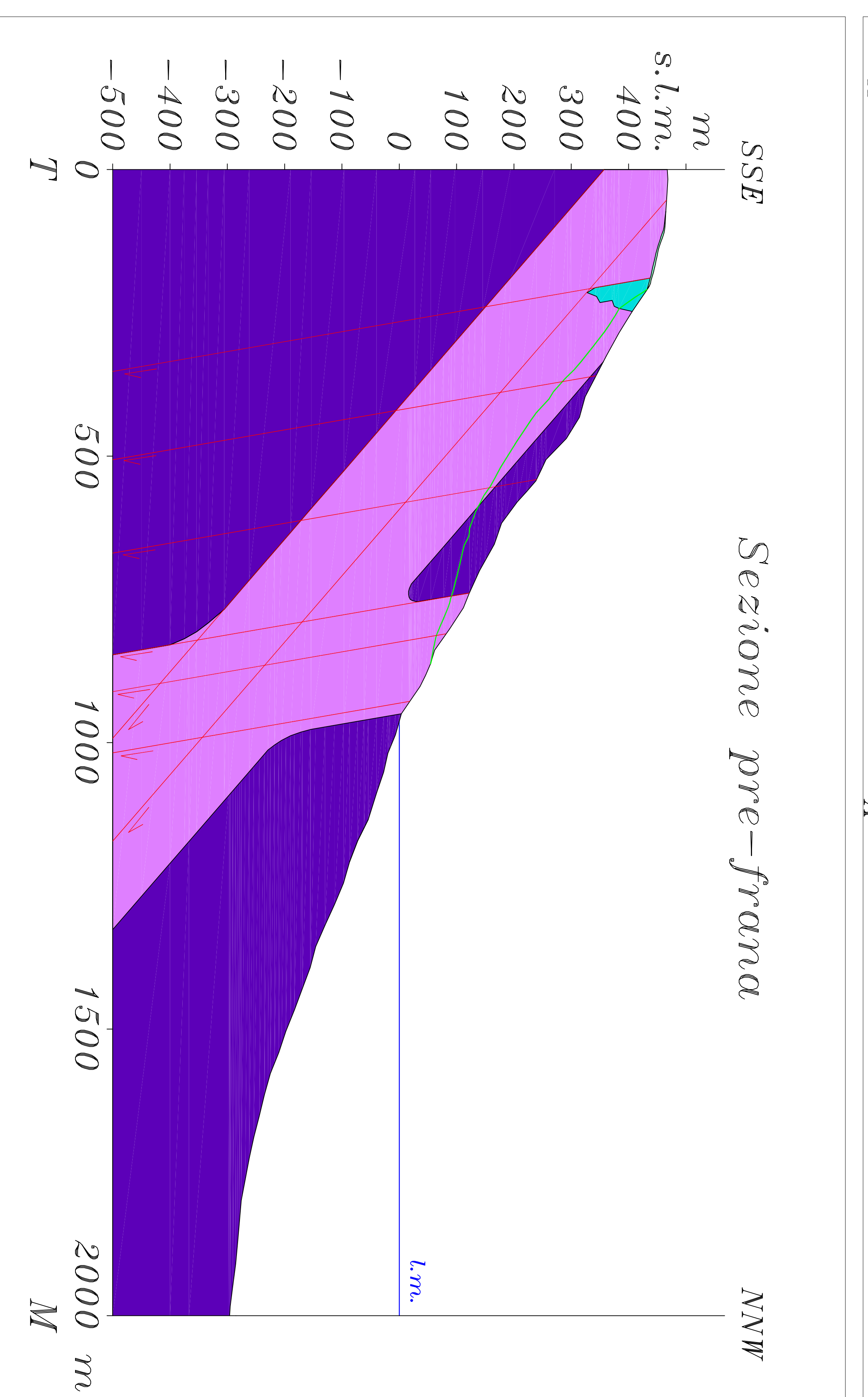
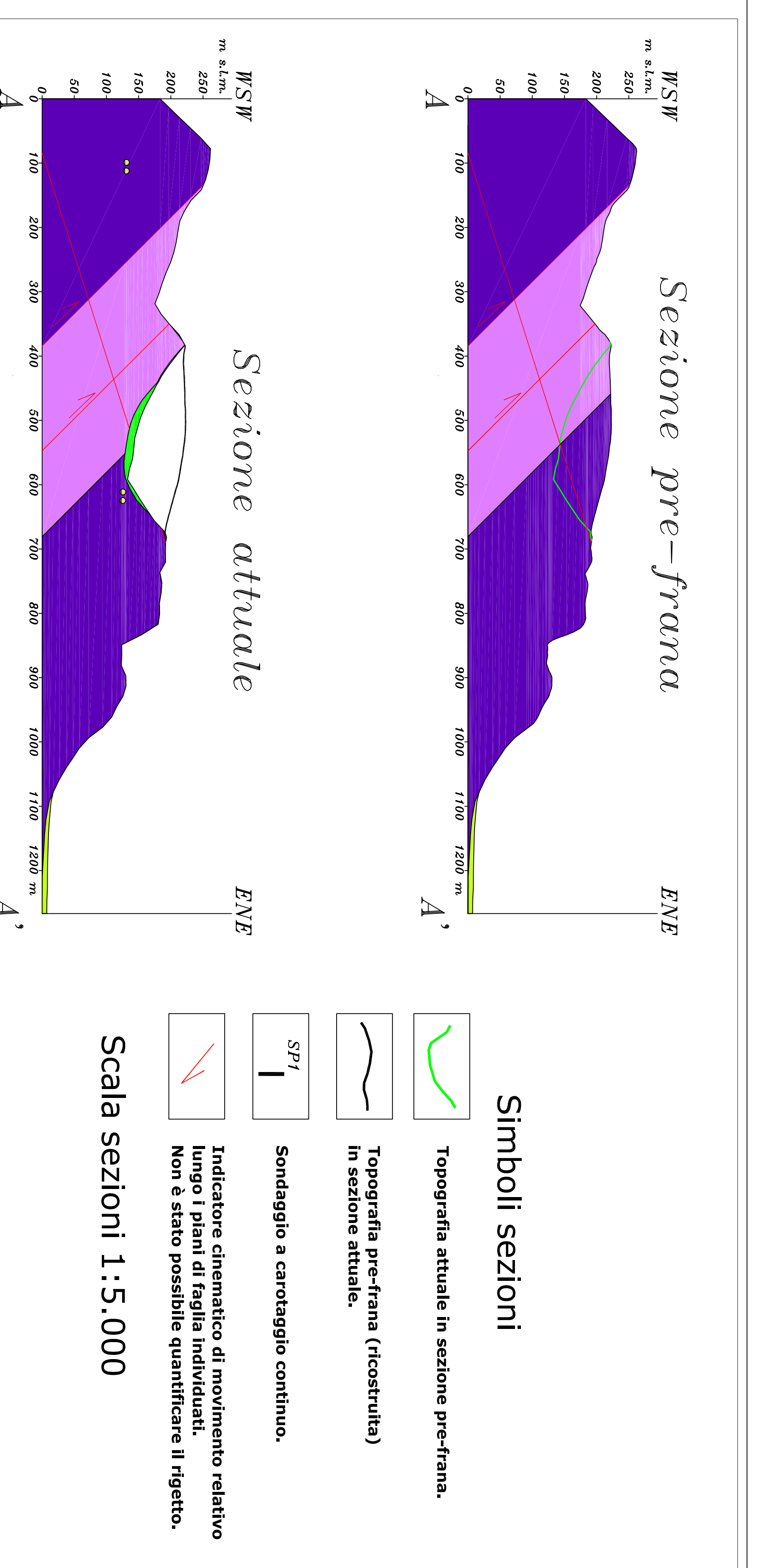
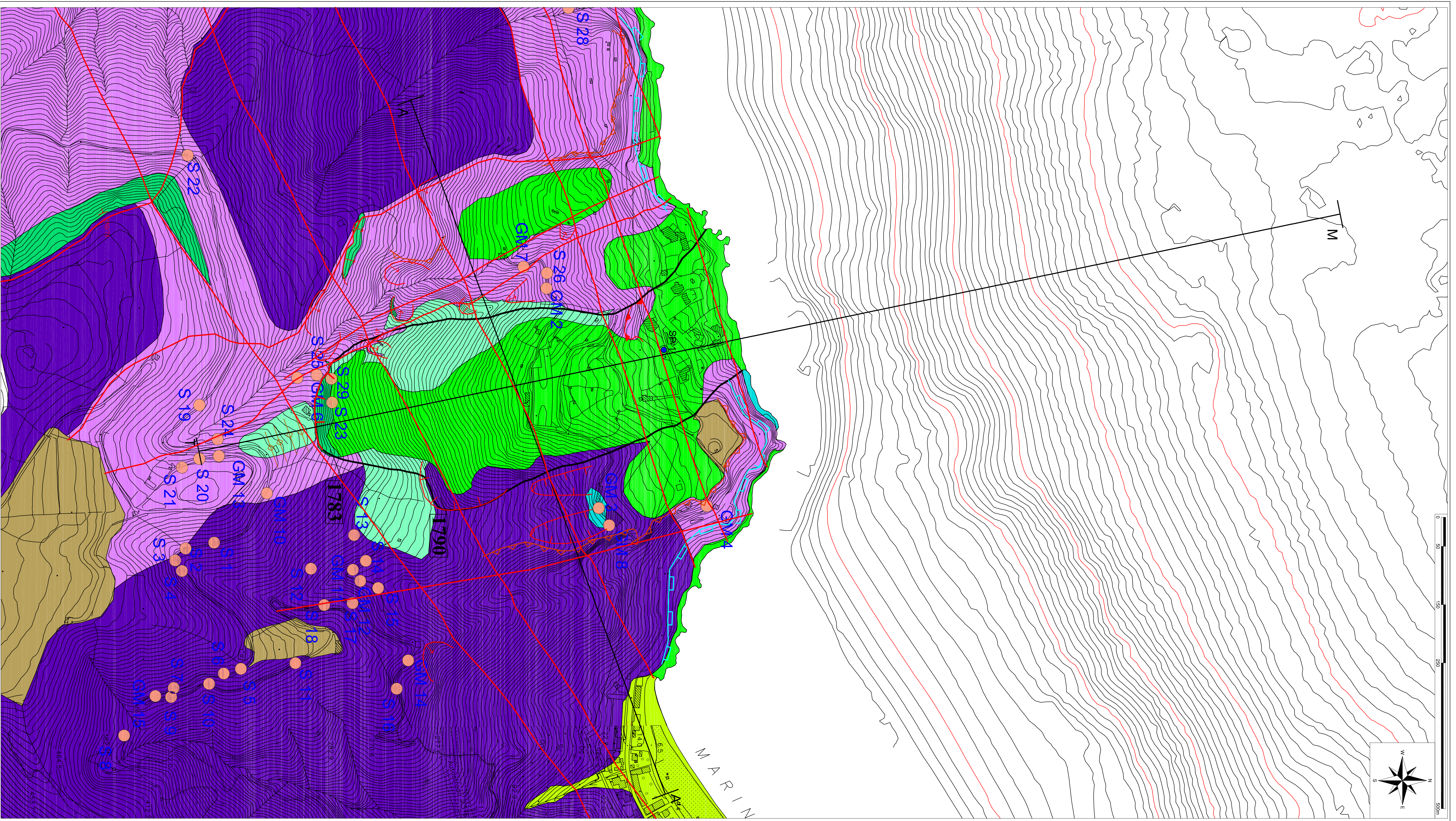
Docente guida:
 Prof. Alberto Preslinzi

Docenti guida:
 Prof.ssa Francesca Bozzano
 Dott. Salvatore Martino

Dottorando:
 Dott. Alfredo Montagna
 Matr. 692764



AREA FRANA FELICIJUSU



LEGENDA GEOMORFOLOGICA

Forme e processi gravitativi di versante

- Orlo di scarpata di frana per crollo.
- Orlo di scarpata di frana per scorrimento traslativo.
- Piccola frana non fedelmente cartografabile.
- Orlo di scarpata di degradazione.
- Limite areale della frana sismodotta del 1783.
- Forme e processi dovuti all'azione marina
- Orlo di falsata.

Dati strutturali

- giacitura (DIP).
- Faglia certa.
- Trincea/frattura.

Altri simboli

- Limite stratigrafico.
- Rilievo geomecánico su gneiss.
- Sondaggio a carotaggio continuo.
- Traccia di sezione.

LEGENDA GEOLOGICA

- Depositi di versante: riferenziano in base alle differenti litologie di fenomeni gravitativi. Lungo la costa spesso sono rappresentati da enormi blocchi di roccia conseguenza dell'arretramento della falda. (OLOCENE)
- Depositi di piena costiera recenti ed alluvionali: depositi di recente formazione e depositi costieri attuali, da antichi a recenti, costituiti essenzialmente da sabbie. (OLOCENE)
- Dietro di versante ed alivolo-collinare: Depositi detritici derivanti dalla degradazione in situ di rocce affioranti a loro composizione e generalmente sabbioso-argillosa. Sono costituiti da depositi di recente formazione dalla superficie al terzario risalito del IV ordine. (OLOCENE)
- Depositi marini terrazzati (eolipugili in più ordine gerarchici): Frutti di recente erosione di depositi sedimentati su piani terrazzi alle diverse epoche (PREISTORICHE-MEDIO-SUPERIORE)
- Rocce medio-torricati carbonatici: Incoerenti, interessate dalla presenza di dicchi sedimentari di natura carbonatica. Questi sono stati detriti in dicchi neturali (A) e dicchi neturali (B) in relazione alla loro genesi. (PREISTORICHE-MEDIO-SUPERIORE)
- Substrato cristallino-metamorfico: Gruppo parafeni del metamorfismo intermedio e calcareosi.
- Substrato cristallino-metamorfico: Basamento costituito da gneiss e graniti; fessurati (a) allineati gneissoidici e compattazione granulometrica e litomorfogenetica. (CARBONIFERO-PERMIANO)

UNIVERSITA' DI ROMA SAPIENZA

FACOLTA' DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E NATURALI

DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE DELLA TERRA XXIII CICLO

Approcci equivalenti continui nella costruzione di modelli geologico-tecnici di versanti naturali in roccia

ALLEGATO 2 - TAVOLA 2.1

Carta geologica con elementi geomorfologici dell'area di frana del Monte Paci

Scala planimetria 1:3.000

Docente guida: Prof. Alberto Preslinzi

Codocenti guida: Prof.ssa Francesca Bozzano, Dott. Salvatore Martino

Dottorando: Dott. Alfredo Montagna Matr. 692784

ANNO ACCADEMICO 2010 - 2011

LEGENDA GEOLOGICA

- Depositi di versante.**
Sedimento di frana non orientato in base alle differenti tipologie di fenomeni gravativi. L'unico riferimento è costituito dai versanti di frana, in conseguenza dell'invertimento della falda. (COLORE)
- Depositi marini terrazzati** (distinguibili in più ordini gerarchici).
Facies da mare a continentali. (a) spessori variabili da pochi metri alle diverse decine di metri. (b) spessori variabili da pochi metri alle diverse decine di metri. (COLORE/STRUTTURALE/STRATIGRAFICO)
- Sabbie filio-pleistoceniche.**
Sabbie di origine marina, da medie a fini, giallastre, con livelli conglomeratici continentali. (COLORE/STRATIGRAFICO)
- Substrato cristallino-metamorfico.**
gneiss, peliti o invertebrati naturali a cataclasi.
- Substrato cristallino-metamorfico.**
Basamento costituito da gneiss e graniti.
(a) gneiss da debolmente a mediamente fratturati (COLORE/STRATIGRAFICO/STRUTTURALE)
(b) gneiss da debolmente a mediamente fratturati (COLORE/STRATIGRAFICO/STRUTTURALE)

LEGENDA GEOMORFOLOGICA

Forme e processi gravitativi di versante

- Orio di scarpata di frana per crollo.**
- Orio di scarpata di frana per scorrimento roto-traslativo** (riferito anche alle scarpate secondarie riconosciute all'interno del movimento principale).
- Terrazzo di frana roto-traslativa in contropendenza.**
- Deposito di frana per crollo.**
- Superfici di scorrimento in sezione.**

Dati strutturali

- giacitura (Dip direction/Dip).**
- Faglia certa.**
- Trincea/frattura.**

Altri simboli

- Limite stratigrafico.**
- Limite geologico trasgressivo (in sezione).**
- Rilievo geomorfologico su gneiss.**
- Traccia di sezione.**
- Superficie di scorrimento basale nella sezione pre-frana.**
- Tracciato della costruenda galleria Feliciusu in sezione (tratteggiata se protetta).**



UNIVERSITÀ DI ROMA SAPIENZA

FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE,
FISICHE E NATURALI

DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE DELLA TERRA
XXIII CICLO

Approcci equivalenti continui
nella costruzione di modelli geologico-tecnici
di versanti naturali in roccia

ALLEGATO 2 - TAVOLA 2.2

Carta geologica con elementi geomorfologici
dell'area di frana Feliciusu

Scala 1:2.000

Docente guida:

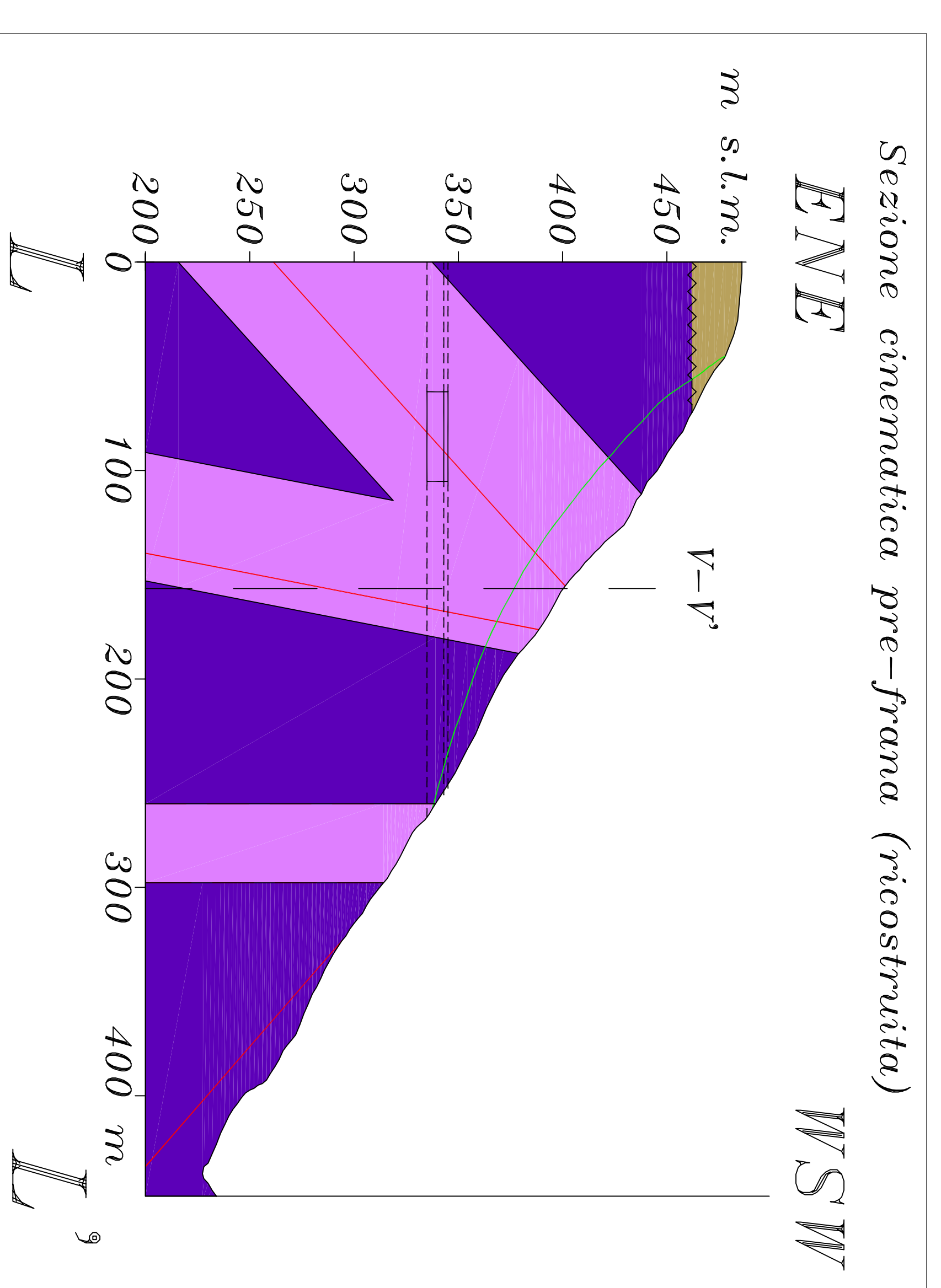
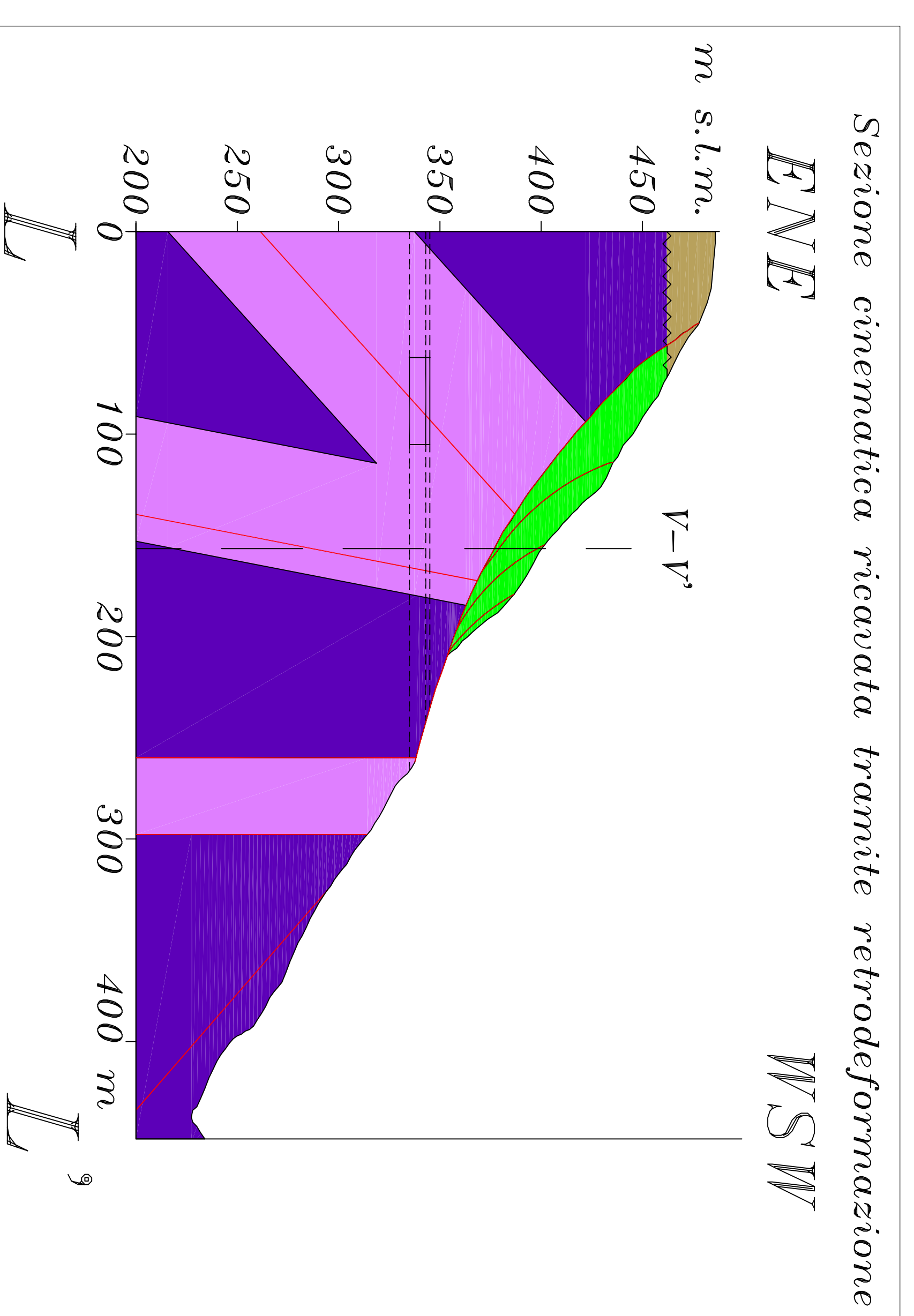
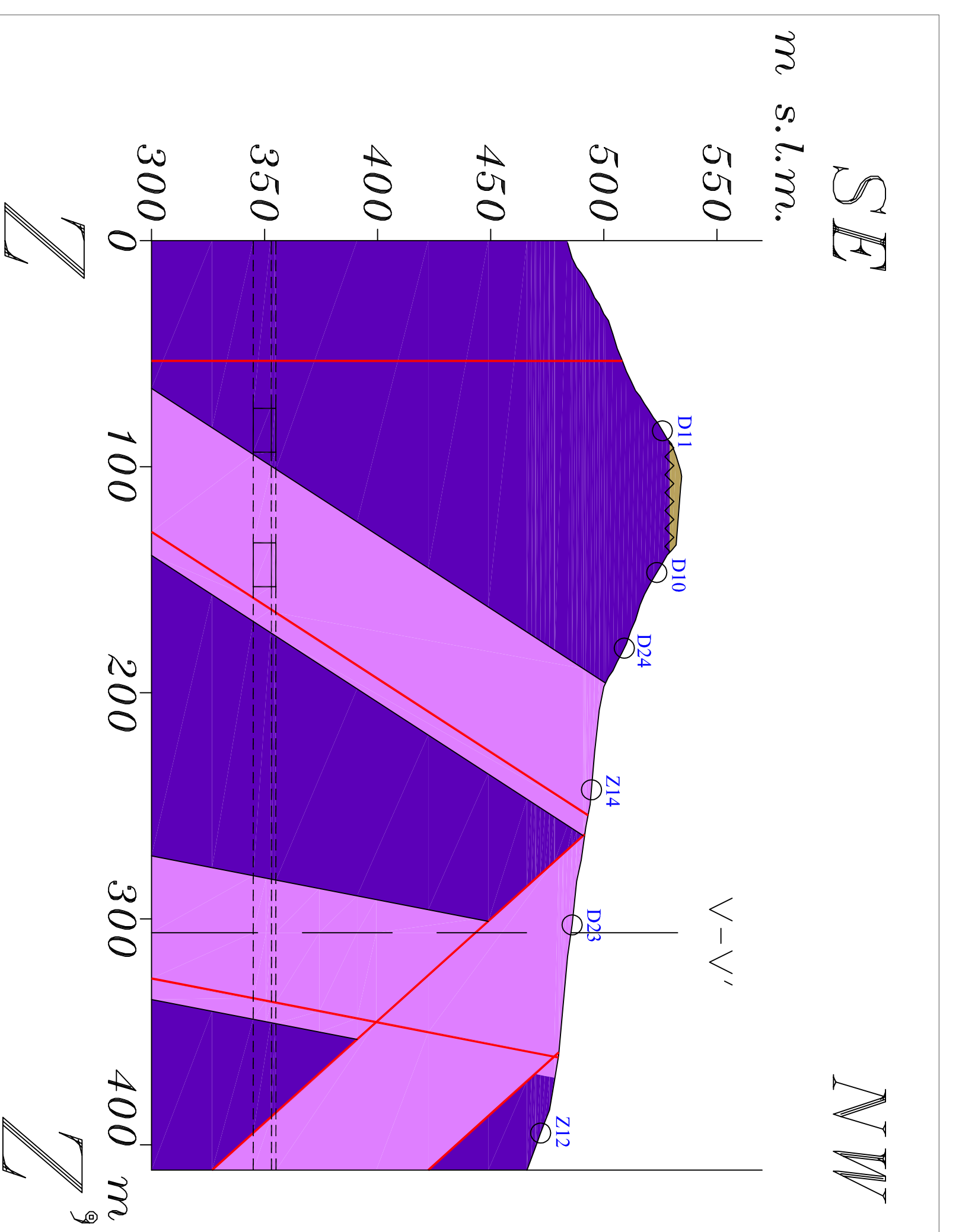
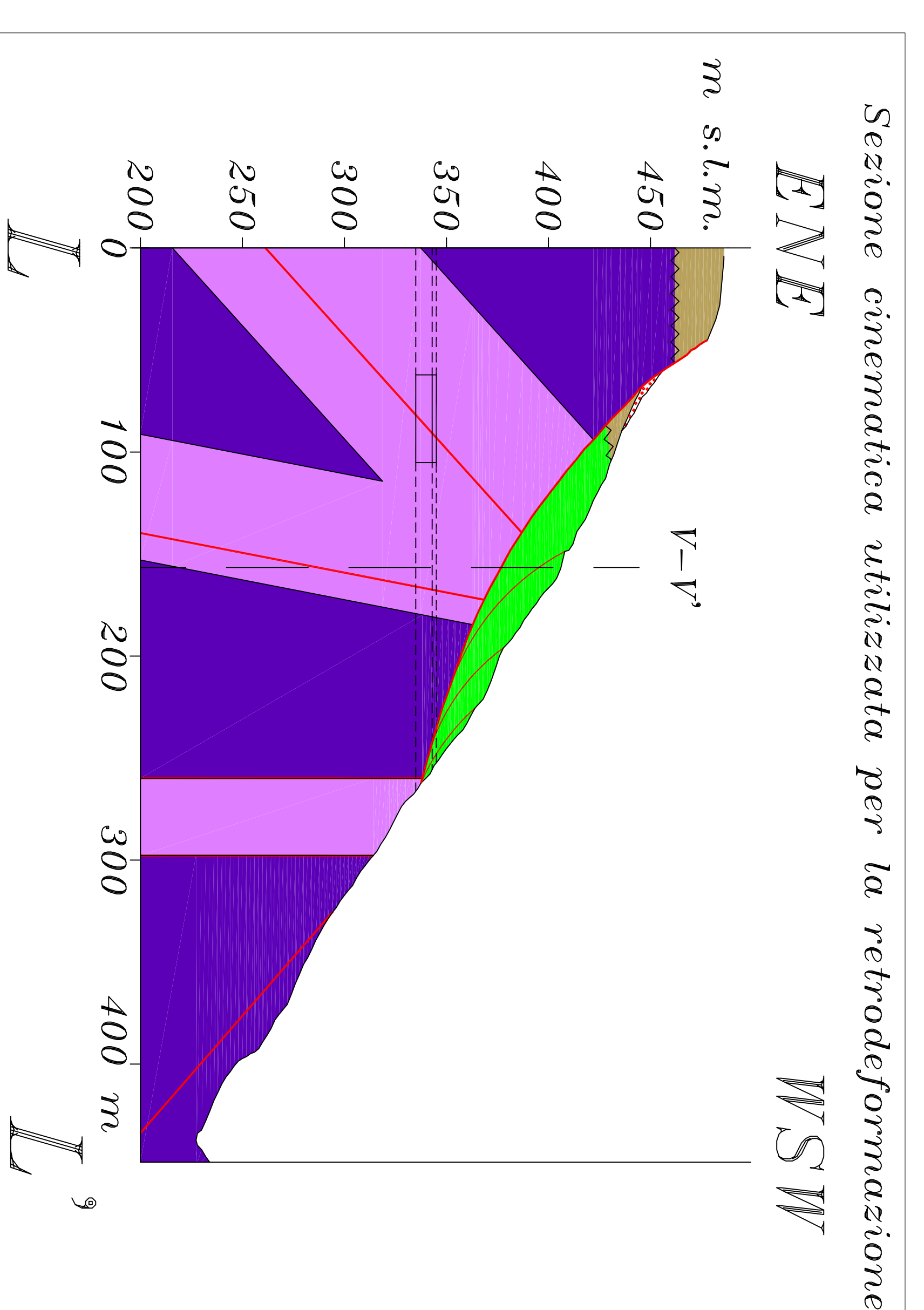
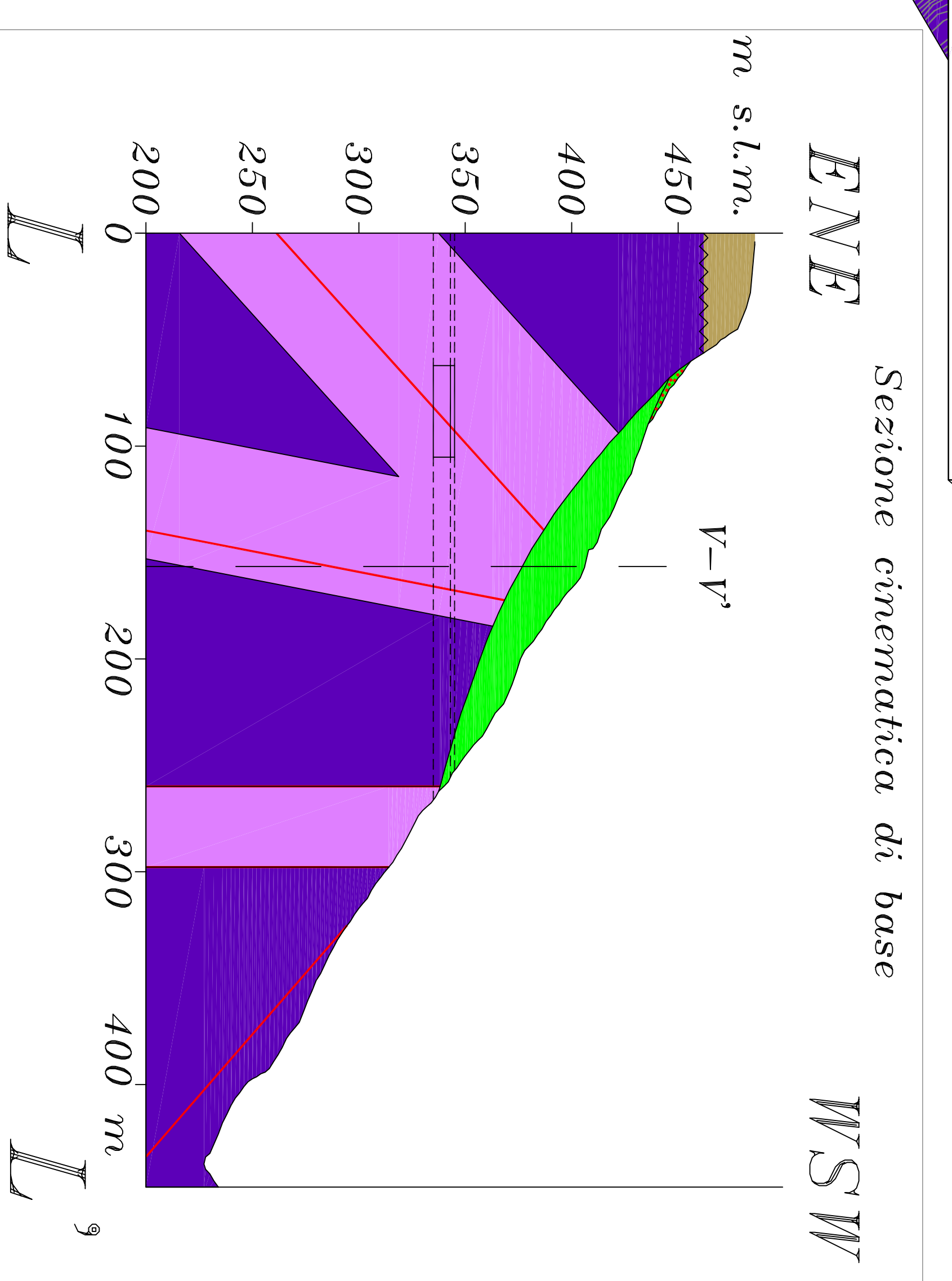
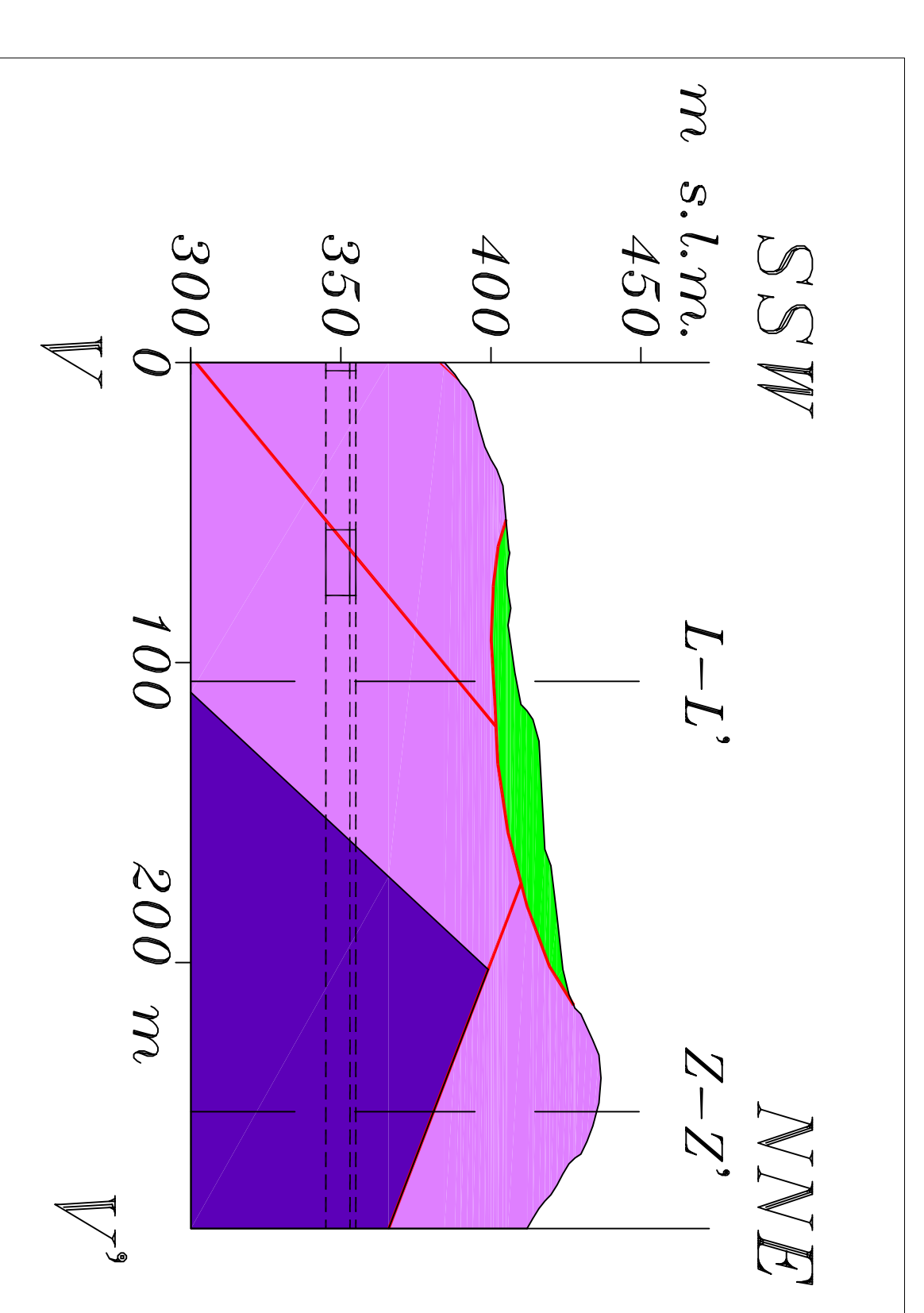
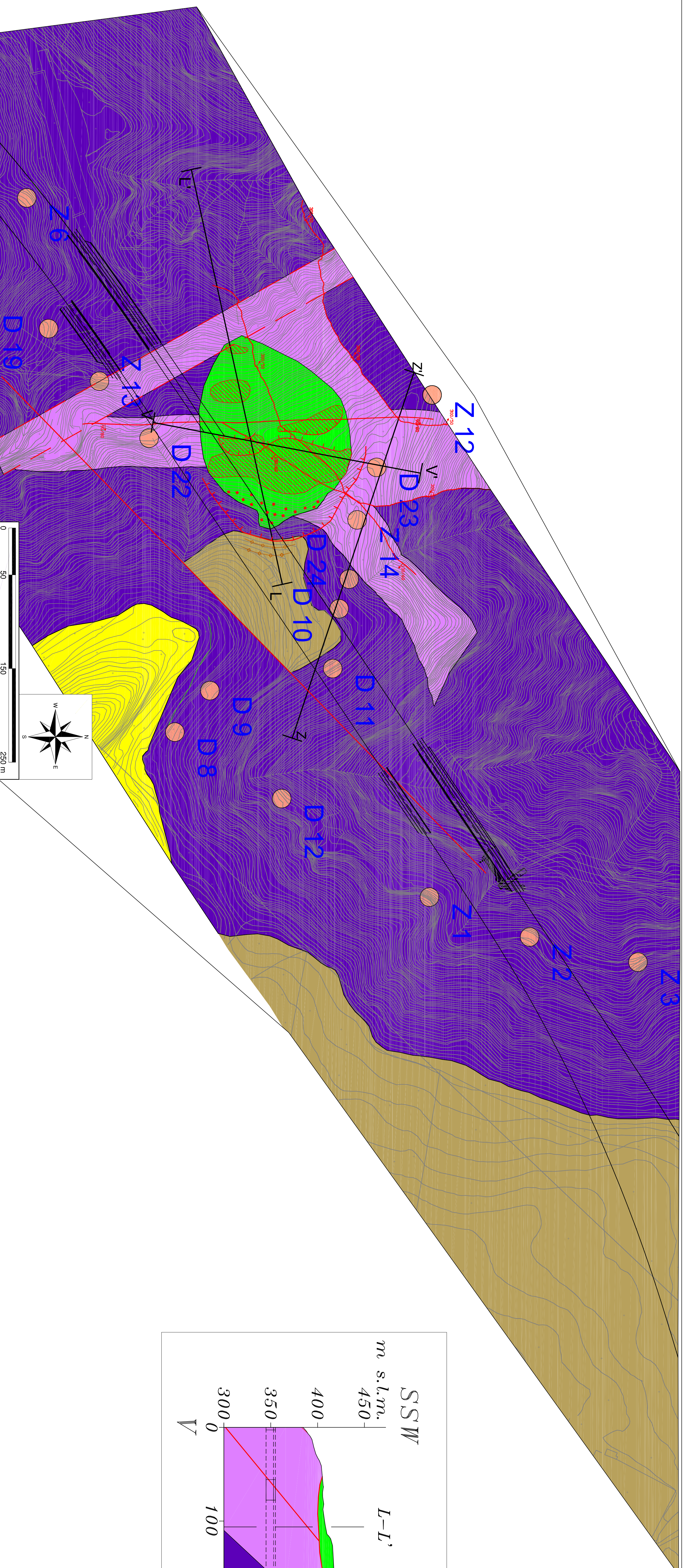
Prof. Alberto Preslinizi

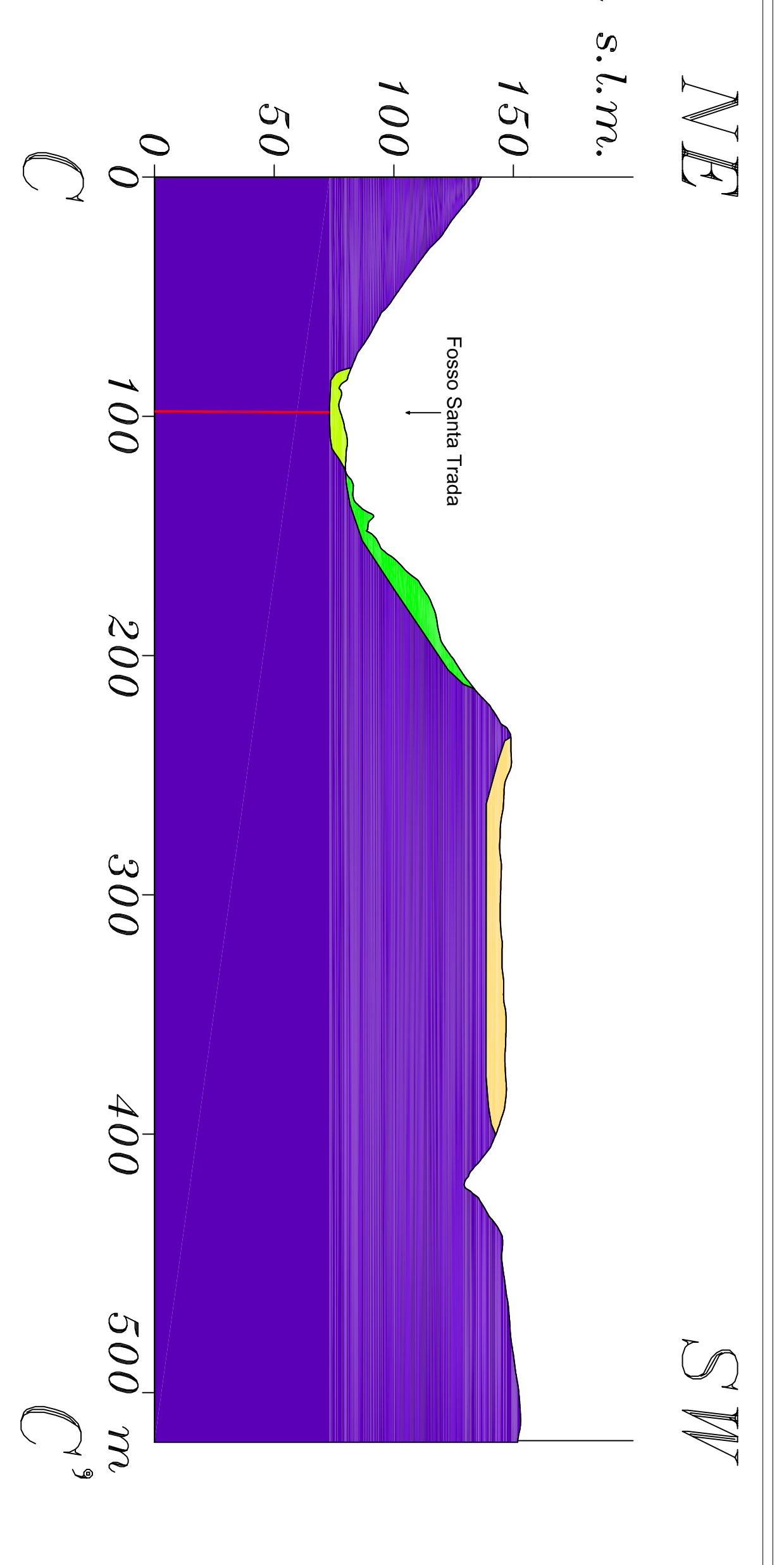
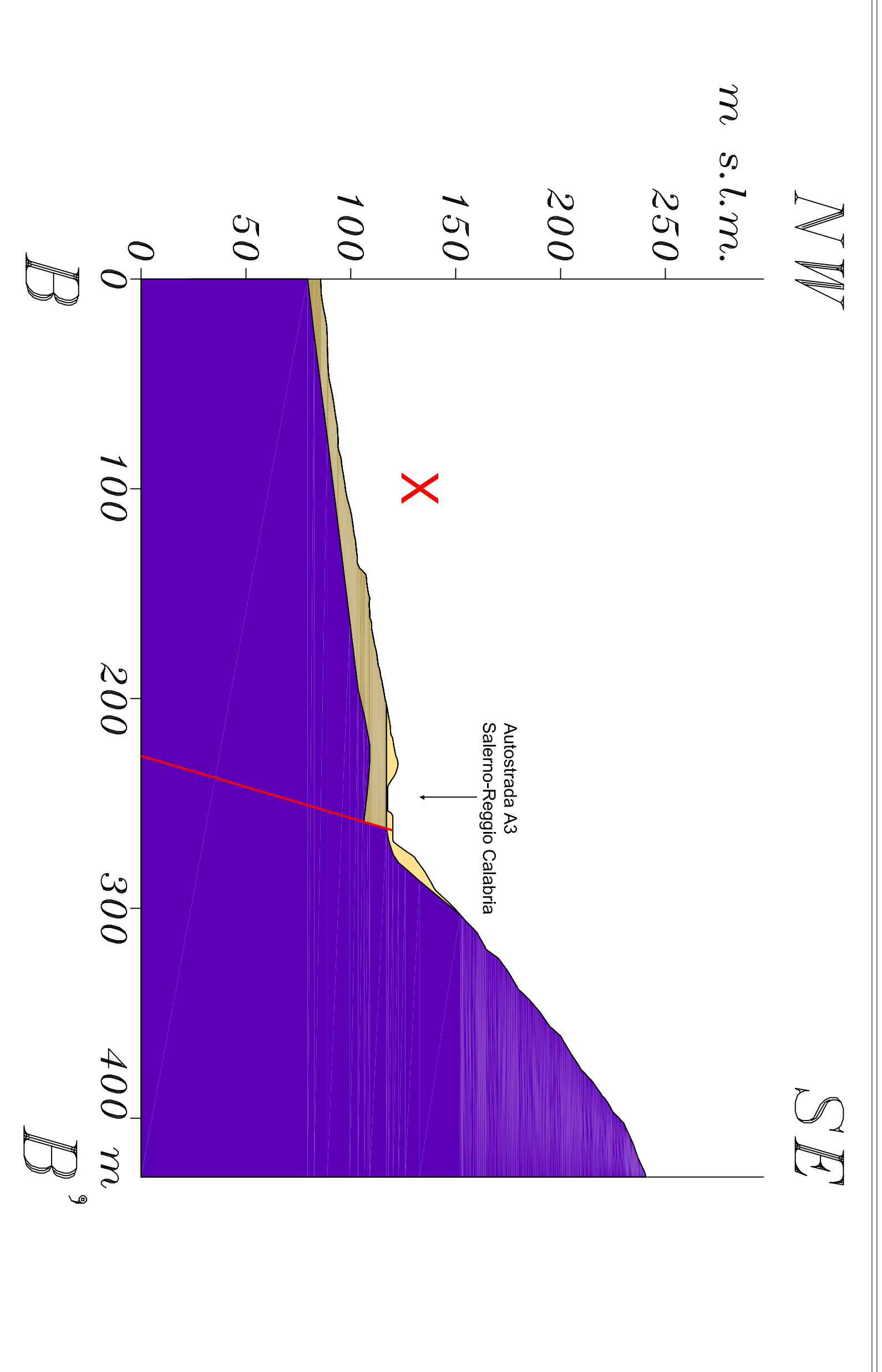
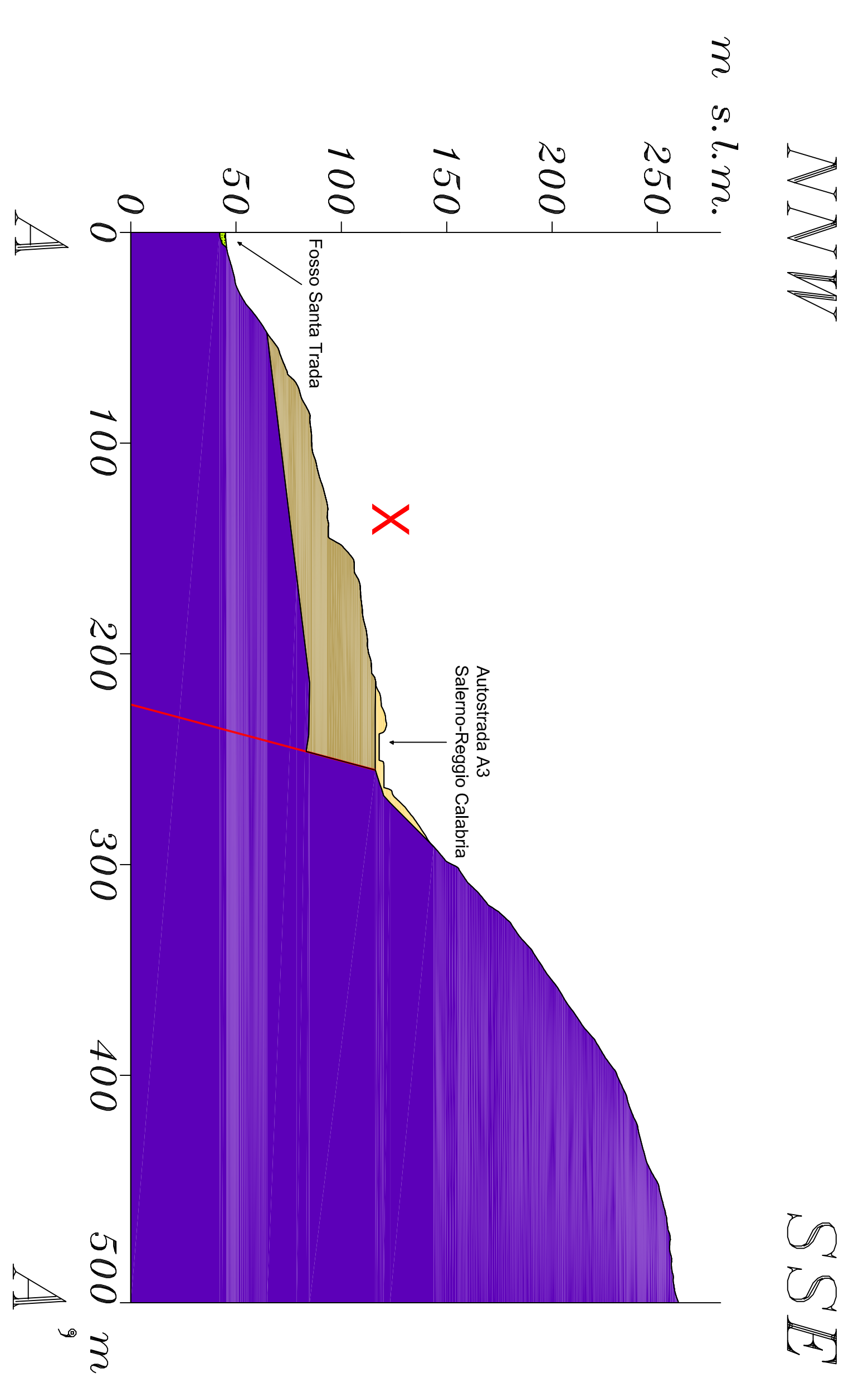
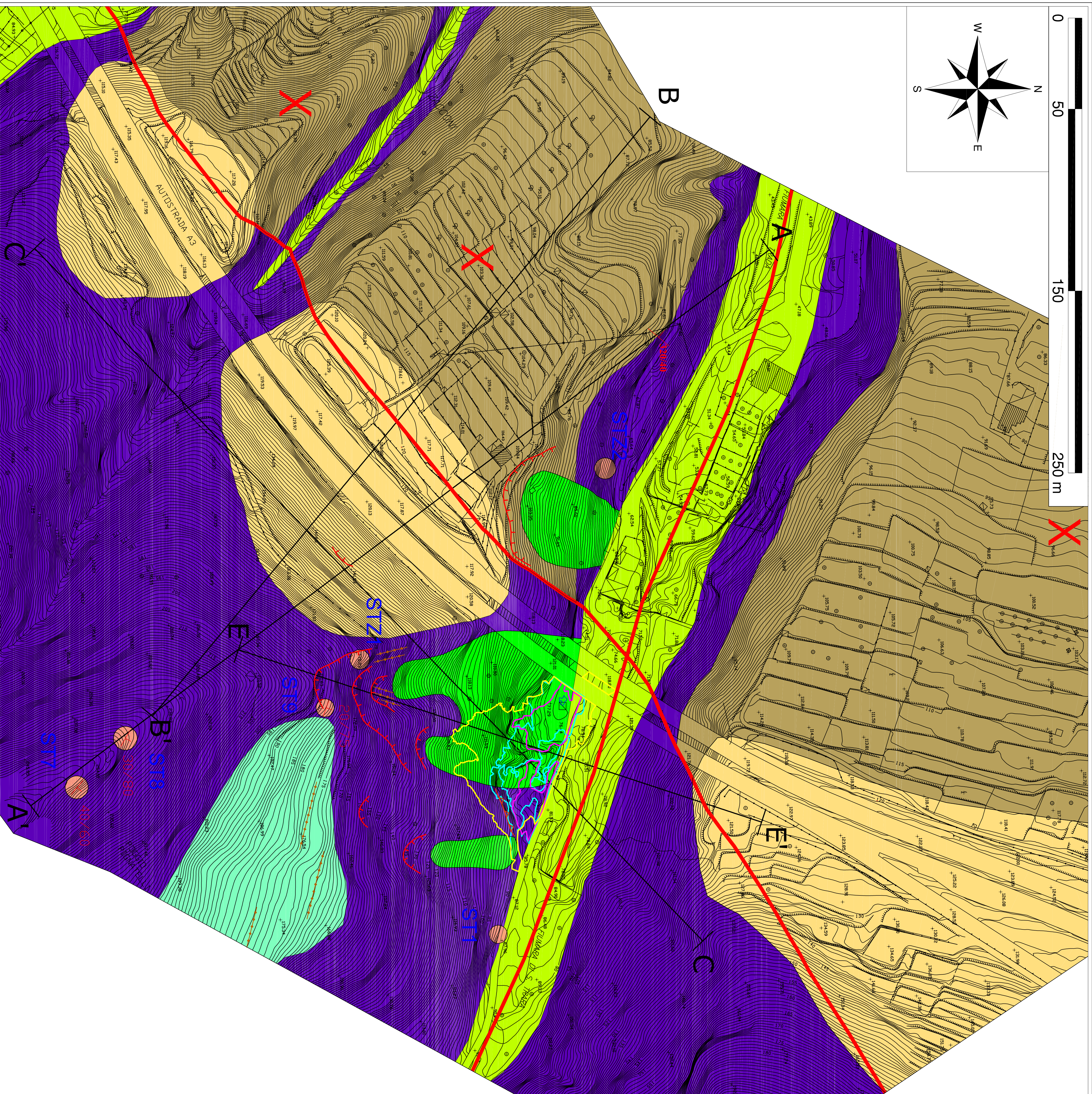
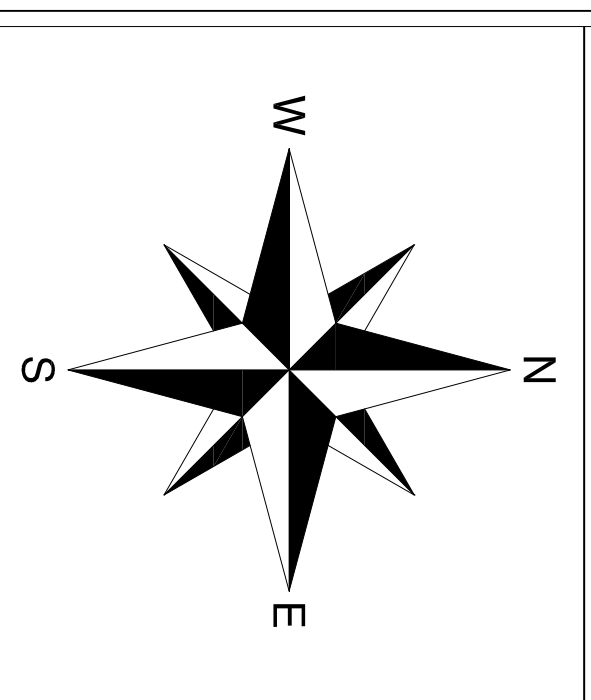
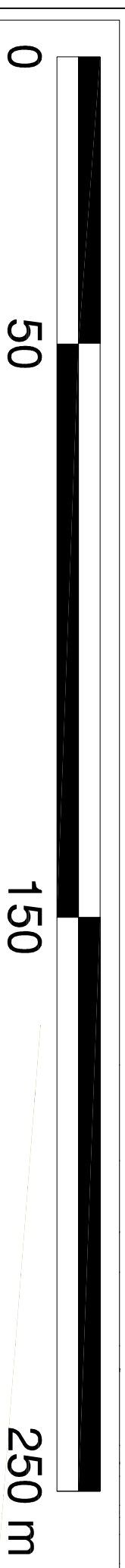
Codocenti guida:
Prof.ssa Francesca Bozzano
Dott. Salvatore Marino

Dottorando:

Dott. Alfredo Montagna
Matr. 692764

ANNO ACCADEMICO 2010 - 2011





LEGENDA GEOLOGICA

- Depositi di versante.**
Dipendi frane non differenziate in base alle differenti tipologie di fenomeni gravitativi. Lungo le coste spesso sono rappresentati da enormi blocchi di roccia conseguenza dell'arretramento della falda. (OLOCENE)
- Depositi di piano costiera recenti ed attuali ed alluvionali**
Depositi di conoidi alluvionali; depositi alluvionali recenti e depositi costieri attuali da attribuire a ST9, scelti considerati da ST8.
- Depositi di versante ed alluvio-colluviale.**
Depositi olocenici derivanti dalla degradazione meteorica dei litotipi affioranti, (a loro composizione è generalmente sabbioso-limosa, e subordinatamente argillosa. (OLOCENE)
- Depositi marini terrazzati** (fittigliabili in altri ordini gerarchici).
Facies da mare: a continentali. Gli spessori variano dai pochi alle diverse decine di metri. Viene indicato anche l'ordine gerarchico secondo la classificazione Miyuchi et al. (1994). (PLEISTOCENE MEDIO-SUPERIORE)
- Substrato cristallino-metamorfico.**
(a) anisotrofia da deformazione a mediamente fratturati
(b) anisotrofia da deformazione a composizione granodioritica e leucocromatica. (CARBONIFERO-PERMIANO)

LEGENDA GEOMORFOLOGICA

Forme e processi gravitativi di versante

- Orlo di scarpata di frana a prevalente movimento traslativo.**
- Orlo di scarpata di degradazione.**
- Superficie di scorrimento basale (in sezione).**

Dati strutturali

- glacitura (Dip direction/Dip).**
- Faglia certa.**
- Trincea/frattura.**

Altri simboli

- Limite stratigrafico.**
- Limite geologico trasgressivo (in sezione).**
- Rilievo geomeccanico su gneiss.**
- Traccia di sezione.**
- Limite area di cava luglio 2002.**
- Limite area di cava luglio 2005.**
- Limite area di cava luglio 2008.**

UNIVERSITA' DI ROMA SAPIENZA
FACOLTA' DI SCIENZE MATEMATICHE,
FISICHE E NATURALI

DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE DELLA TERRA
XXIII CICLO

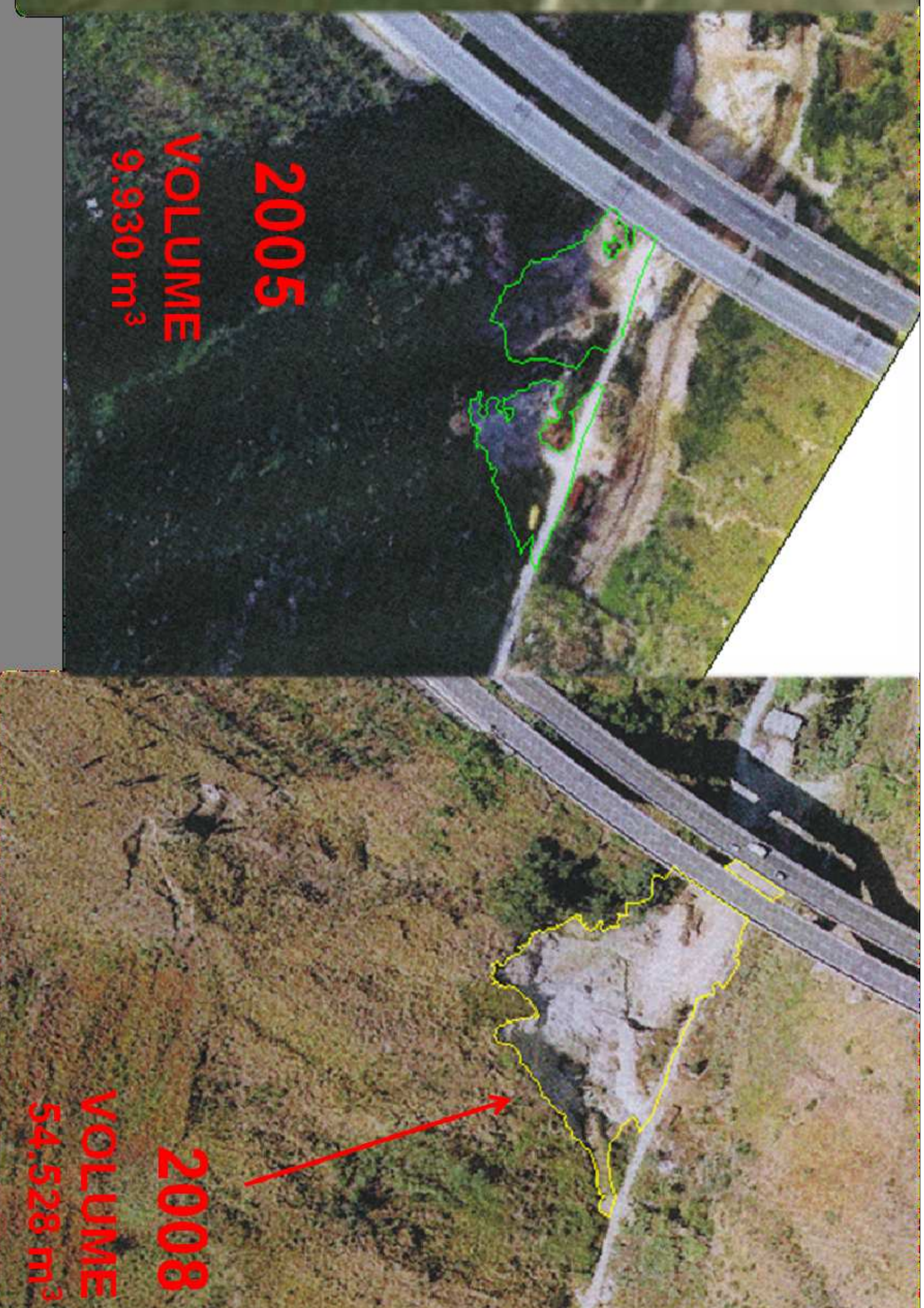
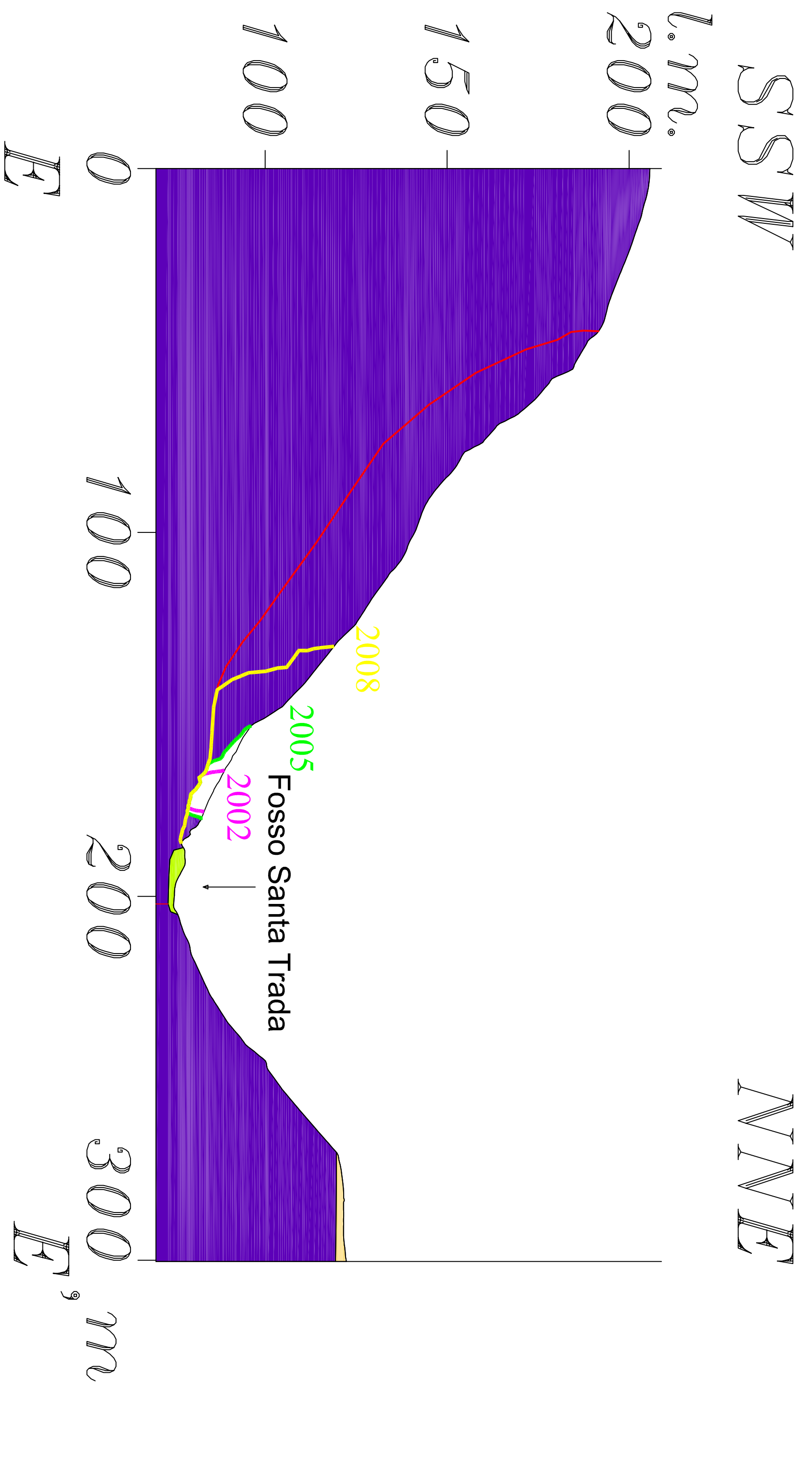
Approcci equivalenti continui
nella costruzione di modelli geologico-tecnici
di versanti naturali in roccia

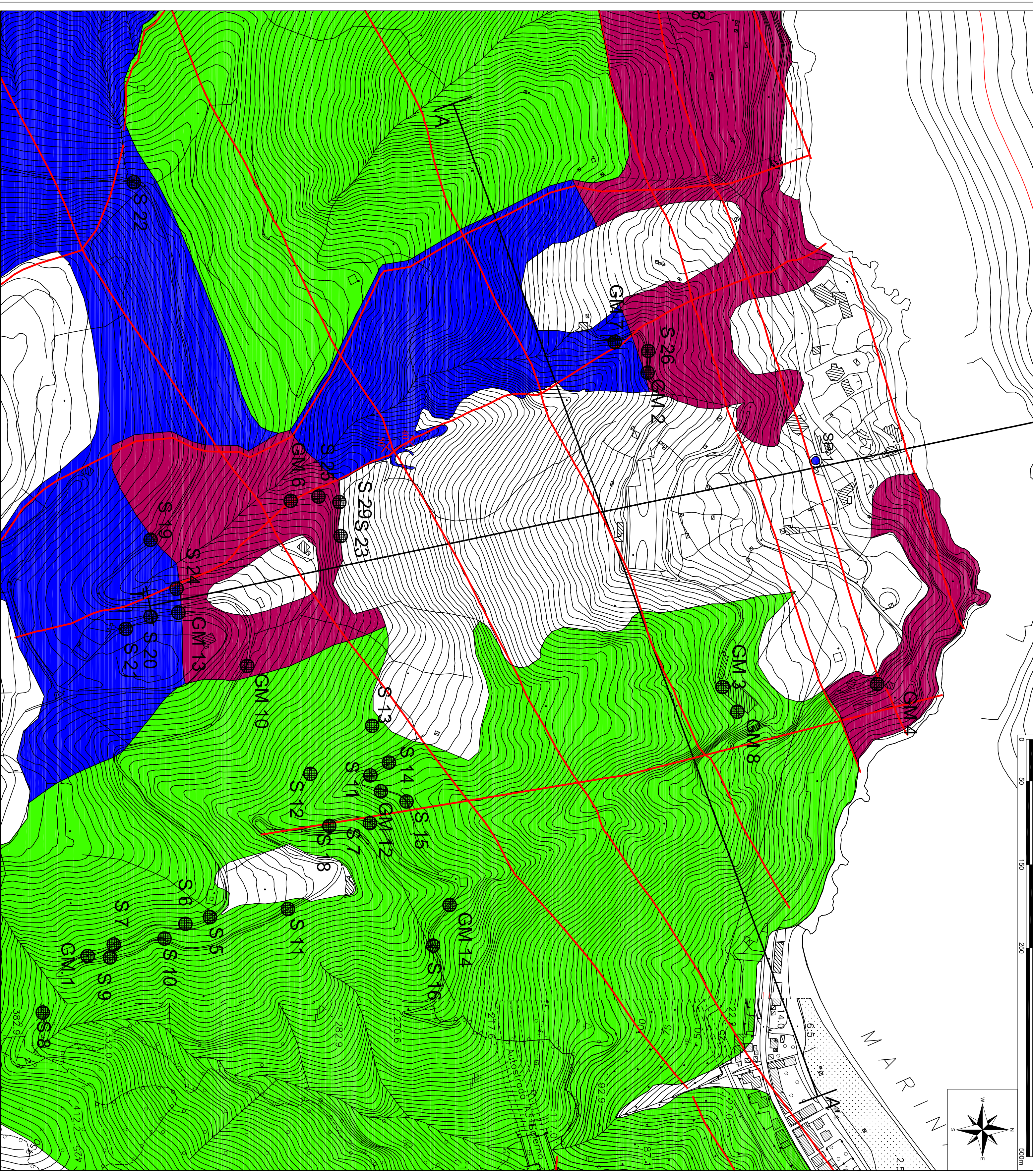
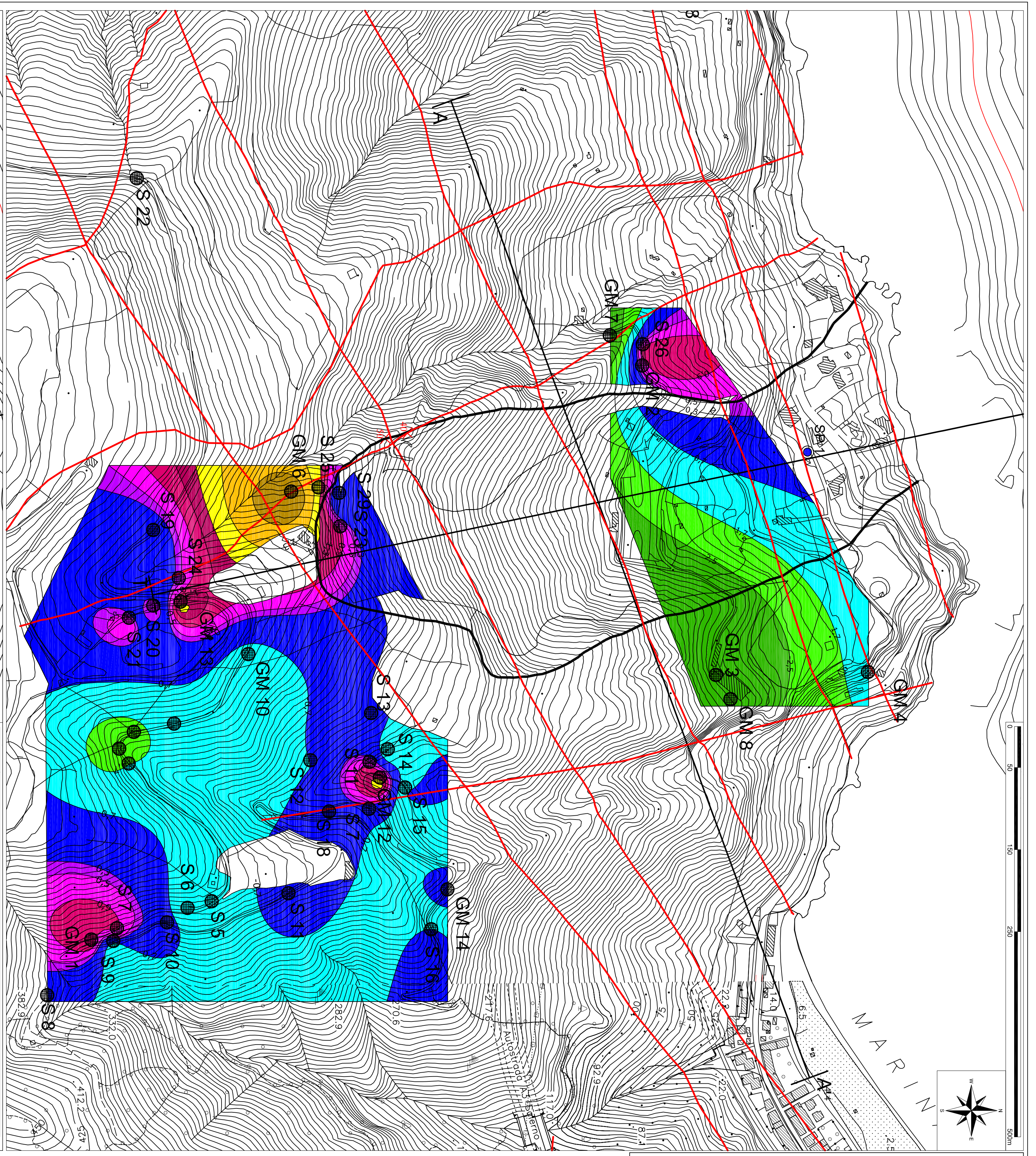
ALLEGATO 2 - TAVOLA 2.3
Carta geologica con elementi geomorfologici
dell'area di frana Santa Trada
Scala planimetria 1:1.000

Docente guida: Prof. Alberto Presinzini
Codocenti guida: Prof.ssa Francesca Bozzano
Dott. Salvatore Marino

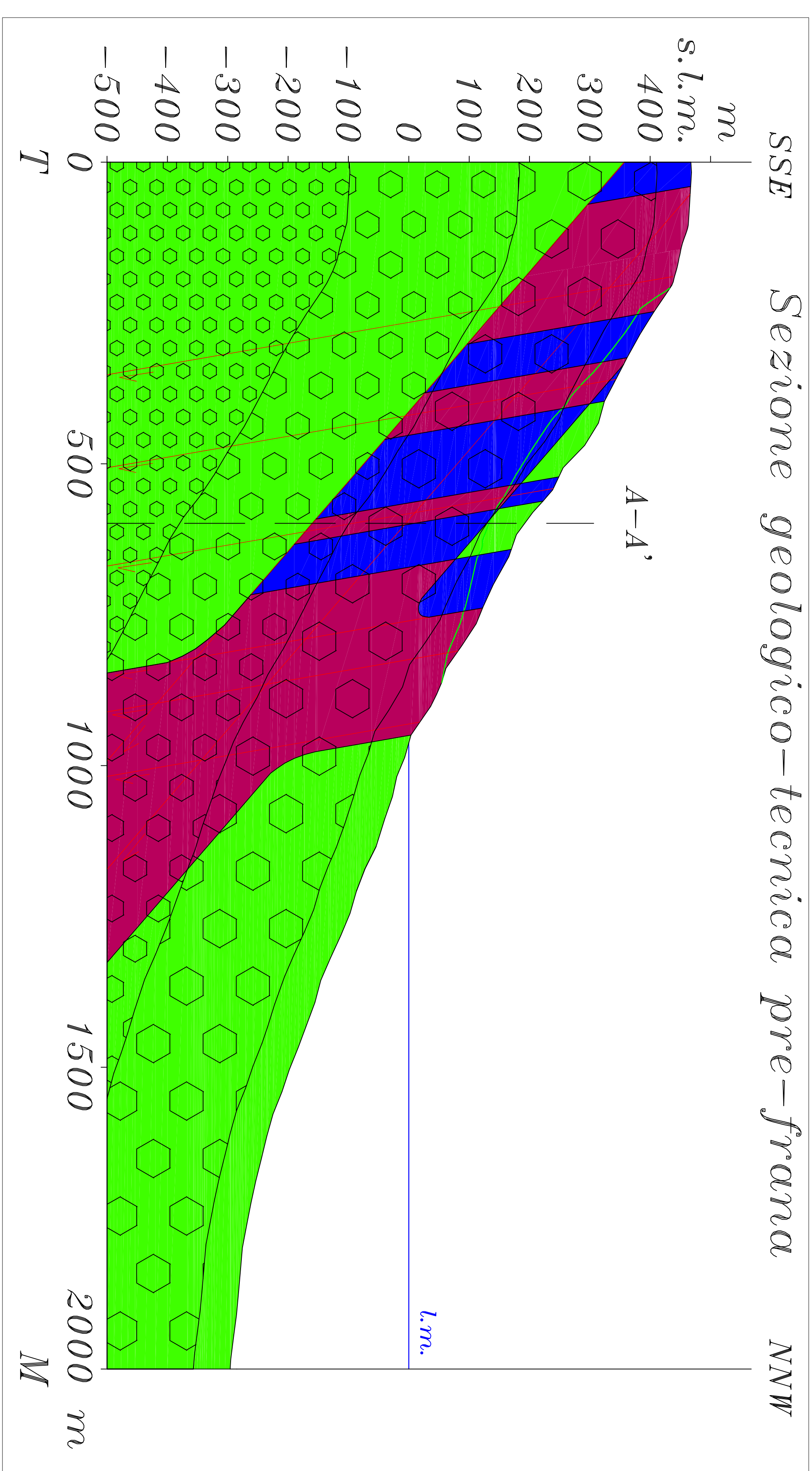
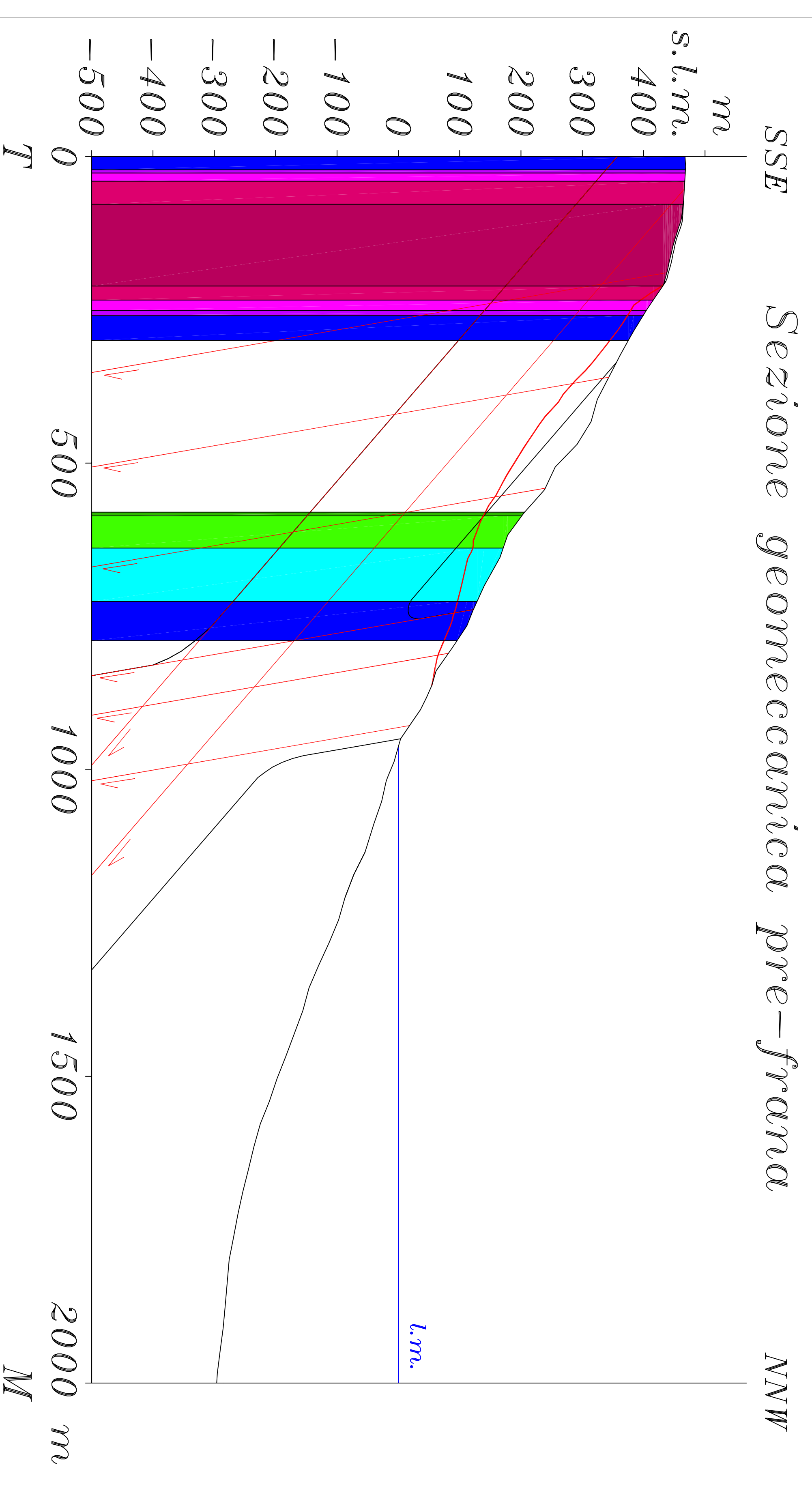
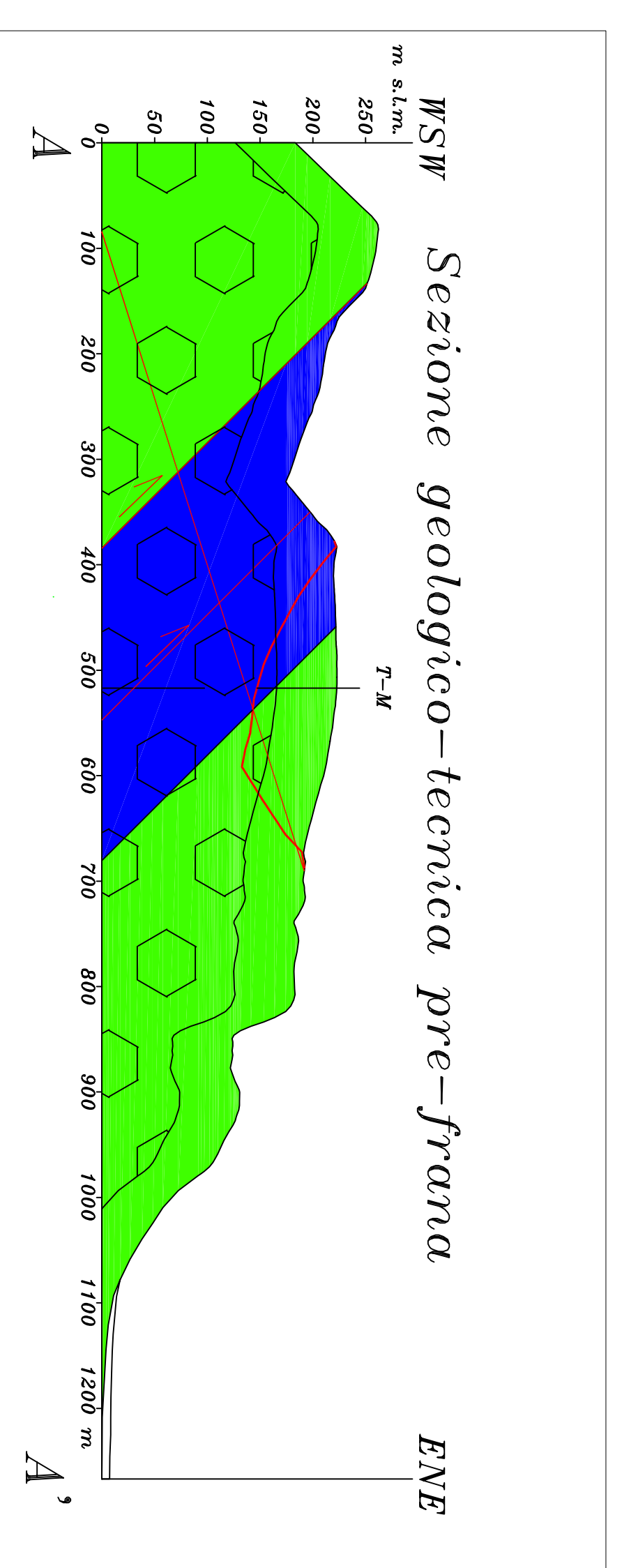
Dottorando: Dott. Alfredo Montagna
Matr. 692764

ANNO ACCADEMICO 2010 - 2011



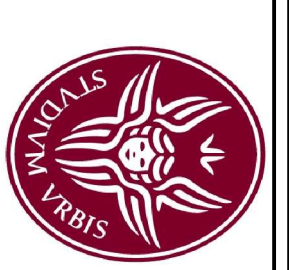


Dati strutturali		Altri simboli	
	Giactura (DIP).		Limite areale della frana sismoindotta del 1783.
	Faglia certa.		Limite di classe geomeccanica.
	Indicatore cinematico di movimento relativo lungo i piani di faglia individuati (in sezione). Non è stato possibile quantificare il rigetto.		Rilievo geomeccanico su gneiss.
	Sondaggio a carotaggio continuo.		Traccia di sezione.



LEGENDA GEOMECCANICA

	CLASSE DI AMMASSO Q - ISD = 3,75 Jv = 35,7; Ib = 6,3 cm; Jf = 119
	CLASSE DI AMMASSO P - ISD = 2,83 Jv = 31,0; Ib = 7,3 cm; Jf = 102
	CLASSE DI AMMASSO O - ISD = 1,90 Jv = 27,5; Ib = 9,0 cm; Jf = 90
	CLASSE DI AMMASSO N - ISD = 1,60 Jv = 21,0; Ib = 6,9 cm; Jf = 68
	CLASSE DI AMMASSO M - ISD = 1,12 Jv = 22,8; Ib = 9,6 cm; Jf = 59
	CLASSE DI AMMASSO L - ISD = 0,64 Jv = 16,2; Ib = 8,1 cm; Jf = 42
	CLASSE DI AMMASSO I - ISD = 0,34 Jv = 22,9; Ib = 12,5 cm; Jf = 59
	CLASSE DI AMMASSO H - ISD = 0,00 Jv = 17,7; Ib = 11,1 cm; Jf = 45
	CLASSE DI AMMASSO G - ISD = -0,38 Jv = 12,2; Ib = 9,9 cm; Jf = 26
	CLASSE DI AMMASSO F - ISD = -1,06 Jv = 23,0; Ib = 17,5 cm; Jf = 49
	CLASSE DI AMMASSO E - ISD = -1,11 Jv = 13,0; Ib = 12,9 cm; Jf = 27
	CLASSE DI AMMASSO D - ISD = -1,22 Jv = 17,3; Ib = 15,4 cm; Jf = 31
	CLASSE DI AMMASSO C - ISD = -2,29 Jv = 8,5; Ib = 15,0 cm; Jf = 15
	CLASSE DI AMMASSO B - ISD = -2,77 Jv = 9,5; Ib = 23,4 cm; Jf = 23
	CLASSE DI AMMASSO A - ISD = -4,46 Jv = 9,5; Ib = 23,4 cm; Jf = 16
	Fascia di profondità 2 - Pressione di confinamento 5 MPa: tra 57 e 286 m dal p.c..
	Fascia di profondità 3 - Pressione di confinamento 10 MPa: tra 286 e 566 m dal p.c..
	Fascia di profondità 4 - Pressione di confinamento 20 MPa: oltre i 566 m dal p.c..



UNIVERSITA' DI ROMA SAPIENZA

FACOLTA' DI SCIENZE MATEMATICHE,
FISICHE E NATURALI

DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE DELLA TERRA
XXIII CICLO

Approcci equivalenti continui
nella costruzione di modelli geologico-tecnici
di versanti naturali in roccia

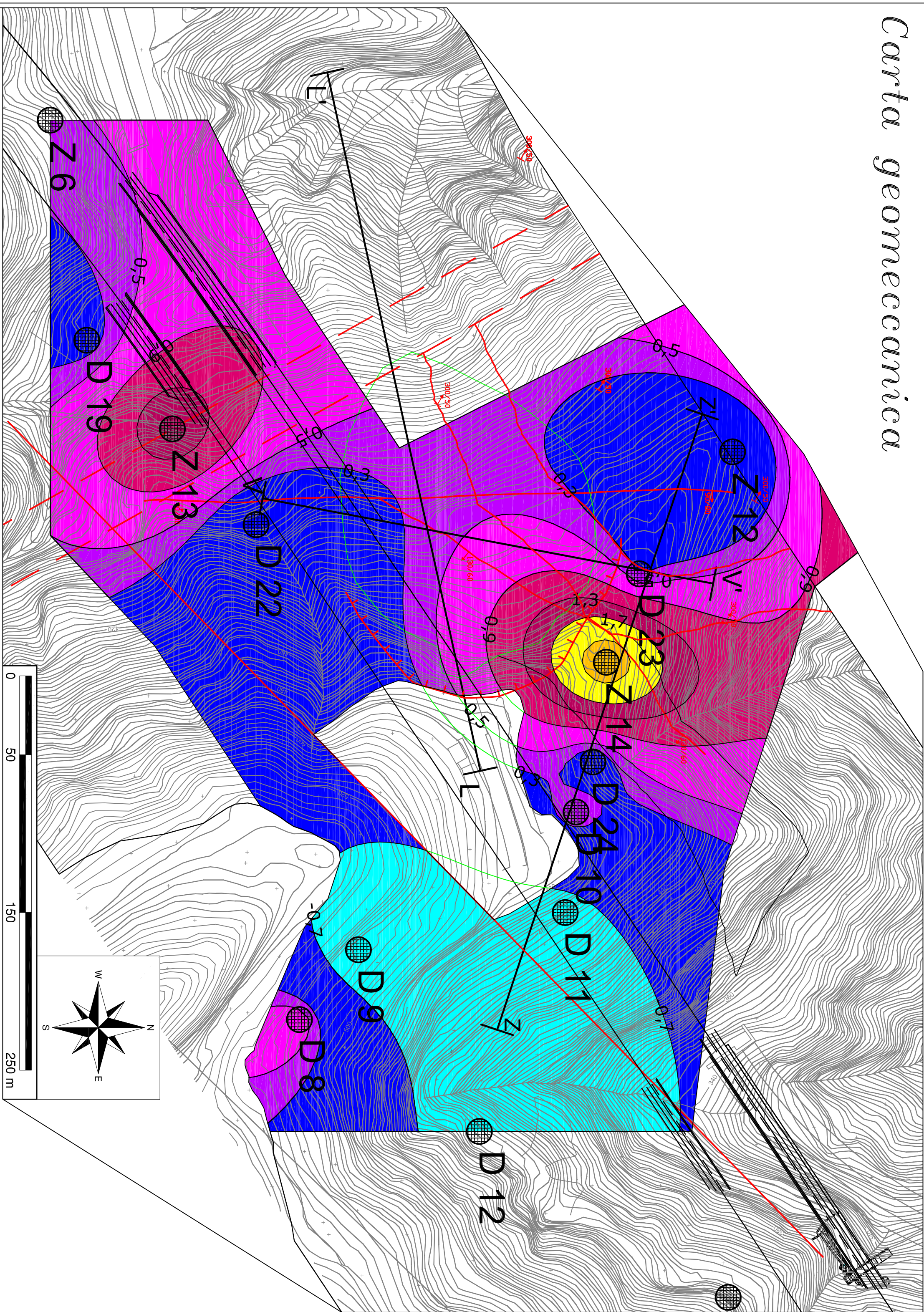
ALLEGATO 3 - TAVOLA 3.1

Carta geomeccanica e geologico-tecnica
dell'area di frana del Monte Paci

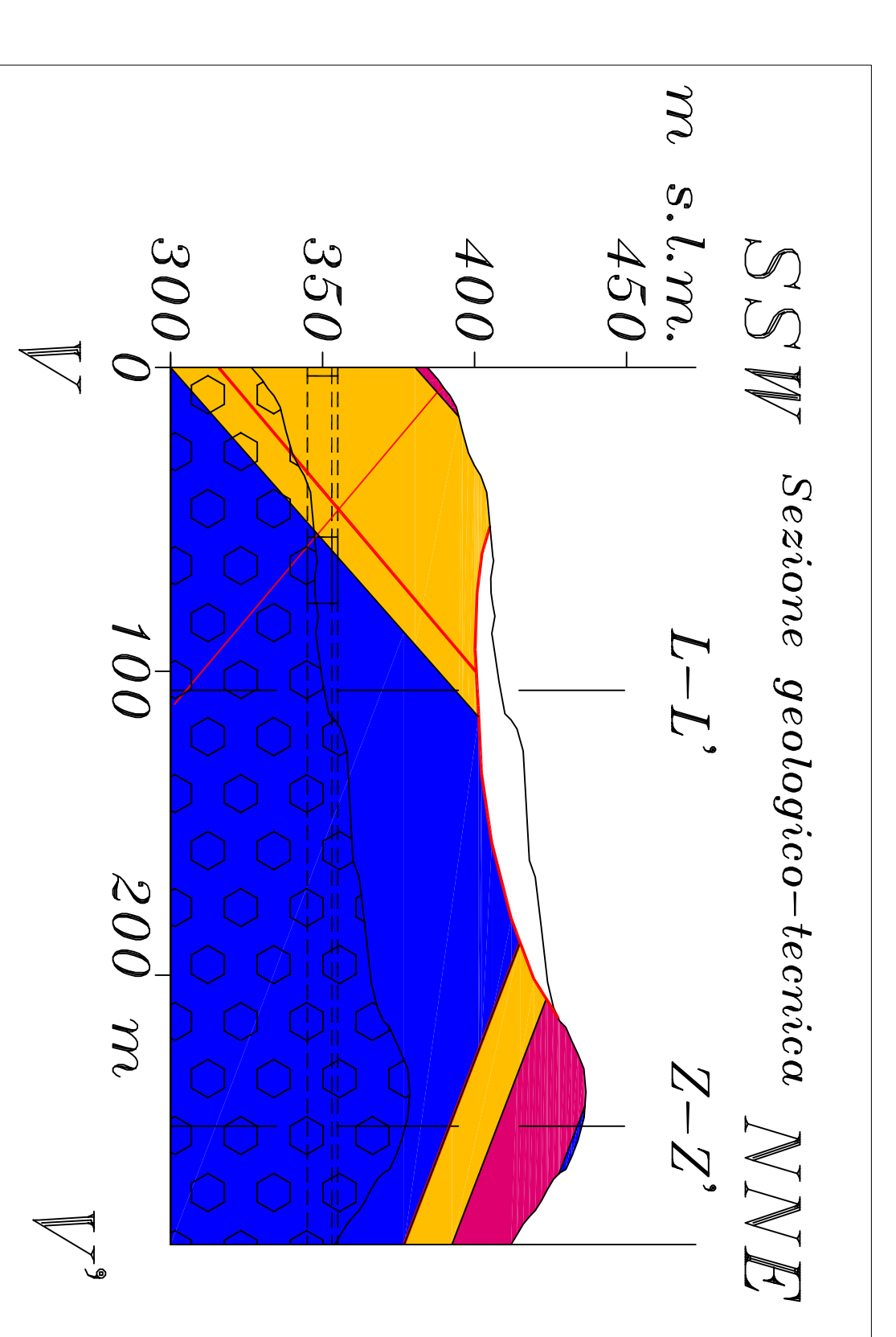
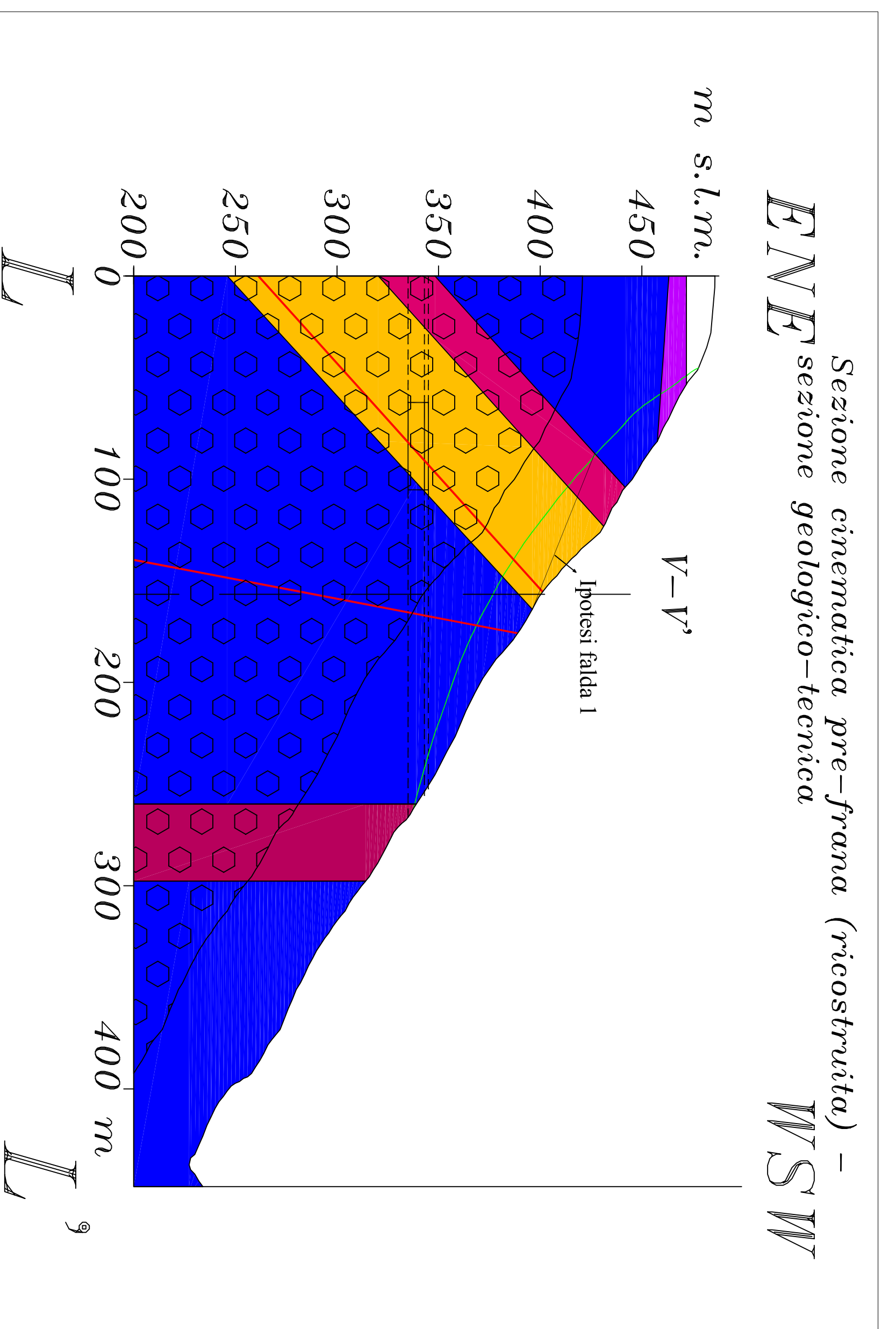
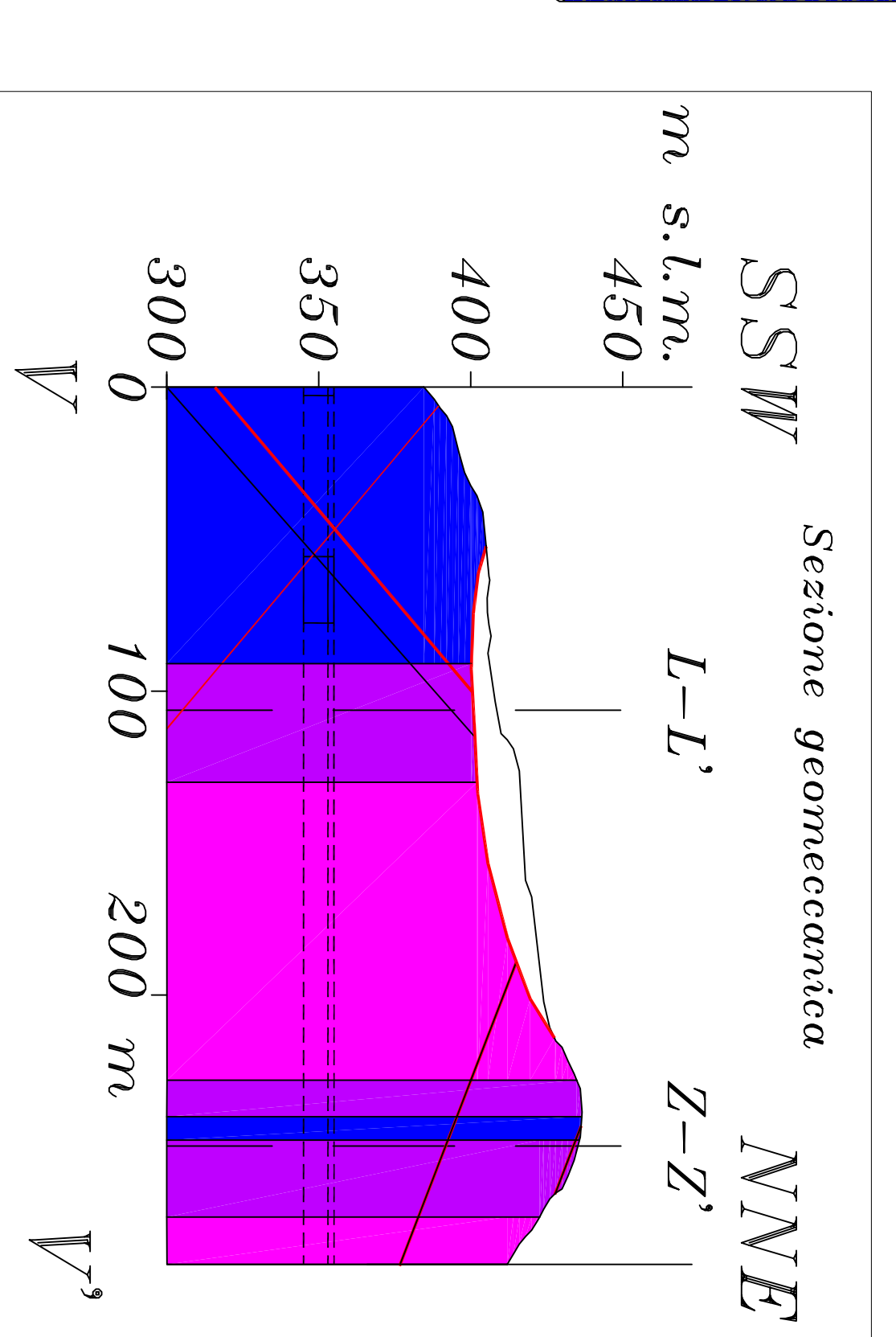
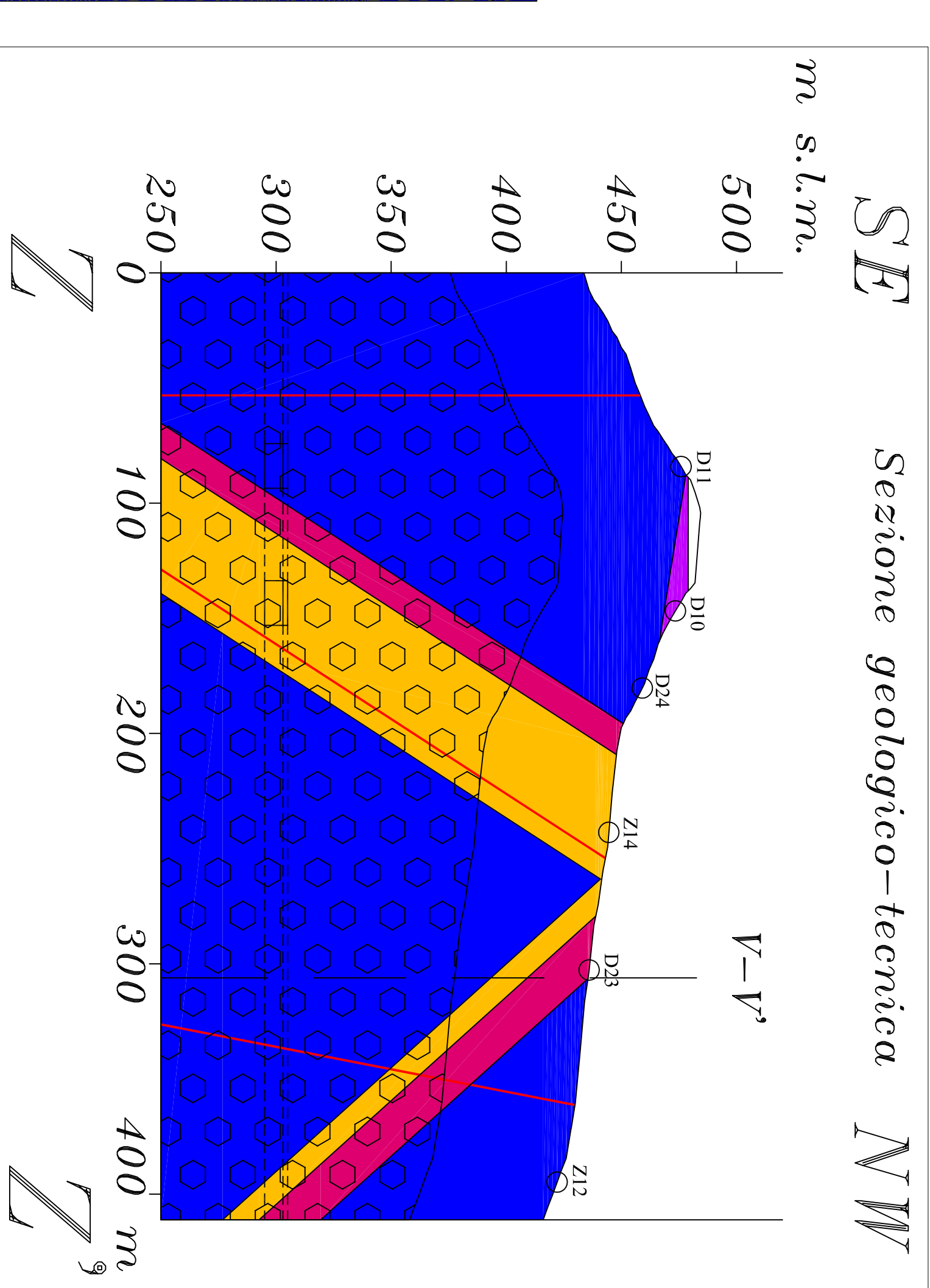
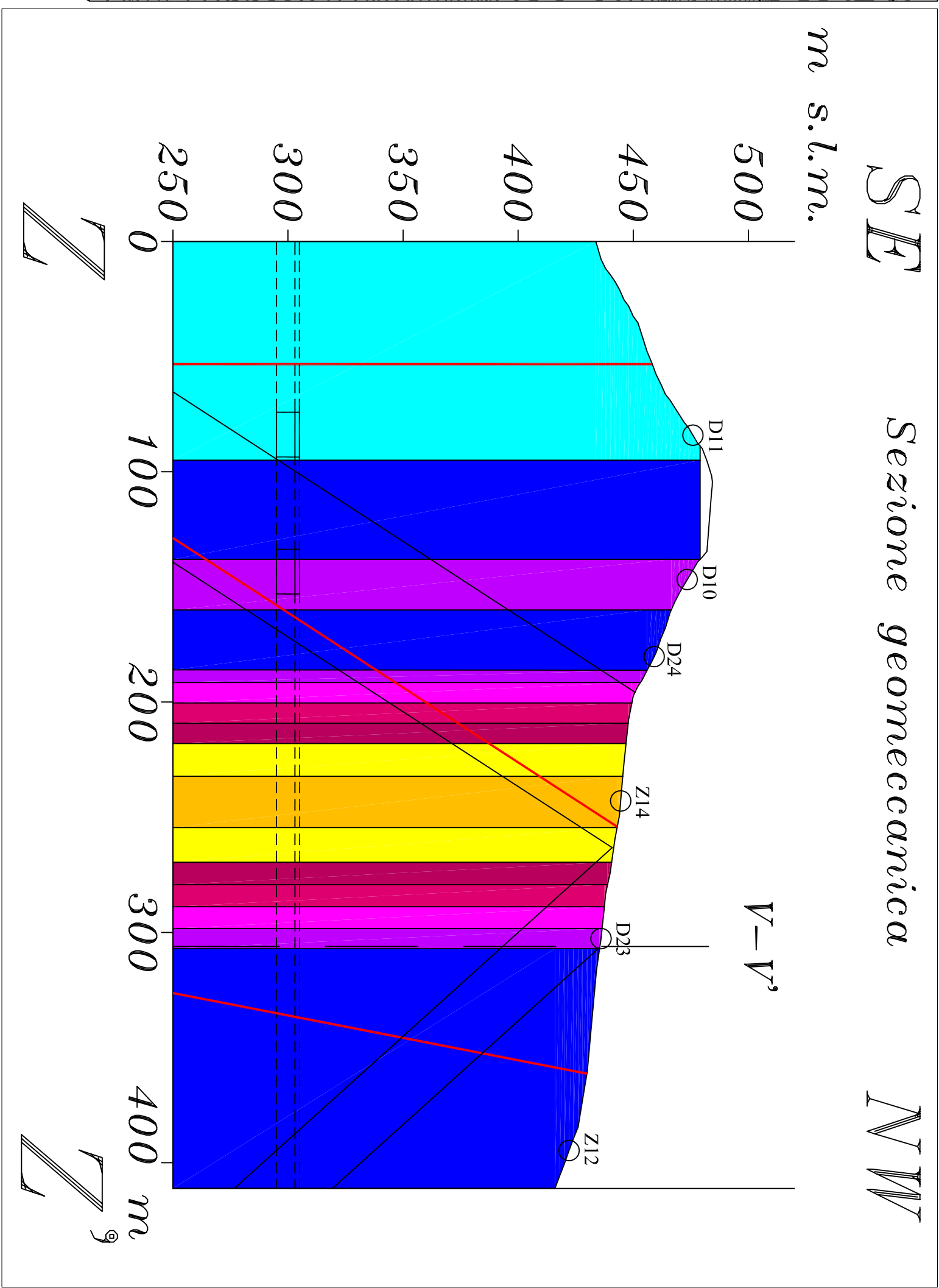
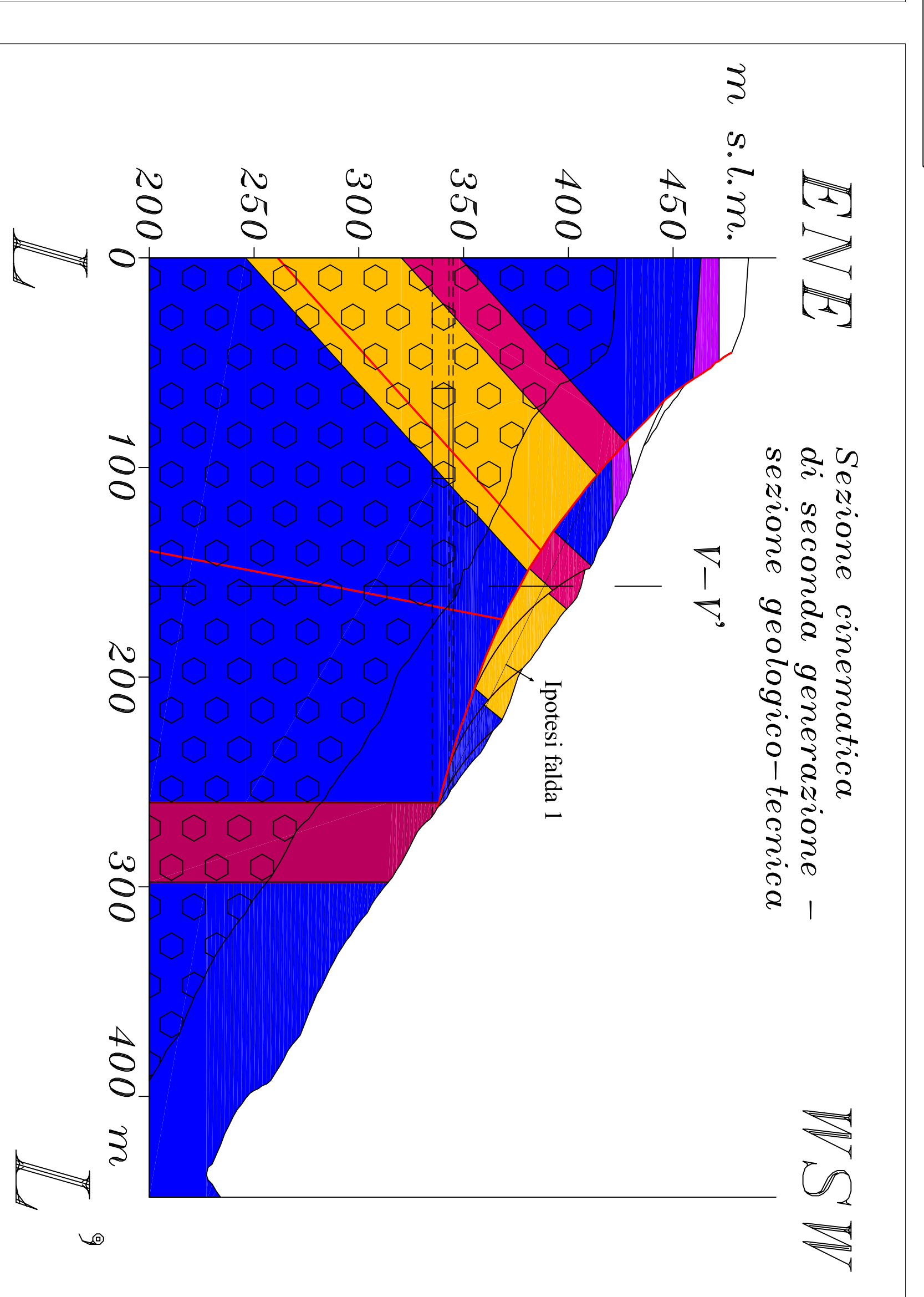
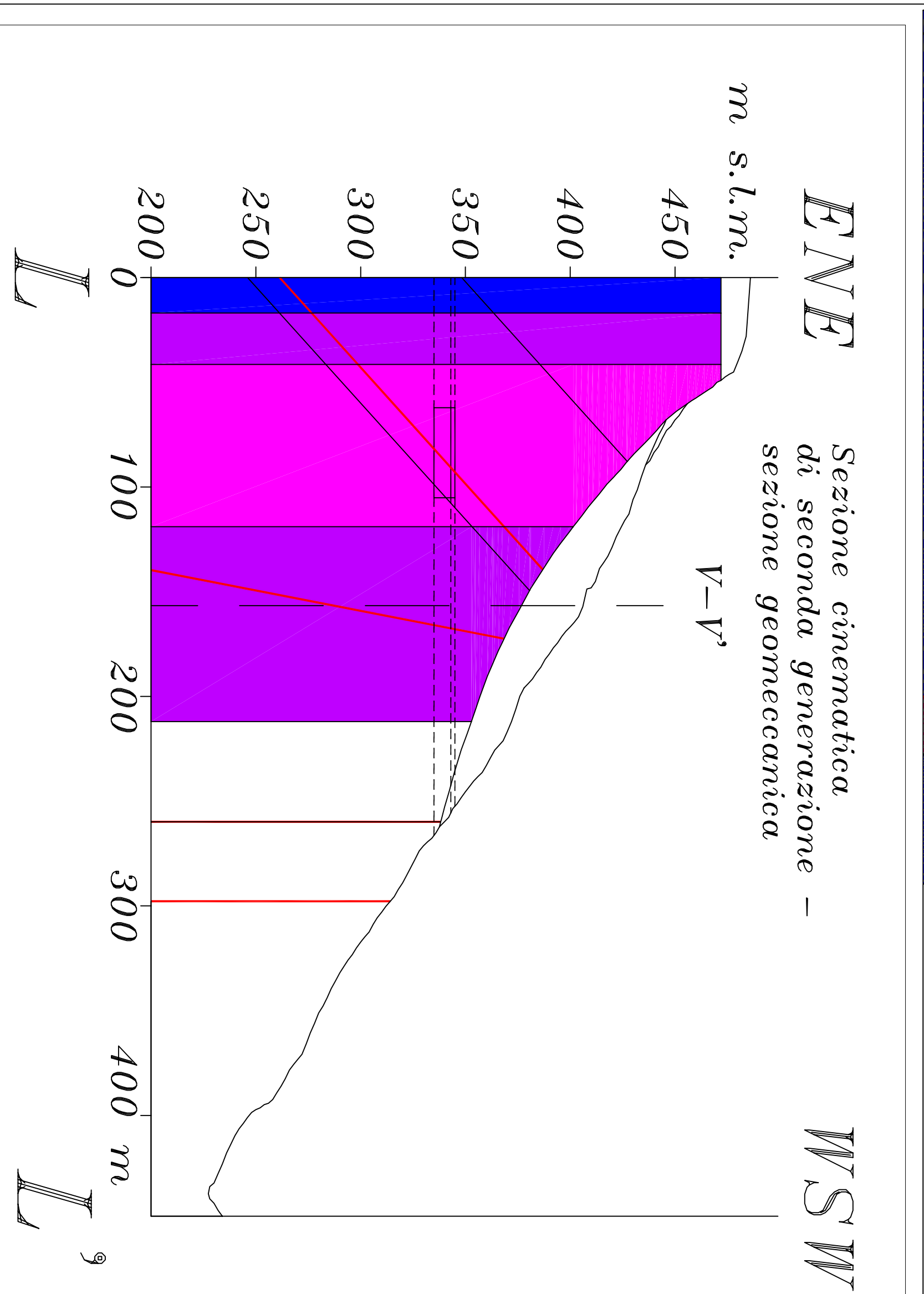
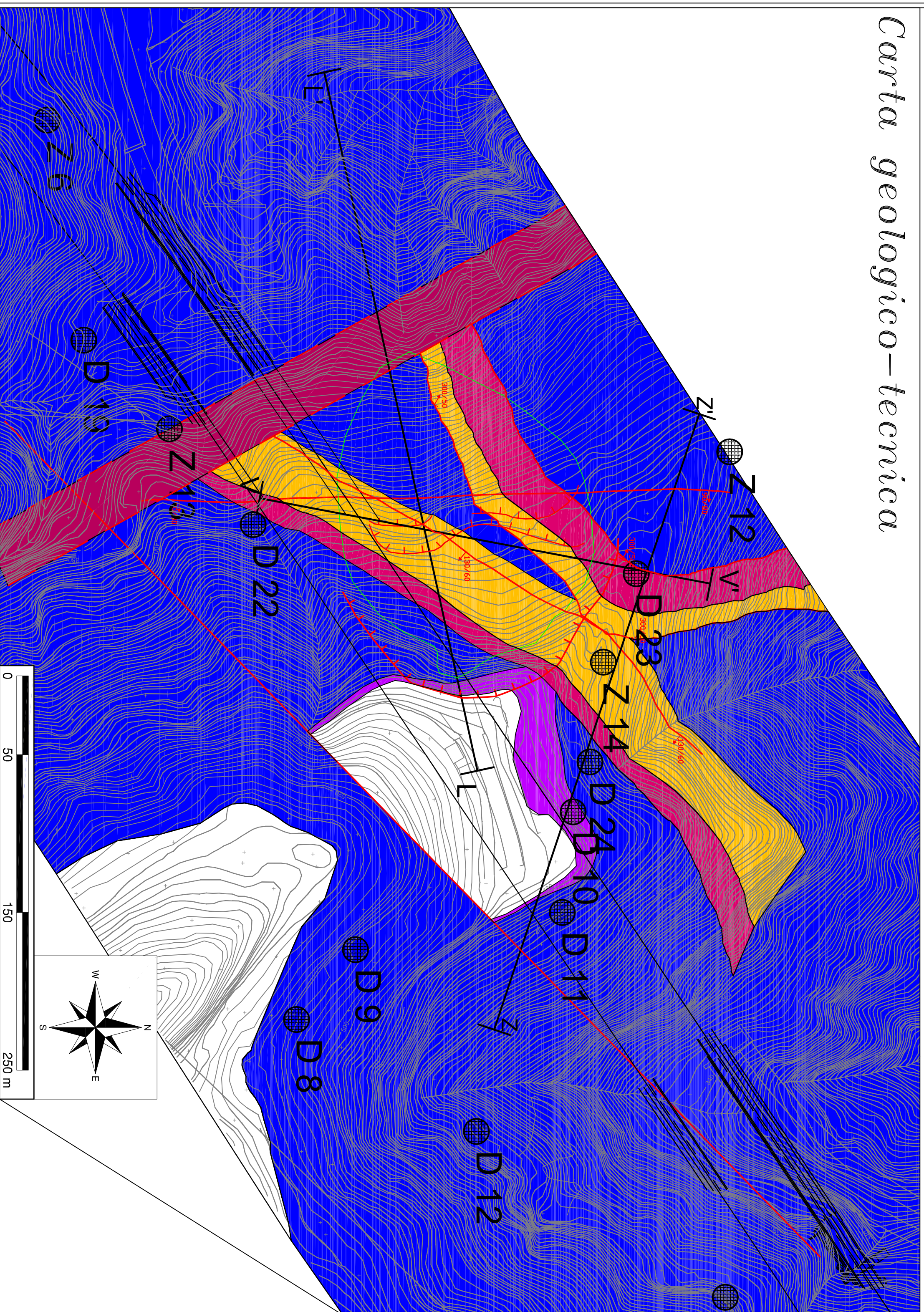
Scala planimetria 1:3.000

Docente guida:
Prof. Alberto Preslinizi
Codocenti guida:
Prof.ssa Francesca Bozaso
Dott. Salvatore Martino

Dottorando:
Dott. Alfredo Montagna
Matr. 692764



Carta geologico-technica



LEGENDA GEOMORFOLOGICA

Forme e processi gravitativi di versante

- Orlo di scarpata di frana per scorrimento roto-traslato (riferito anche alle scarpate secondarie riconosciute all'interno del movimento principale).
- Superfici di scorrimento in sezione.
- Superfici di scorrimento in sezione.
- Dati strutturali
- glacitura (Dip direction/dip).
- Faglia certa.
- Altri simboli
- Limite geomecanico e geologico-technico.
- Rilievo geomecanico su gneiss.
- Traccia di sezione.
- Superficie di scorrimento basale nella sezione pre-frana.
- Tracciato della costruenda galleria Fellicusiu in sezione (tratteggiata se proiettata).

LEGENDA GEOMECCANICA

Q	CLASSE DI AMMASSO Q - ISD = 3,75 Jv = 35,7; Ib = 6,3 cm; Jf = 119
P	CLASSE DI AMMASSO P - ISD = 2,83 Jv = 31,0; Ib = 7,3 cm; Jf = 102
O	CLASSE DI AMMASSO O - ISD = 1,90 Jv = 27,5; Ib = 9,0 cm; Jf = 90
N	CLASSE DI AMMASSO N - ISD = 1,60 Jv = 21,0; Ib = 6,9 cm; Jf = 68
M	CLASSE DI AMMASSO M - ISD = 1,12 Jv = 22,8; Ib = 9,6 cm; Jf = 59
L	CLASSE DI AMMASSO L - ISD = 0,64 Jv = 16,2; Ib = 8,1 cm; Jf = 42
I	CLASSE DI AMMASSO I - ISD = 0,34 Jv = 22,9; Ib = 12,5 cm; Jf = 59
H	CLASSE DI AMMASSO H - ISD = 0,00 Jv = 17,7; Ib = 11,1 cm; Jf = 45
G	CLASSE DI AMMASSO G - ISD = -0,38 Jv = 12,2; Ib = 9,9 cm; Jf = 26
F	CLASSE DI AMMASSO F - ISD = -1,06 Jv = 23,0; Ib = 17,5 cm; Jf = 49
E	CLASSE DI AMMASSO E - ISD = -1,11 Jv = 13,0; Ib = 12,9 cm; Jf = 27
D	CLASSE DI AMMASSO D - ISD = -1,22 Jv = 17,3; Ib = 15,4 cm; Jf = 31
C	CLASSE DI AMMASSO C - ISD = -2,29 Jv = 8,5; Ib = 15,0 cm; Jf = 15
B	CLASSE DI AMMASSO B - ISD = -2,77 Jv = 9,5; Ib = 23,4 cm; Jf = 23
A	CLASSE DI AMMASSO A - ISD = -4,46 Jv = 9,5; Ib = 23,4 cm; Jf = 16

Fascia di profondità Z - Pressione di confinamento 5 MPa: tra 57 e 286 m dal p.c..

UNIVERSITA' DI ROMA SAPIENZA

FACOLTA' DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E NATURALI

DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE DELLA TERRA XXIII CICLO

Approcci equivalenti continui nella costruzione di modelli geologico-technici di versanti naturali in roccia

ALLEGATO 3 - TAVOLA 3.2

Carta geomecanica e geologico-technica dell'area di frana Fellicusiu

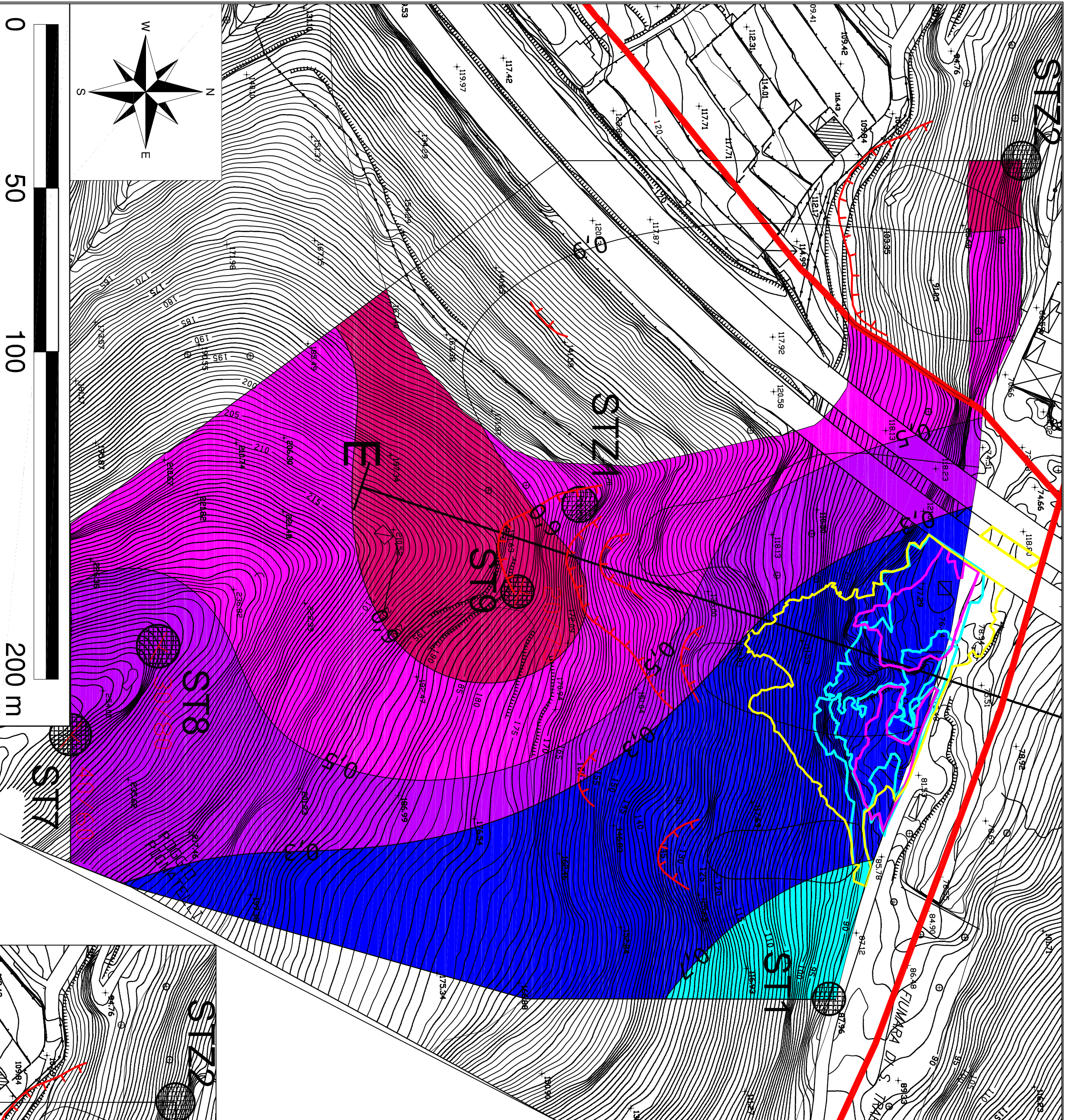
Scala planimetria 1:2.000

Decente guida: Prof. Alberto Preslinizi

Codocenti guida: Prof.ssa Francesca Bozaso, Dott. Alfredo Montagna, Dott. Salvatore Martino

Dottorando: Dott. Alfredo Montagna, Matr. 692784

ANNO ACCADEMICO 2010 - 2011



LEGENDA GEOMECCANICA

	CLASSE DI AMMASSO Q - ISD = 3,75 Jv = 35,7; Ib = 6,3 cm; Jf = 119		CLASSE DI AMMASSO G - ISD = -0,38 Jv = 12,2; Ib = 9,9 cm; Jf = 26
	CLASSE DI AMMASSO P - ISD = 2,93 Jv = 31,0; Ib = 7,3 cm; Jf = 102		CLASSE DI AMMASSO F - ISD = -1,06 Jv = 23,0; Ib = 17,5 cm; Jf = 49
	CLASSE DI AMMASSO O - ISD = 1,90 Jv = 27,5; Ib = 9,0 cm; Jf = 90		CLASSE DI AMMASSO E - ISD = -1,11 Jv = 13,0; Ib = 12,9 cm; Jf = 27
	CLASSE DI AMMASSO N - ISD = 1,60 Jv = 21,0; Ib = 6,9 cm; Jf = 68		CLASSE DI AMMASSO D - ISD = -1,22 Jv = 17,3; Ib = 15,4 cm; Jf = 31
	CLASSE DI AMMASSO M - ISD = 1,12 Jv = 22,8; Ib = 9,6 cm; Jf = 59		CLASSE DI AMMASSO C - ISD = -2,29 Jv = 8,5; Ib = 15,0 cm; Jf = 15
	CLASSE DI AMMASSO L - ISD = 0,64 Jv = 16,2; Ib = 8,1 cm; Jf = 42		CLASSE DI AMMASSO B - ISD = -2,77 Jv = 9,5; Ib = 23,4 cm; Jf = 23
	CLASSE DI AMMASSO I - ISD = 0,34 Jv = 22,9; Ib = 12,5 cm; Jf = 59		CLASSE DI AMMASSO A - ISD = -4,46 Jv = 9,5; Ib = 23,4 cm; Jf = 16
	CLASSE DI AMMASSO H - ISD = 0,00 Jv = 17,7; Ib = 11,1 cm; Jf = 45		Fascia di profondità 2 - Pressione di confinamento 5 MPa: tra 57 e 286 m dal p.c..

LEGENDA GEOMORFOLOGICA

Forme e processi gravitativi di versante

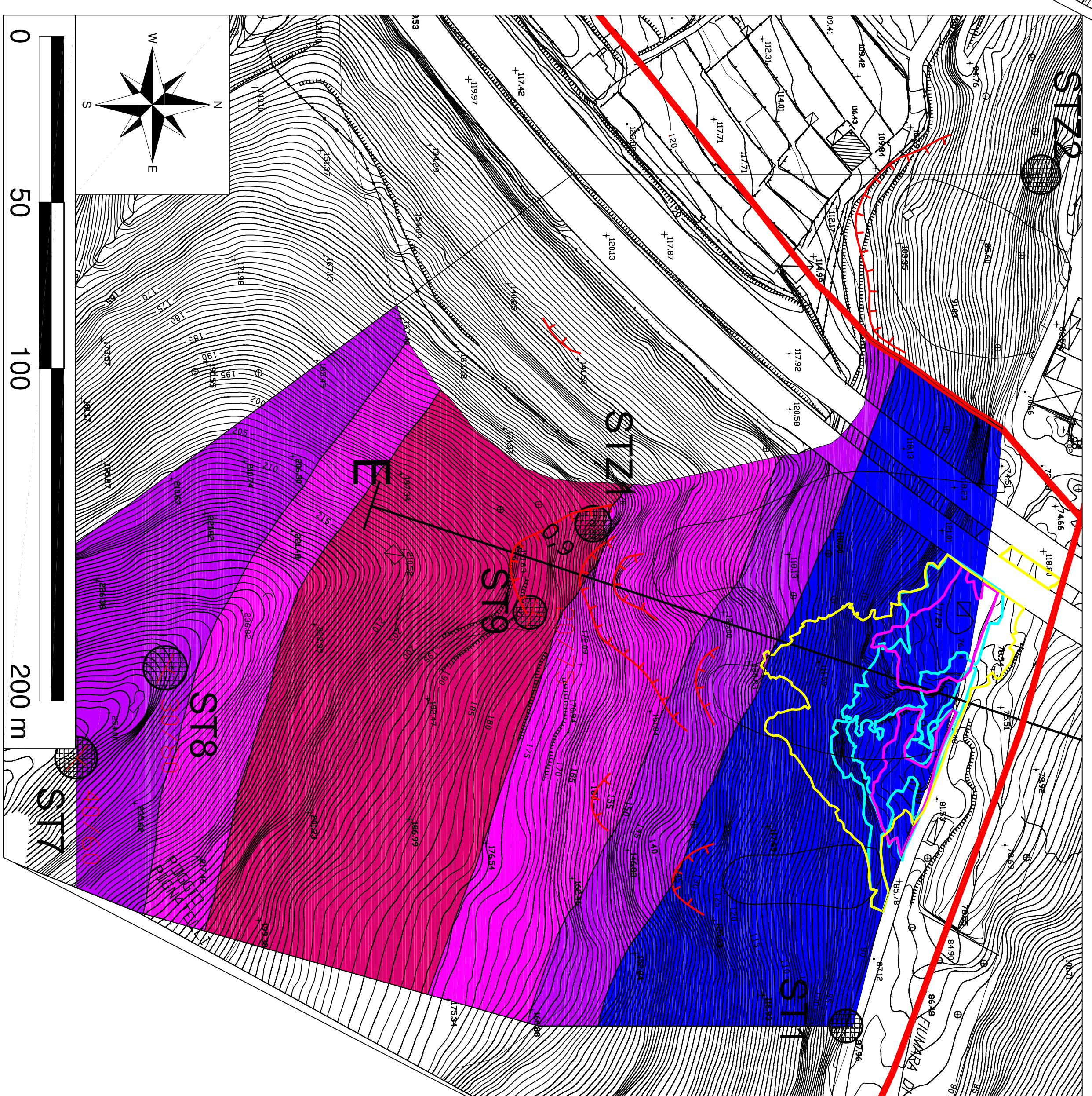
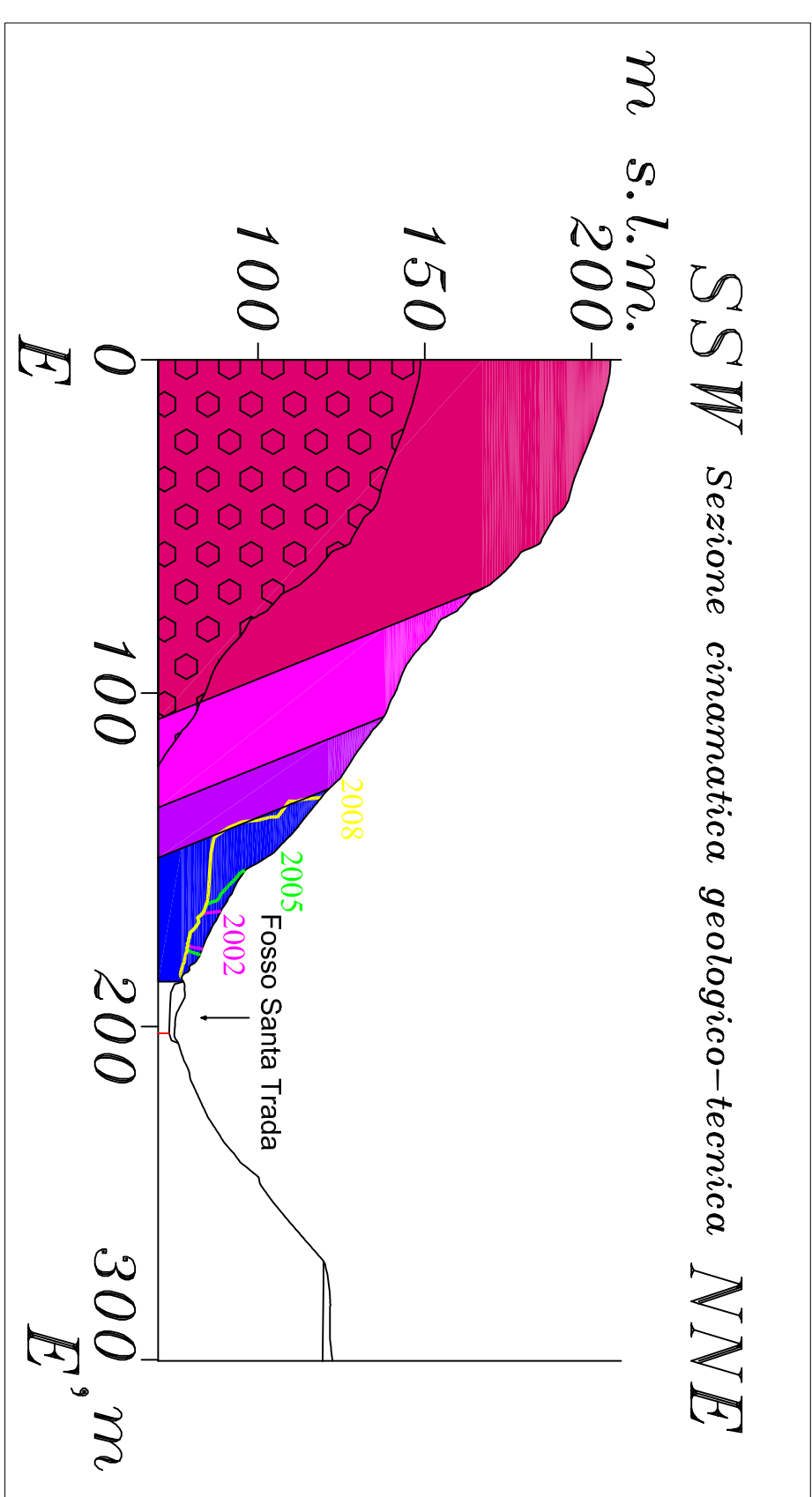
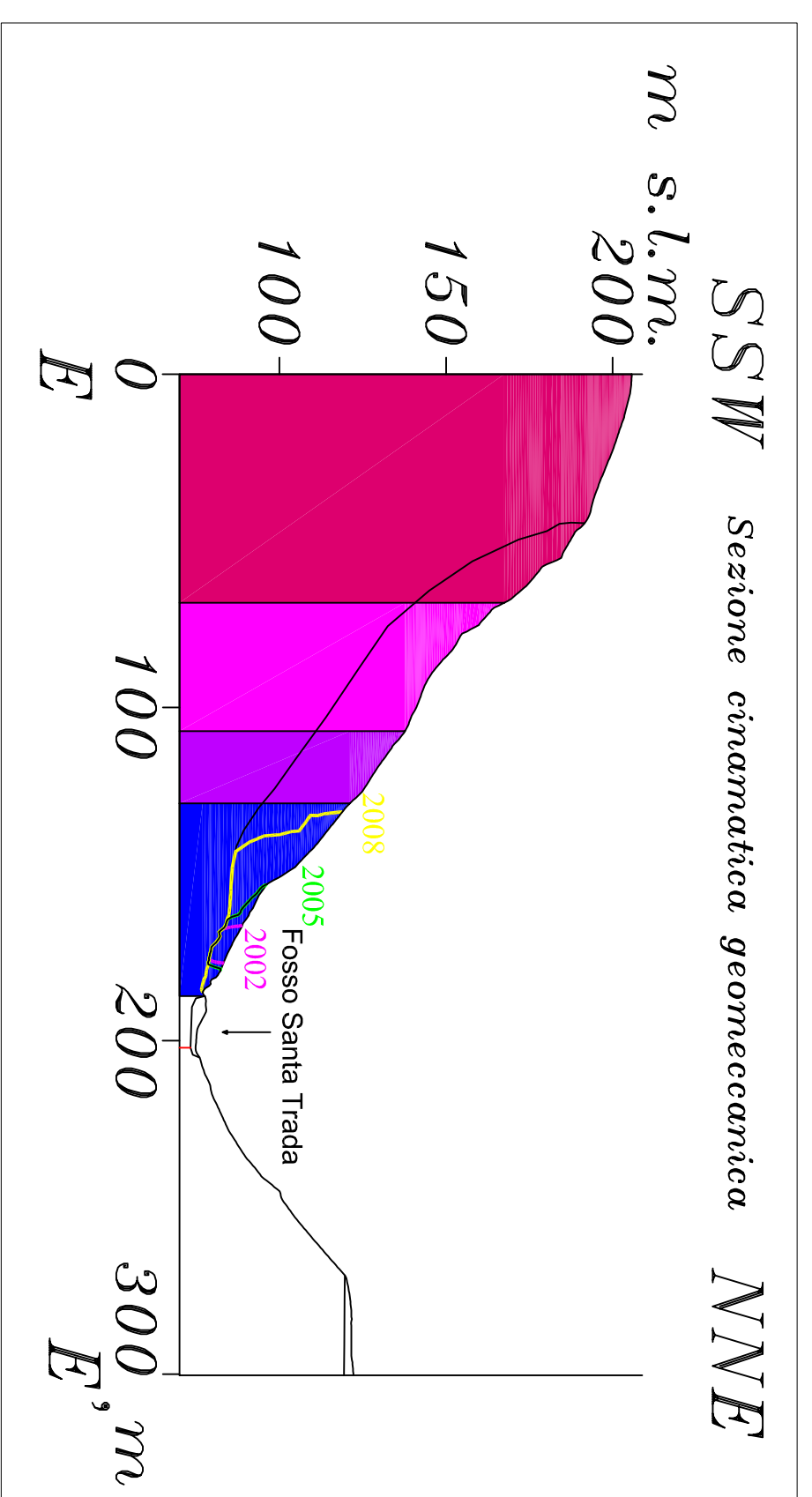
	Orlo di scarpata di frana a prevalente movimento traslativo.
	Superfici di scorrimento (in sezione).

Dati strutturali

	glacitura (Dip direction/dip).
	Faglia certa.

Altri simboli

	Limite di classe di ammasso.
	Rilievo geomeccanico su gneiss.
	Traccia di sezione.
	Limite area di cava luglio 2002.
	Limite area di cava luglio 2005.
	Limite area di cava luglio 2008.



UNIVERSITA' DI ROMA SAPIENZA



FACOLTA' DI SCIENZE MATEMATICHE,
FISICHE E NATURALI

DOTTORATO DI RICERCA IN SCIENZE DELLA TERRA
XXIII CICLO

Approcci equivalenti continui
nella costruzione di modelli geologico-tecnici
di versanti naturali in roccia

ALLEGATO 3 - TAVOLA 3.3

Carta geomeccanica e geologico-tercnica
dell'area di frana Santa Trada

Scala planimetria 1:1.000

Docente guida:

Prof. Alberto Prestilini

Codocenti guida:

Prof.ssa Francesca Bozzano

Dot. Salvatore Martino

Dottorando:

Dot. Alfredo Montagna

Matr. 692764