

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI "FEDERICO II"
XX ciclo
coordinatore: Prof. Lucio Lirer

DOTTORATO DI RICERCA IN
ANALISI DEI SISTEMI AMBIENTALI

***La valutazione della stabilità di versanti in roccia: aspetti
metodologici ed applicazioni su aree campione del territorio
campano***

Tutor
Prof. Roberto de Riso

Co-Tutor
Prof. Domenico Calcaterra

Dottoranda
Francesca de Luca Tupputi Schinosa

CAPITOLO 1. PREMESSA	3
CAPITOLO 2. ASPETTI METODOLOGICI DELLO STUDIO DELLE FRANE IN FRONTI ROCCIOSI.....	8
2.1 LE FRANE DA CROLLO	8
2.2 METODI UTILIZZATI PER LO SVILUPPO DELLO STUDIO	11
2.2.1 MODALITÀ DI ESECUZIONE DEI RILIEVI GEOSTRUTTURALI E GEOMECCANICI	11
2.2.2 TECNOLOGIE INNOVATIVE PER IL RILIEVO DI VERSANTI IN ROCCIA	23
2.2.2.1 IL RILIEVO FOTOGRAMMETRICO	23
2.2.2.2 IL RILIEVO CON LASER SCANNER TERRESTRE	28
2.2.3 CRITERI PER LA VALUTAZIONE DELLA STABILITÀ DEI VERSANTI IN ROCCIA - IL METODO RES.....	32
2.2.3.1 LA MATRICE DELLE INTERAZIONI COME RAPPRESENTAZIONE DEL MODELLO	34
2.2.3.1.1 Proprietà della matrice	36
2.2.3.2 IL PROCEDIMENTO ANALITICO – SINTETICO	40
2.2.3.2.1 La vagliatura gerarchica	43
2.2.3.3 L'INTERPRETAZIONE DEL MODELLO	44
2.2.3.3.1 La codifica della matrice	44
2.2.3.3.2 Il diagramma cause – effetti	46
2.2.3.3.3 L'istogramma dell'intensità interattiva	49
2.2.3.4 Lo SVILUPPO SEMIQUANTITATIVO COME ELABORAZIONE DEL MODELLO	50
2.2.4 INDIVIDUAZIONE DEI CINEMATISMI DELLE FRANE DA CROLLO (RSLOPE)	53
2.2.5 SISTEMI INFORMATIVI GEOGRAFICI	56
2.2.5.1 Cos'è UN G.I.S.	56
2.2.5.2 COME LAVORA UN G.I.S.	58
2.2.5.3 I G.I.S. A TRE DIMENSIONI	59
2.2.6 SOFTWARE PER LA PREVISIONE DEL MOTO DI CADUTA DEI BLOCCHI	62
2.2.6.1 ROTOMAP	62
2.2.6.1.1 Introduzione al modello di calcolo	62
2.2.6.1.2. Funzionamento del programma	64
2.2.6.2 COLORADO ROCKFALL SIMULATION PROGRAM (CRSP)	66
2.2.6.2.1 Introduzione al modello di calcolo	66
2.2.6.2.2 Funzionamento del programma	67
CAPITOLO 3. LE APPLICAZIONI NELLE AREE CAMPIONE	71
3.1 MONTE SARETTO, SARNO	71
3.1.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO – GEOMORFOLOGICO	71
3.2 COLLINA DEI CAMALDOLI, NAPOLI	78
3.2.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO – GEOMORFOLOGICO	78
3.2.2 FENOMENI FRANOSI DELLA COLLINA DEI CAMALDOLI	82
3.3 PROGETTO G.I.S. DELLE AREE DI STUDIO	84
3.3.1 IL MONTE SARETTO	84
3.3.2 LA COLLINA DEI CAMALDOLI	86
3.4 DATI/RISULTATI DEI RILIEVI GEOSTRUTTURALI E GEOMECCANICI	88
3.4.1 MONTE SARETTO	88
3.4.2 LA COLLINA DEI CAMALDOLI	118
3.5 APPLICAZIONE DEL METODO RES ALLE AREE DI STUDIO	125

3.5.1	PARAMETRI CHE INFLUENZANO IL SISTEMA	125
3.5.2	INTERATTIVITÀ DEL SISTEMA	131
3.5.3	SVILUPPO SEMIQUANTITATIVO	135
3.5.4	IMPLEMENTAZIONE DEL METODO RES IN AMBIENTE GIS.....	137
3.5.4.1	IL MONTE SARETTO.....	137
3.5.4.1.1	Indice di suscettibilità all'innescò di frane da crollo	146
3.5.4.2	LA COLLINA DEI CAMALDOLI	148
3.5.4.2.1	Indice di suscettibilità all'innescò di frane da crollo	154
3.6	Modelli matematici per la previsione del moto di caduta dei blocchi	155
3.6.1	APPLICAZIONE DEL SOFTWARE ROTOMAP ALLE AREE DI STUDIO.....	155
3.6.1.1	RISULTATI.....	158
3.6.2	APPLICAZIONE DEL SOFTWARE CRSP ALLE AREE DI STUDIO	164
3.7	MODELLO IN AMBIENTE GIS PER LA PREVISIONE DI FRANE DA CROLLO	165
3.7.1	FASI DI APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA.....	166
3.7.1.1	SCELTA DEI PARAMETRI RILEVANTI	166
3.7.1.2	LA MATRICE DELLE INTERAZIONI E LA SUA CODIFICAZIONE.....	171
3.7.1.3	PESO DEI PARAMETRI NELLA DETERMINAZIONE DELL'INDICE DI SUSCETTIBILITÀ ALL'INVASIONE DI FRANE DA CROLLO	176
3.7.2	INDICE DI SUSCETTIBILITÀ AL TRANSITO ED ALL'INVASIONE DI FRANE DA CROLLO ...	182
3.8	UTILIZZO DI TECNICHE LASER SCANNING TERRESTRI PER L'ANALISI GEOMECCANICA DI AMMASSI ROCCIOSI.....	183
3.8.1	METODOLOGIA	183
CAPITOLO 4. CONCLUSIONI		186
ALLEGATO 1 (SIMULAZIONI CON IL SOFTWARE CRSP).....		193
ALLEGATO 2 (CARTOGRAFIA).....		199

CAPITOLO 1. PREMESSA

Lo scopo del programma di ricerca, svolto in tre anni di attività, è l'implementazione di una metodologia che consenta di elaborare un modello previsionale delle frane da crollo che sia totalmente integrato in ambiente GIS.

La scelta dell'argomento è scaturita da una serie di considerazioni:

- la sua complicazione, come si evince dall'ampiezza degli approcci metodologici proposti dalla letteratura specializzata;
- la notevole estensione in Campania di fronti lapidei o litoidi, in aree costiere e continentali, spesso incumbenti su aree antropizzate;
- l'interesse crescente manifestato da Enti Territoriali e dalla Protezione Civile per la redazione di documenti affidabili in relazione alla valutazione della propensione a fenomeni di distacco/transito/invasione nei territori di competenza.

Tale metodologia, si avvale sia di dati provenienti da osservazioni di campagna, sia dell'applicazione di un metodo di classificazione dell'ammasso roccioso e, a partire da analisi probabilistiche e cinematiche, permette di stimare l'indice di instabilità potenziale dell'area di studio, nonché le possibili traiettorie dei blocchi e le aree caratterizzate da diversa suscettibilità all'invasione.

I crolli in roccia sono fenomeni franosi che comportano il distacco di blocchi e/o frammenti rocciosi di dimensioni variabili da alcuni decimetri a diverse centinaia di metri cubi da pendii, falesie o fronti di scavo ed il loro successivo movimento lungo il versante fino all'arresto.

Il distacco dei blocchi è fortemente influenzato dalle condizioni strutturali dell'ammasso (famiglie di discontinuità, persistenza, spaziatura), dalla geometria (giacitura e orientazione delle discontinuità rispetto al versante), dalle caratteristiche meccaniche (resistenza a taglio delle discontinuità, resistenza a trazione di eventuali ponti di roccia) e da eventuali sollecitazioni esterne (presenza di acqua in pressione nelle discontinuità, sismi, ecc.).

Una volta avvenuto il distacco, la traiettoria seguita da un blocco è la combinazione di quattro processi principali: scivolamento e/o ribaltamento, caduta libera, rimbalzo e rotolamento. Questi processi sono governati da leggi fisico-meccaniche ben conosciute e possono essere

descritti con semplici equazioni. Lo scivolamento è generalmente limitato alle fasi iniziali di un crollo, ha luogo su brevi distanze (da pochi centimetri ad alcuni metri) ed è caratterizzato da basse velocità e da una considerevole dissipazione di energia per attrito. Per massi di grosse dimensioni lo scivolamento può anche verificarsi al momento dell'impatto, con significativa perdita di energia.

La caduta libera rappresenta lo stato di moto predominante di un crollo in roccia. Guidato dalla gravità, il processo è descritto da traiettorie di tipo parabolico ed è caratterizzato da velocità elevate.

Durante la caduta libera, l'energia potenziale del masso viene trasformata in energia cinetica. Raramente il movimento principale di un masso avviene per puro rotolamento: di solito infatti questo tende a realizzarsi tramite una sequenza ravvicinata di rimbalzi che generano traiettorie paraboliche di altezza modesta (Broili, 1973; Azzoni et al., 1991, 1995). Il rotolamento si osserva solo in blocchi di forma sferica, ovale o cilindrica, quando la velocità del masso è modesta ed il versante presenta superfici pseudo-piane, a bassa inclinazione e scarsa rugosità delle superfici.

L'impatto al suolo è il fattore più complesso, difficile da modellare e meno conosciuto di un crollo. Al momento dell'impatto, considerato istantaneo per motivi di semplicità, si ha una perdita di energia e la direzione di movimento del masso può cambiare.

I crolli in roccia rappresentano un esempio di un sistema meccanico relativamente semplice, che rispetta leggi note, ma il cui comportamento non può però essere previsto in termini di spazio e tempo sebbene le condizioni iniziali e le forze coinvolte siano conosciute. La traiettoria di un masso in caduta dipende infatti da una serie di fattori la cui incertezza risulta predominante, quali la localizzazione dell'area di distacco, le condizioni strutturali dell'ammasso in tale area, la geometria del masso, le proprietà meccaniche della roccia e del versante e la topografia (Ritchie, 1963), fattori, questi, difficili da verificare sul terreno e che non possono essere determinati con esattezza. La geometria della superficie topografica e le proprietà dei materiali variano notevolmente lungo un versante e non possono essere determinate con precisione. Inoltre, l'ammontare dell'energia dissipata ad ogni impatto o durante il rotolamento dipende a sua volta da una varietà di fattori che comprendono la geometria del blocco, il tipo di materiale, la geometria della superficie topografica, la velocità

del blocco e l'angolo di impatto (Azzoni & de Freitas, 1995; Jones et al., 2000), anch'essi parametri difficili da determinare con precisione.

Per tali ragioni, lo studio del fenomeno non può che avvenire in termini probabilistici, a partire da distribuzioni di frequenza dei parametri d'ingresso che tengano conto anche in modo semplificato della loro variabilità. Di conseguenza, la determinazione della pericolosità per fenomeni di crollo da pareti rocciose in aree vaste, deve necessariamente avvenire tramite l'utilizzo di metodi semplificati.

La tematica affrontata prende spunto dalla gravità dei fenomeni franosi che periodicamente colpiscono vari distretti della Campania. Le tipologie di dissesto più frequenti sono riconducibili a fenomeni del tipo scorrimento - colata nelle coperture detritico - piroclastiche e nelle formazioni terrigene meso - cenozoiche ed a crolli negli ammassi carbonatici e nei tufi vulcanici quaternari (Calcaterra & Guarino, 1999; Calcaterra et al., 2002).

Tra i distretti vulcanici campani si segnala per l'elevata propensione al dissesto l'area collinare napoletana. Qui gli effetti delle frane da crollo/ribaltamento in roccia sono esaltati dalla crescente aggressione territoriale che ha interessato le colline di Posillipo, dei Camaldoli e di Capodimonte. In tali zone infatti l'urbanizzazione ha progressivamente impegnato aree ad iniziale vocazione agricola, connotate da elevata acclività, su cui sono state portate modificazioni all'originale assetto morfologico. I terreni interessati dai fenomeni di instabilità sono soprattutto il Tufo Giallo Napoletano e subordinatamente le formazioni vulcanoclastiche più antiche (es.: Tufi Biancastri Stratificati) (Budetta & de Riso, 1992; de Riso, 1992).

Negli ammassi carbonatici, i fenomeni di crollo più frequenti ed estesi sono ascrivibili a scivolamenti planari e rotture a cuneo; viceversa nelle formazioni tufacee i fenomeni più diffusi sono crolli e ribaltamenti.

Per lo svolgimento della ricerca le aree campione all'interno delle quali si è scelto di sviluppare lo studio sono:

- la Collina dei Camaldoli, appartenente all'ambito dell'area collinare napoletana;
- il Monte Saretto, ricadente nel territorio comunale di Sarno, in particolare incombente sul nucleo storico dell'abitato ed ha causato di recente seri problemi alla comunità locale.

La metodologia implementata si basa sull'utilizzo di parametri ricavati sia da rilievi geostrutturali ed analisi di campagna, articolati successivamente in un apposito *database*, sia dall'analisi di supporti topografici ed aerofotografici di strati informativi disponibili presso il Dipartimento di Ingegneria Geotecnica - Sezione di Geologia Applicata (D.I.G.).

Per quanto riguarda la fase di raccolta dati, alle tecniche classiche del rilievo geostrutturale è stato affiancato l'uso di tecnologie innovative per il rilievo di versanti in roccia, quali il rilievo fotogrammetrico ed il rilievo attraverso *Laser Scanning*.

Il notevole vantaggio di tali nuovi metodi diagnostici è dato sia dalla capacità di acquisire dati da grande distanza che dalla possibilità di rilevare superfici caratterizzate da geometrie complesse e notevolmente estese, mantenendo un elevato livello di risoluzione.

In particolare, con la prima tecnica è stato rilevato l'intero versante meridionale del Monte Saretto; viceversa la tecnologia *Laser Scanning* è stata applicata per il rilievo di un versante di cava ubicato ai piedi della Collina dei Camaldoli.

Le diverse fasi di studio sono state sviluppate nell'arco dei tre anni di corso del dottorato con la seguente successione temporale:

1. durante il primo anno di dottorato, l'attività svolta, è stata incentrata sull'analisi di fonti bibliografiche e d'archivio, al fine di individuare ed acquisire gli strumenti necessari allo svolgimento della ricerca. Inoltre sono state esaminate diverse aree potenzialmente interessanti e sono state scelte quelle in cui implementare la ricerca.
2. durante il secondo anno l'attività è stata rivolta principalmente all'acquisizione dei dati necessari per lo sviluppo dello studio. Tali dati sono stati reperiti sia da fonti bibliografiche e di archivio, che da rilievi e indagini di campagna.

Per quanto riguarda l'area di studio del Monte Saretto si è acquisiti il rilievo fotogrammetrico da elicottero, in scala 1:200, dell'intera area di lavoro, sulla base del quale sono stati individuati i fronti rocciosi idonei al posizionamento delle stazioni geomeccaniche di dettaglio. È stato quindi predisposto un dettagliato rilievo geostrutturale e geomeccanico, a partire dal quale si sono ottenuti tutti i parametri necessari per le successive elaborazioni da svolgere.

Nell'area di studio della Collina dei Camaldoli è stata riscontrata la difficoltà di raggiungere gli affioramenti del Tufo Giallo Napoletano; di conseguenza è stato

realizzato un numero di stazioni ridotto, tra il versante aggettante su Pianura e quello aggettante su Soccavo. Per compensare la difficile raggiungibilità degli affioramenti di TGN, è stato effettuato un rilievo, con tecnica Laser Scanner, di un fronte roccioso appartenente ad una ex cava, attualmente sede di una fabbrica di fuochi di artificio. A partire da tale rilievo si è proceduto allo studio della fratturazione del versante, sulla base del modello digitale della superficie ricostruita in 3D con un livello di dettaglio millimetrico. Altri aspetti su cui si è concentrata l'attività di ricerca sono stati:

- ❖ La scelta del metodo di classificazione degli ammassi rocciosi, ritenuto più adatto al caso in studio, tra tutti quelli noti in letteratura.
 - ❖ La scelta e l'applicazione di codici di calcolo per la caduta blocchi, con il fine di calibrare e validare i modelli in vista delle successive fasi di studio.
3. durante l'ultimo anno del corso di dottorato, l'attività di ricerca è stata concentrata sull'elaborazione dei dati acquisiti negli anni precedenti. In particolare sono stati elaborati tutti i dati acquisiti durante i rilievi geostrutturali e predisposte le relative schede per ciascun fronte individuato. Sono stati implementati i codici di calcolo (Rotomap e CRSP) su entrambe le aree di studio. Infine è stato raggiunto lo scopo del programma di ricerca, cioè l'implementazione di una metodologia che consenta di elaborare un modello previsionale delle frane da crollo che sia totalmente integrato in ambiente GIS. Tale metodologia permette di stimare l'indice di instabilità potenziale dell'area di studio, nonché le possibili traiettorie dei blocchi e le aree caratterizzate da diversa suscettibilità all'invasione, nel caso in cui si verificano dei crolli. Sono quindi state elaborate le carte della suscettibilità all'innescò, al transito ed all'invasione di frane da crollo per entrambe le aree di ricerca.

CAPITOLO 2. ASPETTI METODOLOGICI DELLO STUDIO DELLE FRANE IN FRONTI ROCCIOSI

2.1 LE FRANE DA CROLLO

Le frane di crollo in roccia rappresentano dei fenomeni di dissesto piuttosto gravosi da un punto di vista tecnico, sia per la loro diffusione in diversi ambiti geografici e geomorfologici (scarpate montane, rilievi collinari, falesie costiere, ecc.) che per la complessità della loro analisi che può riguardare aspetti molto diversi, dalla valutazione dell'equilibrio geostatico dei blocchi alla previsione delle traiettorie di propagazione dei massi.

Il processo infatti, pur essendo in apparenza riconducibile ad una schematizzazione piuttosto semplice dei meccanismi che lo governano, in realtà è complicato dal fatto che la definizione dei parametri che controllano i fenomeni di rottura ed evoluzione risente di un grado elevato di incertezza; spesso inoltre, l'ampia estensione delle aree coinvolte rende difficile raccogliere informazioni sufficienti per condurre analisi dettagliate. Per questo motivo la stabilità di un versante può essere valutata solo in modo probabilistico e le misure di protezione e di mitigazione del fenomeno devono essere legate alla determinazione della pericolosità, funzione dell'estensione delle aree coinvolte, dell'intensità del fenomeno e della probabilità di occorrenza.

Negli ultimi 30 anni le conoscenze sui processi di crollo, in particolare gli studi sulla propagazione dei massi, hanno beneficiato di numerosi approfondimenti derivanti da studi e approcci di diversa natura (Broili, 1973; Paronuzzi, 1987; Paronuzzi e Coccolo, 1995; Paronuzzi et al., 1996; Giani, 1992; ARPA Piemonte, 2004).

I metodi di calcolo oggi più utilizzati sono distinti in:

- metodi che considerano il blocco puntiforme;
- metodi che assegnano al blocco una particolare forma geometrica (ellissoide o poliedro).

Nel primo caso il blocco, considerato come un punto con massa m e velocità iniziale v_0 dovuta al meccanismo di innesco, percorre un primo tratto in aria con traiettoria balistica; in genere viene trascurata la resistenza dell'aria.

Il moto successivo è costituito da una serie di rimbalzi. Ad ogni urto col terreno, la velocità cambia di direzione e le componenti normale e tangenziali della velocità subiscono una variazione dovuta ad una perdita di energia per deformazioni elastoplastiche.

Spang & Rautenstrauch (1988) hanno definito un coefficiente di risposta come rapporto tra la velocità del masso dopo e prima dell'impatto.

I rapporti tra le velocità dopo e prima dell'impatto sono definiti anche coefficienti di restituzione. Analisi eseguite su percorsi di massi hanno evidenziato che si ottengono risultati migliori separando gli effetti delle componenti della velocità normale e tangenziale al pendio. Il coefficiente di restituzione relativo alla velocità tangenziale è superiore a quello della velocità normale.

I metodi che considerano la massa concentrata in un punto non consentono di trasferire i momenti traslazionali in rotazionali e viceversa in occasione degli impatti. Alcuni metodi hanno pertanto introdotto delle procedure per passare da movimenti di rimbalzo a movimenti di rotolamento assegnando un coefficiente di rotolamento equivalente.

I metodi che assegnano al blocco una particolare forma geometrica studiano l'impatto blocco-terreno imponendo la conservazione del momento della quantità di moto. Quando il baricentro non coincide con il punto di impatto, quest'ultimo diviene punto di rotazione del blocco e può avvenire un cambiamento nel meccanismo da movimenti per rimbalzi a movimenti rotatori. Le limitazioni dei metodi consistono nel fatto che il fenomeno dipende solo dalle condizioni geometriche e non dalle caratteristiche meccaniche dei materiali. Ipotesi correttive consistono nell'introdurre un coefficiente di restituzione definito come rapporto tra l'energia cinetica posteriore e precedente all'urto (Azzoni et al., 1991).

Pfeiffer & Bowen (1989b) (v. paragrafo 3.5) hanno analizzato il movimento di blocchi di varia forma (sferica, cilindrica, discoidale) imponendo la conservazione dell'energia e tenendo conto della dissipazione per attriti e fenomeni elastoplastici. Il problema viene risolto introducendo un coefficiente definito di rugosità del pendio, di difficile determinazione che controlla la variazione della velocità angolare a seguito dell'impatto (Giani, 1992).

Il problema del cambiamento di moto da un meccanismo a rimbalzi a rotolamento è importante in quanto la perdita di energia per rotolamento è diversa di quella per rimbalzo e nel caso di massi rotondeggianti si possono raggiungere distanze considerevoli anche su

pendii molto dolci. Uno schema generale è fornito da Ritchie secondo il quale sono da attendere percorsi a caduta libera per pendenze superiori a 4:1, rimbalzi per pendenze superiori a 2:1 ed infine rotolamenti per pendenze 1:1 (Ritchie, 1963).

Nel caso di una pendenza uniforme con costanti cadute di energia per ogni urto le traiettorie hanno forma di parabola sempre più piatta ed il fenomeno di rotazione avverrebbe quando l'angolo di incidenza è prossimo a quello del pendio (Hungry & Evans, 1988).

Tutti i metodi numerici o analitici hanno la necessità di inserire dei parametri che perlopiù vengono ottenuti da prove in situ; i risultati ottenuti hanno spesso una validità locale e mal si prestano a valutazioni di carattere più generale. I modelli prendono in genere in considerazione profili topografici ben definiti e senza particolari anomalie, quali terrazzi, assenza di ostacoli (es. alberi) e non prendono in considerazione la geometria del blocco in particolare (forma e sfericità).

Pertanto la risposta corrisponderà a quella attesa nel caso che le condizioni naturali siano poco dissimili a quella del modello mentre ci dovremo attendere scarsi risultati nel caso in cui l'ambiente reale sia mal rappresentato dal modello adottato.

In sostanza, nel caso di differenze dovute ad una serie di fattori morfologici ed ambientali, ci si potrà attendere risultati migliori con un metodo meno raffinato che consenta una parametrizzazione sulla base di osservazioni di reali percorsi di blocchi sul territorio (Mazzoccola & Sciesi, 2000; Focardi & Iotti, 2002; Francioso & Schiattarella, 2002; Chierusin & Fenti, 2002; Crosta & Locatelli, 1999; Baillifard et al., 2003).

2.2 METODI UTILIZZATI PER LO SVILUPPO DELLO STUDIO

2.2.1 MODALITÀ DI ESECUZIONE DEI RILIEVI GEOSTRUTTURALI E GEOMECCANICI

La campagna di rilievi geostrutturali e geomeccanici è stata utilizzata come metodo basilare per lo studio e l'identificazione dei sistemi di giunti che caratterizzano i versanti individuati. Tale fase ha fornito le informazioni necessarie alle successive valutazioni sulla suscettibilità al dissesto dell'area, in quanto, per caratterizzare un ammasso roccioso a comportamento fragile dal punto di vista meccanico, è necessario eseguire una serie di operazioni che costituiscono, appunto, il rilievo geomeccanico. Nella pratica si distinguono generalmente rilievi geomeccanici speditivi, di dettaglio e di grande dettaglio. Nel primo caso vanno misurati soltanto alcuni parametri fondamentali, nel secondo tutti quelli necessari per la caratterizzazione dell'ammasso roccioso e nel terzo caso ulteriori parametri richiesti esplicitamente dalla finalità del lavoro. Inoltre esistono due criteri fondamentali sui quali si può basare il censimento delle discontinuità [ISRM - International Society of Rock Mechanics, 1978]: il primo è un criterio di tipo *soggettivo*, secondo il quale vengono rilevate solo le discontinuità che sembrano svolgere un ruolo importante nei riguardi delle caratteristiche meccaniche dell'ammasso; il secondo è invece un criterio di tipo *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 finestra.

In questo studio è stata svolta una campagna di rilievi geomeccanici di dettaglio, catalogando, per le discontinuità degli ammassi rocciosi ricadenti all'interno di una finestra individuata sul versante, le loro caratteristiche medie di comportamento meccanico e di resistenza, la loro disposizione nello spazio e la loro frequenza e persistenza.

Le grandezze misurate, secondo le procedure stabilite dalla normativa internazionale (ISRM, 1978), sono sinteticamente riportate di seguito.

Per ciascuna scheda di rilievo sono stati introdotti alcuni elementi quali, la data di esecuzione del rilievo, il luogo di esecuzione e la lunghezza dello stendimento. A questi dati seguono quelli specifici del rilievo geostrutturale:

Giacitura del fronte: La giacitura del versante deve essere espressa mediante il valore dell'azimut della linea di massima pendenza (direzione di immersione, *dip direction*) e dell'inclinazione di questa rispetto all'orizzontale (inclinazione, *dip*). Questa convenzione è quella comunemente utilizzata in geomeccanica per la misura della giacitura dei piani. I valori di immersione e di inclinazione registrati per il versante e per i piani di discontinuità, sono stati valutati tramite l'utilizzo della "bussola di Clar".

Distanza dei giunti dall'inizio dello stendimento: si intende la distanza in metri del giunto rilevato dall'inizio dello stendimento; è utile nelle elaborazioni successive per risalire alla spaziatura delle discontinuità e, di conseguenza, alle dimensioni dei blocchi.

Giacitura delle superfici dei giunti: è descritta attraverso l'*inclinazione* rispetto all'orizzontale e la *direzione di immersione* della linea di massima pendenza, misurata in senso orario a partire dal Nord. Tramite questa coppia di grandezze l'orientazione di un piano nello spazio è definita univocamente. Una volta nota la posizione delle singole discontinuità presenti nell'ammasso in studio, è possibile individuare l'eventuale presenza di famiglie di giunti e quindi le possibili intersezioni tra i sistemi di discontinuità e il fronte in studio, in modo da definire la geometria dei blocchi potenzialmente instabili e i meccanismi di rottura innescabili.

Persistenza dei giunti: è l'estensione areale o grandezza del piano delle discontinuità stesse. È uno dei parametri più importanti per la valutazione delle caratteristiche meccaniche dell'ammasso ma è, al contempo, uno dei più difficili da valutare. Questo parametro esprime la reale possibilità del verificarsi di un dissesto ed è legato alla gerarchizzazione che si stabilisce in natura fra le diverse famiglie di giunti.

Non essendo sempre possibile fare alcuna misura dell'estensione nella terza dimensione della discontinuità in affioramento, ci si basa su studi empirici che hanno dimostrato un legame stretto tra lunghezza in affioramento e persistenza. Per la classificazione descrittiva delle lunghezze medie dei giunti si fa riferimento a quanto sviluppato dall'ISRM, che ha proposto una catalogazione secondo cinque ordini di grandezza variabili da meno di 1 m a più di 20 m, affiancati da un codice letterale che stabilisce le condizioni degli estremi della discontinuità: R = terminazione in roccia intatta, D = terminazione contro un'altra discontinuità, X = terminazione fuori affioramento e non visibile.

Apertura: la distanza tra le pareti della discontinuità. E' catalogata attraverso un codice letterale in tre intervalli standard: se $<0,5$ mm, la discontinuità è catalogata chiusa; per distanze comprese tra 0,5 e 10 mm, la discontinuità è classificata come *gapped*; per distanze >10 mm, la discontinuità è considerata aperta. Nello sviluppo del metodo di classificazione dell'ammasso è necessario conoscere il grado di apertura dei giunti, in quanto per discontinuità aperte risulta nulla la resistenza a taglio.

Riempimento: tipo di riempimento di discontinuità aperte; nel caso in studio tale riempimento è costantemente assente.

Condizioni di umidità: eventuale presenza d'acqua all'interno del giunto; le discontinuità esaminate sono risultate solitamente asciutte.

Irregolarità delle discontinuità (Forma e Scabrezza del giunto): la rugosità delle pareti delle discontinuità è una caratteristica importante per la valutazione delle resistenze disponibili lungo il piano stesso [Barton & Choubey, 1977]. In genere, essa è caratterizzata da ondulazione a grande scala e da rugosità vera e propria (o irregolarità della superficie) a scala minore. L'ondulazione a grande scala è difficilmente apprezzabile in affioramento (a meno di manifestazioni macroscopiche) e si fanno osservazioni qualitative (superfici planari, regolari, ondulate, seghettate) mentre la rugosità è valutabile secondo il metodo proposto da Barton & Choubey [1977] per mezzo di un profilometro (*Shape Tracer* o pettine di Barton). In pratica il profilometro è in grado di riprodurre il profilo delle pareti delle discontinuità lungo un tratto di 10 cm. Tale profilo può essere confrontato con quelli riportati in una tabella di dieci profili standard. A ciascuno dei dieci profili standard corrisponde un indice di rugosità (JRC - *Joint Roughness Coefficient*) variabile tra 0 (superficie perfettamente liscia) a 20 (superficie estremamente rugosa).

Compattezza: è la resistenza a compressione uniassiale delle pareti delle discontinuità, può essere stimata tramite prove sclerometriche che possono essere effettuate in campagna sugli affioramenti di roccia attraverso l'utilizzo dello sclerometro o "Martello di Schmidt". Il "Martello di Schmidt", strumento costituito da un cilindro con punta rientrante, misura l'altezza di rimbalzo di una massa nota sulle pareti di roccia delle discontinuità. L'altezza di rimbalzo è definita per mezzo di un indice che è proporzionale alla resistenza a compressione

della roccia. Misurando il rimbalzo della massa battente dopo un urto, si è in grado di stimare l'assorbimento anelastico della roccia e quindi la sua resistenza all'urto.

Nell'area di studio del Monte Saretto, per ogni fronte, sono stati analizzati tutti i parametri necessari per eseguire una caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso roccioso secondo la classificazione di Bieniawski (1973 e successive modifiche) [Cice et al., 2005].

Dall'elaborazione dei dati è stato ricavato un istogramma dei valori rappresentativi di tutte le aperture delle discontinuità relative alle famiglie principali rilevate in tutte le stazioni geomeccaniche eseguite. Per una stima delle discontinuità è possibile utilizzare la Tabella 2.1:

D I S C O N T I N U I T A						
C H I U S E		B E A N T I		A P E R T E		
pareti configurate	parz tigue	aper	aperte	molto aperte	ampie	molto ampie
0,1	0,25	0,50	2,5	10	100	1000
mm						

Tabella 2.1 Apertura delle discontinuità

La spaziatura tra due discontinuità è definita come la distanza tra una coppia di discontinuità misurata lungo una linea di una certa orientazione. Sono distinti tre tipi di spaziatura:

1. spaziatura totale (rappresenta la spaziatura tra due discontinuità immediatamente adiacenti lungo la linea di scansione);
2. spaziatura del set: è la spaziatura tra due discontinuità dello stesso set immediatamente adiacenti lungo la linea di scansione;
3. spaziatura normale del set (X_n): è la spaziatura tra due discontinuità dello stesso set immediatamente adiacenti misurata lungo la normale media del set.

E' possibile stimare la qualità dell'ammasso roccioso mediante il valore rappresentativo delle spaziature totali X_t . In particolare si desume il grado di fratturazione (R.Q.D.) mediante la Tabella 2.2 proposta da Deere (1963).

Qualità	R.Q.D %
Molto Scadente	0 - 25
Scadente	25 - 50
Discreta	50 - 75
Buona	75 - 90
Ottima	90 - 100

Tabella 2.2 Spaziatura delle discontinuità

Questo parametro fornisce un'indicazione diretta del grado di fratturazione dell'ammasso ed ha un peso notevole nelle classificazioni geomeccaniche e nella stima dei parametri di

permeabilità e deformabilità dell'ammasso. Il calcolo dell'RQD viene eseguito mediante la seguente formula:

$$RQD = 100 \cdot \sum_{i=1}^n X_{ti} / L$$

X_{ti} = Lunghezze delle discontinuità maggiori di 10 cm

La persistenza, come già riportato, è stata valutata in funzione dello schema ISRM (1978), Tabella 2.3, anche se per ogni discontinuità rilevata è stato indicato il valore della lunghezza affiorante sul versante esaminato.

PERSISTENZA				
Molto bassa	Bassa	Media	Alta	Molto alta
1	3	10	20	m

Tabella 2.3 Persistenza delle discontinuità

Per ottenere informazioni sulla dimensione dei blocchi le raccomandazioni ISRM consigliano di calcolare il valore dell'Indice della dimensione dei blocchi (I_b) ed il Numero volumetrico delle discontinuità (J_v - numero di giunti per m^3).

In particolare:

$$I_b = (S_i + S_{i+1} + \dots + S_{i+n}) / n$$

$$J_v = (1/S_i) + (1/S_{i+1}) + \dots + (1/S_{i+n})$$

Dal Valore di J_v è possibile determinare il valore dell'RQD che risulta pari a:

$$RQD = 115 - 3,3 * J_v$$

Essendo una discontinuità caratterizzata da irregolarità a grande scala (ondulazioni) ed a piccola scala (rugosità) sono state eseguite osservazioni qualitative (superfici planari, regolari, ondulate, seghettate), ed a piccola scala si è utilizzato uno *Shape Tracer* ("pettine" di Barton, Barton & Choubey, 1977).

I profili ottenuti sono stati confrontati con i profili di rugosità proposti da Barton, ad ognuno dei quali corrisponde un coefficiente chiamato JRC (*Joint Roughness Coefficient* - indice della scabrezza delle superfici dei giunti). Si tratta di 10 profili - tipo con coefficienti variabili da 0 a 20 ad intervalli di 2 (Fig. 2.1).

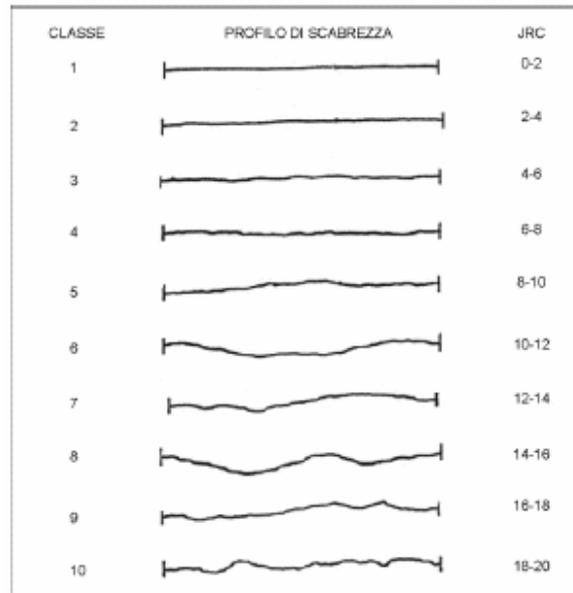


Figura 2.1 Profili di rugosità della superficie delle discontinuità e relativi valori di JRC

Oltre ad eseguire puntuali determinazioni del valore di JRC con il “pettine” di Barton, tutte le discontinuità rilevate sono state classificate qualitativamente mediante lo schema proposto dall’ISRM (1978). Ad ogni classe riportata nello schema è stato assegnato un valore di JRC. Tali dati sono stati successivamente elaborati con metodi statistici (elaborazioni del valore medio e della deviazione standard) al fine di determinare per ogni singola famiglia il valore significativo di JRC (Fig. 2.2).

CLASSI DI RUGOSITA' (da ISRM, 1978)

CLASSE	DESCRIZIONE
I	Rugosa - A gradini
II	Liscia - A gradini
III	Striata - A gradini
IV	Rugosa - Ondulata
V	Liscia - Ondulata
VI	Striata - Ondulata
VII	Rugosa - Planare
VII	Liscia - Planare
IX	Striata - Planare

Tabella 2.4 Classi di rugosità

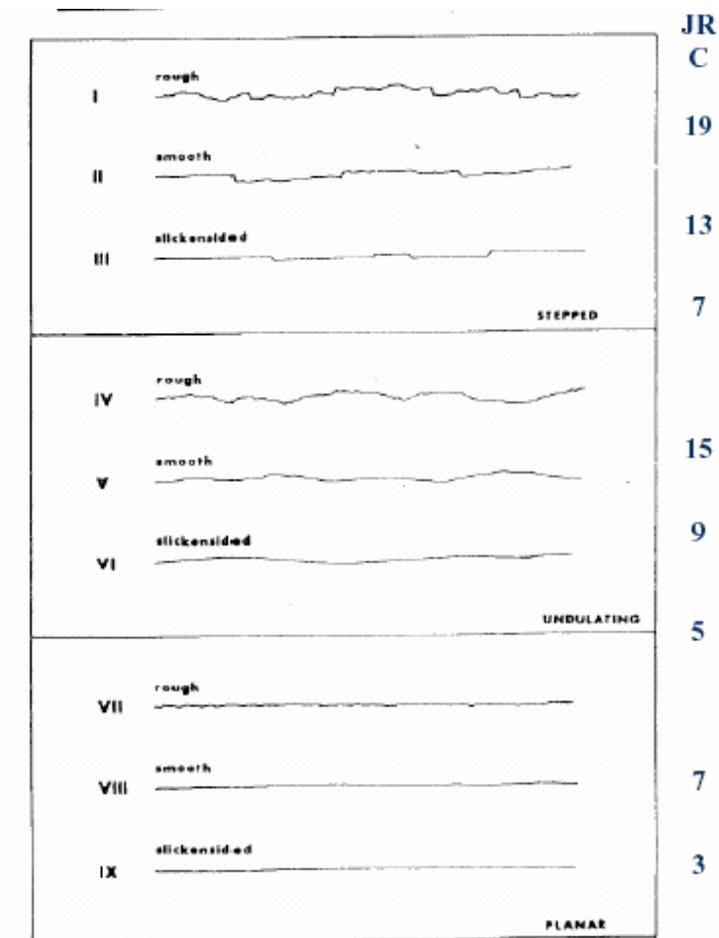


Figura 2.2 Classi di rugosità della superficie dei giunti

La valutazione della resistenza meccanica delle superfici dei giunti è stata eseguita con l'ausilio del martello di Schmidt. Le prove sono state eseguite su superfici di discontinuità integre con un JRC non superiore ad 8.

L'indice del martello di Schmidt può essere correlato con la resistenza alla compressione delle superfici di discontinuità J.C.S. attraverso la seguente relazione:

$$\text{Log}_{10} J.C.S.(MPa) = 0,00088 \cdot \gamma \cdot r + 1,01$$

dove: γ (kN/m³) = Peso di volume della roccia

r = Indice del martello di Schmidt

I dati riportati sono stati ricavati dalla Figura 2.3, nella quale si tiene conto anche dell'inclinazione dello strumento rispetto all'orizzontale.

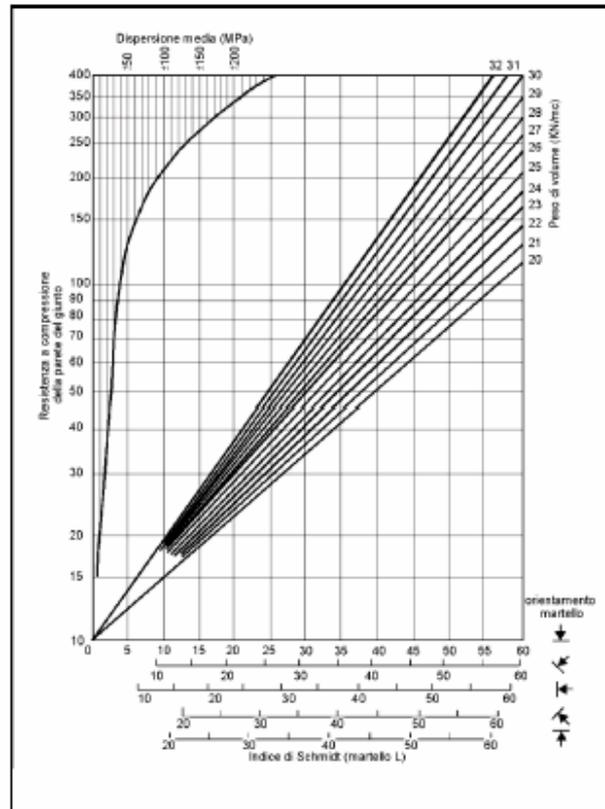


Figura 2.3 Diagramma di Hoek e Bray (1981).

Le misure sono state eseguite sia su giunti integri che su giunti alterati al fine di confrontare le misure e quindi determinare il grado di alterazione della roccia. Ogni valore rilevato è stato determinato mediante l'esecuzione di 10 letture, di cui le 5 con il valore più basso sono state scartate; il valore è stato quindi determinato dalla media delle restanti letture.

Si precisa che per valori alti di resistenza meccanica lo sclerometro non risulta affidabile: infatti si possono avere dispersioni addirittura del 50 % per valori compresi tra 100 e 150 MPa.

Le aperture delle discontinuità sono state misurate mediante uno spessimetro ed analizzate globalmente mediante le classi indicate nelle tabelle di classificazione di Bieniawski, tenendo conto dell'eventuale riempimento.

Nel caso in studio il parametro 'presenza d'acqua' non è stato considerato, in quanto tutte le discontinuità sono risultate asciutte.

I dati ricavati dalle stazioni geomeccaniche sono stati utilizzati per la determinazione della qualità dell'ammasso roccioso, esprimibile attraverso appositi indici che hanno lo scopo di permettere una valutazione preliminare delle caratteristiche meccaniche dell'ammasso nel suo complesso.

Diverse sono le classificazioni tecniche note in letteratura, utili per la definizione della qualità di un ammasso. In questa sede è stata utilizzata quella di Bieniawski (1973 e successive modifiche) che fornisce un valore numerico (*Rock Mass Rating*, RMR) derivato dalla somma di indici parziali stimati attraverso valutazioni qualitative o quantitative.

La classificazione di Bieniawski tiene conto di 5 parametri relativi allo stato della roccia (A1 e A2) e dell'ammasso roccioso (A3, A4 e A5) e di un indice di correzione il cui valore è funzione dell'orientamento delle discontinuità e delle problematiche da affrontare (gallerie, versanti e fondazioni).

$$\mathbf{RMR} = (A1 + A2 + A3 + A4 + A5) - I_c.$$

I parametri sono:

A1 Co (Resistenza a compressione uniassiale);

A2 RQD% (*Rock Quality Designation* - Recupero percentuale modificato);

A3 s (Spaziatura delle discontinuità);

A4 Condizioni dei giunti

A5 Condizioni idrauliche

Ic Indice di correzione

Ad ognuno di essi è assegnato un indice parziale a seconda del valore (per RQD%, Co e s) o della condizione. Secondo Bieniawsky, le variazioni dei parametri possono essere valutate in maniera discreta o in maniera continua, il che ha comportato una successiva modifica della classificazione (Bieniawsky, 1979). Tale classificazione utilizza il coefficiente di correzione (Ic) da sottrarre all'indice parziale *Basic RMR* ricavato dalla somma dei parametri A1-A2-A3-A4-A5, basato principalmente sulla valutazione degli effetti dell'orientazione dei giunti rispetto a quella del fronte.

PARAMETRI		INTERVALLI DI VALORI						
A1	RESISTENZA ROCCIA INTATTA	Carico puntuale(Mpa) Compressione monoassiale(MPa)	>10 >250	4-10 100-250	2-4 50-100	1-2 25-50	Non applicabile 5-25 1-5 <1	
		VALORI	15	12	7	4	2	1
A2	RQD (%)		90-100	75-90	50-75	25-50	<25	
		VALORI	20	17	13	8	3	
A3	SPAZIATURA GIUNTI (m)		>2	0,6-2	0,6-0,2	0,06-0,2	<0,06	
		VALORI	20	15	10	8	5	
A4	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		
		VALORI	30	25	20	10	0	
A5	CONDIZIONI IDRAULICHE	Afflusso per 10m di lungi del tunnel (litri/min) Rapporto Pressione acqua giunti/Pressione natural sito Condizioni generali	Assente 0 Giunti asciutti	<10 <0,1 Umidì	10-25 0,1-0,2 Bagnati	25-125 0,2-0,5 Stilicido	>125 >0,5 Venute d'acqua	
		VALORI	15	10	7	4	0	

Tabella 2.5 Classificazione di Bieniawski del 1979 (a).

La somma algebrica degli indici parziali e di I_c fornisce l'indice RMR (Tab. 2.5)

Indice RMR	0 - 25	25 - 50	50 - 70	70 - 90	90 - 100
Classe	V	IV	III	II	I
Qualità	Molto scadente	Scadente	Discreta	Buona	Ottima
C (kg/cmq)	>1	1 - 1,5	1,5 - 2,0	2,0 - 3,0	> 3,0
γ (°)	>30°	30° - 35°	35° - 40°	40° - 45°	>45°

Tabella 2.6 Classificazione di Bieniawski del 1979 (b).

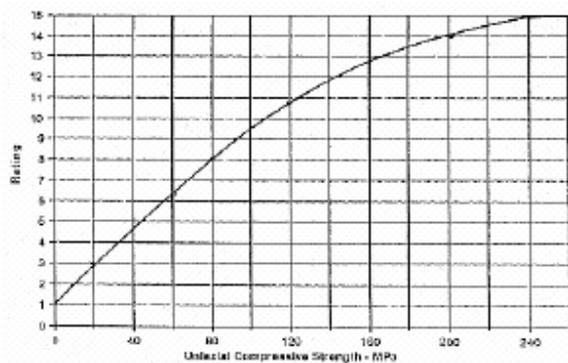
Il valore del *Basic* RMR per giunti asciutti ($A5=15$) può essere correlato al parametro G.S.I. (*Geological Strength Index*), grandezza collegata ai fattori m , a ed s dell'ammasso roccioso integro (Bieniawski, 1989). Infatti si ha:

$$GSI = BRMR_{70} - 5 \text{ (solo per } BRMR > 23).$$

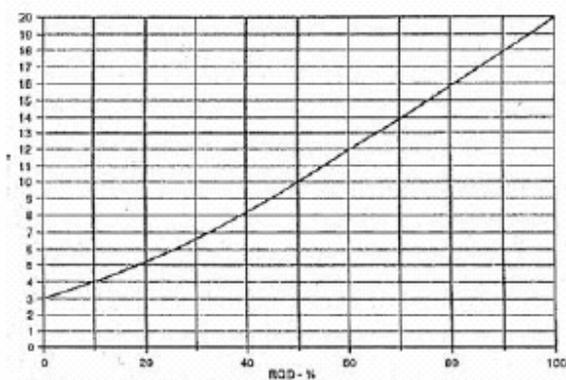
La Classificazione di Bieniawski del 1989, rispetto alle precedenti, si differenzia sostanzialmente per due aspetti:

- la possibilità di valutare i parametri A1 (resistenza della roccia), A2 (RQD) e A3 (spaziatura) secondo una curva continua e non per classi discrete, come avveniva nelle classificazioni precedenti;
- la possibilità di ricavare il parametro A4 (condizione dei giunti) in modo meno soggettivo, utilizzando una tabella più dettagliata.

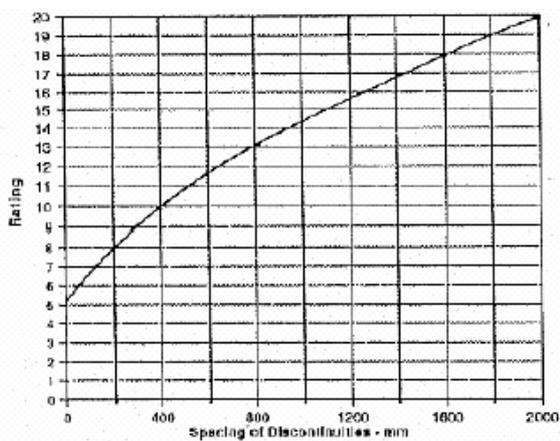
I parametri A1, A2, A3 sono stati ricavati direttamente attraverso i grafici riportati in Figura 2.4:



Indice A1



Indice A2



Indice A3

Figura 2.4 Grafici utili alla valutazione dei parametri A1, A2 e A3 – Classificazione di Bieniawski del 1979.

Il parametro A4 deve essere ricavato attraverso la sommatoria di una serie di indici parziali, che tengono in considerazione la rugosità, l'apertura, la persistenza lineare, il riempimento e il grado di alterazione dei giunti (Tab. 2.7).

PARAMETRI	INTERVALLI DI VALORI				
Lunghezza giunto	<1m	1-3 m	3-10 m	10-20 m	>20 m
Indice	6	4	2	1	0
Apertura giunto	Chiuso	<0,1 mm	0,1-1 mm	1-5 mm	>5 mm
Indice	6	5	4	1	0
Rugosità giunto	Molto rugoso	Rugoso	Leggerm. rugoso	Liscio	Laminato
Indice	6	5	3	1	0
Riempimento	Nessuno	Compatto<5mm	Compatto>5mm	Molle<5mm	Molle>5mm
Indice	6	4	2	2	0
Alterazione giunti	Non alterati	Legg.alterati	Mediam.alterati	Molto alterati	Decomposti
Indice	6	5	3	1	0

Tabella 2.7 Parametro A4 - Condizione dei giunti.

Infine, il parametro A5 (condizioni idrauliche) è calcolato come nella classificazione del 1979. Per la stima dell'indice di correzione Ic si fa riferimento alla Tabella 2.8:

Orientamento dei giunti	Molto favorevole	Favorevole	Discreto	Sfavorevole	Molto sfavorevole
Gallerie e miniere	0	-2	-5	-10	-12
Fondazioni	0	-2	-7	-15	-25
Versanti	0	-5	-25	-50	-60

Tabella 2.8 Parametro A5 - Condizioni idrauliche

La correzione è determinata dall'analisi dei meccanismi di rottura che si possono verificare dall'intersezione dei piani di discontinuità.

Tale correzione Ic applicata al valore del BRMR consente di ottenere l'indice RMR, che può assumere valori compresi tra 0 e 100, riferibili a cinque classi di qualità (Tab. 2.9) :

RMR	0-25	25-50	50-70	70-90	90-100
CLASSE	V	IV	III	II	I
QUALITA'	Molto scadente	Scadente	Discreta	Buona	Ottima

Tabella 2.9 Indice RMR.

I parametri geomeccanici dell'ammasso roccioso sono invece correlati direttamente a BRMR attraverso le seguenti relazioni (Bieniawski, 1989):

$$\text{angolo di attrito dell'ammasso roccioso } \varphi[^\circ] = 5 + \frac{BRMR}{2}$$

$$\text{coesione dell'ammasso roccioso } c[MPa] = 0,005 * BRMR$$

$$\text{modulo elastico dell'ammasso roccioso } E[GPa] = 10^{\frac{BRMR-10}{40}}$$

2.2.2 TECNOLOGIE INNOVATIVE PER IL RILIEVO DI VERSANTI IN ROCCIA

I nuovi metodi diagnostici basati su tecniche laser hanno trovato in questi ultimi anni sempre maggior impiego in campo scientifico, in particolare nello studio di frane, nello studio di cave a cielo aperto, nel rilievo geomeccanico tradizionale ed in studi sulla caduta massi.

Il notevole vantaggio di tali nuovi metodi diagnostici è dato sia dalla capacità di acquisire dati da grande distanza che dalla possibilità di rilevare superfici caratterizzate da geometrie complesse e notevolmente estese, mantenendo un elevato livello di risoluzione.

In particolare, nello sviluppo del presente lavoro di ricerca, sono stati utilizzati il rilievo fotogrammetrico e il rilievo con tecnica *laser scanning*.

2.2.2.1 IL RILIEVO FOTOGRAMMETRICO

Il rilievo fotogrammetrico rappresenta un valido strumento di indagine *non distruttiva*, che permette l'acquisizione di dati numerici e tematici e offre la possibilità di effettuare controlli sistematici sui versanti e sulle eventuali opere di consolidamento.

Tutte le possibilità di analisi offerte dal rilievo numerico, essendo gestite da *software* di grafica, possono essere gestite, sia a video che su supporto cartaceo, attraverso opportuni codici di riconoscimento atti a descrivere le specifiche fenomenologie.

La visione stereoscopica si ottiene dall'osservazione contemporanea di due fotogrammi dello stesso oggetto da rilevare da due punti di vista diversi, riproponendo in tal modo, nient'altro che la visione stereoscopica dell'occhio umano. Per poter ottenere quanto detto, i fotogrammi devono avere le seguenti caratteristiche:

- devono essere scattati a destra e a sinistra del soggetto, ovvero devono avere entrambi una parte in comune del soggetto da rilevare in modo che la sovrapposizione del fotogramma di sinistra su quello di destra sia almeno del 60%. Solo in questa porzione comune, detta "coppia stereoscopica" si potrà osservare la terza dimensione e quindi la stereoscopia;
- medesima distanza di presa, in modo che i due fotogrammi costituenti la coppia stereoscopica abbiano la stessa scala fotografica;

- assi della camera paralleli tra loro ed ortogonali all'oggetto, in modo che tutti gli elementi del soggetto siano ben sovrapponibili sulle due foto al fine di ottenere una buona visione stereoscopica.

Affinché queste condizioni siano soddisfatte, quando si devono rilevare versanti come quello in oggetto, è necessario eseguire il rilievo fotografico da elicottero.

Applicazione all'area di studio del Monte Saretto

La tecnica di rilievo fotogrammetrico è stata finalizzata alla loro descrizione geometrica tridimensionale, in vista di future operazioni di risanamento. Per questo motivo è stato utilizzato un metodo stereoscopico che permette di orientare i fotogrammi in modo tale da ricostruire il modello in 3D. Anche il rilievo fotogrammetrico è stato eseguito nell'ambito di una campagna di indagini coordinate da ricercatori del D.I.G..

Il rilievo in sito è stato preceduto dalla fase del "progetto delle prese" che rappresenta una fase preliminare all'intervento di rilievo vero e proprio, nella quale si sono determinati il numero di fotogrammi da scattare, la relativa scala fotografica e la conseguente scala di restituzione in funzione della distanza di presa e della focale della camera, che determina l'angolo di apertura dell'obiettivo. Per distanza si intende la distanza che intercorre tra l'oggetto da rilevare e la camera fotografica.

Calcolato il numero di fotogrammi da effettuare è stato possibile conoscere il numero di punti topografici necessari per coprire le coppie stereoscopiche e conoscere in anticipo come effettuare i rilievi topografico e fotografico.

In questa fase, inoltre, si è deciso quando effettuare le foto nell'arco della giornata, in funzione della luce naturale.

L'intero versante presenta un'altezza variabile che va dai 200 m ai 400 m ed un'escursione in profondità di circa 400 m; ciò ha determinato la scelta di effettuare un'unica strisciata con una direzione di volo mediamente parallela all'intero ammasso roccioso in modo da ottenere coppie stereoscopiche ben sovrapposte tra loro.

I punti topografici, ovvero i punti a coordinate note, utilizzati nelle successive fasi di elaborazione sono stati individuati in sito tramite la messa in opera di *target* in materiale plastico (*forex*) di colore bianco e nero. Questi sono stati posizionati sulle pareti rocciose

indagate da rocciatori, con un interasse orizzontale tra i 25 ed i 30 metri. La distribuzione dei punti topografici, e quindi dei *target*, è dettata da esigenze di tipo fotogrammetrico, nel senso che i punti rilevati topograficamente devono essere almeno cinque per ogni coppia stereoscopica e distribuiti sul soggetto quanto più omogeneamente possibile.

I fotogrammi realizzati per eseguire una restituzione fotogrammetrica devono avere precise caratteristiche metriche. Per tale motivo si è utilizzata una camera calibrata digitale semimetrica D70 Nikon con ottica da 50 mm munita di certificato di calibrazione.

I valori presenti sul certificato di calibrazione sono utilizzati dal *software* di restituzione fotogrammetrica per correggere le deformazioni sul fotogramma che quindi acquisirà validità metrica.

I fotogrammi sono stati scattati da elicottero, il che ha consentito di effettuare una vera e propria strisciata fotografica con una distanza di presa di circa 200 metri e con una direzione di volo parallela al versante. Ciò ha consentito, a sua volta, di realizzare le coppie stereoscopiche secondo i parametri e le indicazioni sopra descritte.

Il rilievo topografico è stato eseguito con una stazione totale TC 1600 Leica con registratore automatico dei dati, con uno scarto-tipo delle misure delle distanze pari a $2 \text{ mm} \pm 2 \text{ ppm}$ ed uno scarto per la misura angolare di 0,0010 don.

Si sono ottenuti in tal modo le coordinate dei punti battuti rispetto al sistema di riferimento assoluto utilizzando una stazione posizionata sul terrazzo di copertura dell'Istituto professionale femminile di Sarno. Con queste coordinate è stato possibile, nella fase di orientamento dei fotogrammi, georiferire in scala reale il modello stereoscopico al fine di ottenere una restituzione grafica in scala 1:1.

Data la notevole presenza, alla base del versante, di elementi significativi come edifici, muretti, ecc., si sono collimati topograficamente molti punti naturali ben visibili nelle coppie stereoscopiche.

I fotogrammi, i valori di calibrazione della camera e le coordinate dei punti noti rappresentano gli *input* necessari per iniziare il lavoro di restituzione fotogrammetrica.

Nella fase degli orientamenti si costruisce il modello stereoscopico nella porzione di sovrapposizione dei due fotogrammi. Esistono tre tipi di orientamento: interno, relativo e assoluto.

L'orientamento interno viene effettuato su entrambi i fotogrammi, quello di sinistra e quello di destra, per conoscere la geometria dei fotogrammi ed i rispettivi centri di presa. Praticamente sono collimate, in genere, le quattro marche fiduciali d'angolo del fotogramma, alle quali sono associate le coordinate XY riferite al sistema di riferimento della lastra che ha origine al centro del fotogramma; il sistema di riferimento ha l'asse X orizzontale, orientata verso destra e l'asse Y verticale, orientata verso l'alto.

Da questa operazione il *software* calcola la geometria dei fotogrammi ed i relativi centri di presa.

L'orientamento relativo è effettuato, invece, contemporaneamente su due fotogrammi e cioè sulla loro sovrapposizione.

Si devono collimare almeno sei punti omologhi su entrambe le foto, detti punti di Von Gruber, tre sul bordo sinistro della coppia e tre sul bordo destro. In questo modo i due fotogrammi sono "cuciti" nella zona di sovrapposizione in modo da formare il modello stereoscopico ancora in coordinate-lastra.

L'orientamento assoluto, infine, trasforma il modello tridimensionale dei fotogrammi in scala reale tramite la collimazione dei punti noti collimati in sito e riconciliabili sul modello dei fotogrammi perché precedentemente segnalizzati sull'oggetto con *target* cartacei bianchi e neri.

Per le operazioni di restituzione è stato impiegato un restitutore fotogrammetrico digitale (Stereo View della Menci Software distribuito Nikon) che consente di ottenere la visione stereoscopica dei fotogrammi direttamente sul monitor del computer tramite i fotogrammi in formato digitale.

Dopo gli orientamenti di rito delle coppie stereoscopiche, si è ottenuto un modello tridimensionale in scala reale grazie all'utilizzo di punti a coordinate note rilevati in sito, e si è proceduto alla successiva fase di restituzione fotogrammetrica ricalcando con polilinee il modello 3D.

Oltre alla ricostruzione della geometria, si è eseguita un'interpretazione strutturata del rilievo, finalizzata al successivo studio della stabilità dei versanti. A tale fase di lavoro è conseguita la restituzione grafica e numerica dei dati, quali la struttura orientata dell'ammasso roccioso, ovvero la rappresentazione e la conoscenza geometrica (in 3D) del

contorno esposto delle discontinuità di maggiore persistenza (visibili in affioramento); infine è stata riportata l'ubicazione sul versante di eventuali massi removibili.

L'esplorazione dei modelli stereoscopici, infatti, permette di individuare la presenza di blocchi e porzioni rocciose già nettamente separati dall'ammasso, in conseguenza di spostamenti anche dell'ordine dei decimetri, e di blocchi delimitati da discontinuità chiaramente visibili con giaciture tali da fare ritenere possibile un eventuale fenomeno di instabilità (Tavola 3.6).

2.2.2.2 IL RILIEVO CON LASER SCANNER TERRESTRE

Il Laser Scanner è uno strumento di rilievo tridimensionale ad alta precisione.

La tecnica consiste nel dirigere un raggio di luce laser polarizzata (che non produce alcun danno) sulla superficie in studio. Il "pennello" di luce scorre su tutta la superficie e ne cattura, punto per punto, le tre coordinate spaziali e le caratteristiche di colore e riflettività alla velocità di migliaia di rilevamenti al secondo.

Il dato diretto fornito da un sistema laser a scansione, al termine della sessione di misura, è un insieme di coordinate tridimensionali di un numero elevatissimo di punti (tutti quelli che vengono colpiti dal raggio laser) una 'nuvola di punti' che descrive la superficie dell'oggetto e anche di tutto ciò che compare nel campo di vista dello strumento.

All'inizio delle operazioni di rilievo, generalmente questa nuvola di punti è georeferenziata rispetto ad un sistema di riferimento correlato con lo strumento.

La rappresentazione 'totale' di un oggetto generalmente richiede più scansioni realizzate da posizioni diverse, per coprire tutte quelle zone che, a causa della forma dell'oggetto, rischierebbero di non venire rilevate; dunque il rilievo, come nel caso di quello tradizionale, va attentamente programmato.

Una volta predeterminate le posizioni da cui effettuare le scansioni, opportunamente scelte per eliminare problemi dovuti a zone nascoste ed angolazioni eccessive, si procede al posizionamento dei "target" di riferimento che risulteranno poi utili nell'unificazione delle singole scansioni.

Si realizza così una banca - dati di coordinate 3D, colore e riflettività del soggetto priva di zone d'ombra e riflessioni anomale. Il risultato è un rilievo digitale in tre dimensioni che può essere facilmente analizzato ed elaborato. Il ricalcolo automatico in tempo reale dell'immagine tridimensionale (plastico virtuale) permette infatti di vedere l'oggetto da ogni direzione e consente di sezionarlo a qualunque livello ed in qualunque direzione, evidenziando i dettagli morfologici più piccoli.

La maglia di scansione può essere impostata con un lato di 1 cm ad una distanza di 100 metri, con una precisione di 3 mm nella localizzazione su un piano ortogonale alla linea (precisione

che diminuisce linearmente all'aumentare della distanza del bersaglio), e di 3 mm in profondità (valore non dipendente dalla distanza). La mole di dati acquisiti è ingente: possono ottenersi nuvole di milioni di punti, con precisione notevole, pur con tempi di acquisizione molto brevi (Teza et al., 2004; Bitelli et al., 2004).

Applicazione all'area di studio della Collina dei Camaldoli

In questo paragrafo si descrivono le caratteristiche esecutive del rilievo con Laser Scanner eseguito nell'area di studio della Collina dei Camaldoli (Fig. 2.5 - 2.8), mentre per le elaborazioni della nuvola di punti ed i risultati ottenuti, si rimanda al capitolo 8.

Lo strumento è stato posizionato ad una distanza massima dalla parete da rilevare di circa 50 m, la risoluzione della maglia di punti misurati è stata impostata con una ampiezza variabile tra 3 mm e 1 cm. Le fasi successive del rilievo sono state le seguenti:

- 1^a scansione: panoramica generale della superficie, rilevata con larghezza della maglia dei punti rilevati = 1 cm;
- 2^a scansione: particolare della superficie di studio rilevata con larghezza della maglia dei punti rilevati = 3 mm;
- 3^a scansione: particolare della superficie di studio rilevata con larghezza della maglia dei punti rilevati = 3 mm, con angolazione differente alla precedente in modo da riempire le zone d'ombra;
- rilievo con GPS al fine di georiferire la scansione laser nel sistema di riferimento prestabilito.

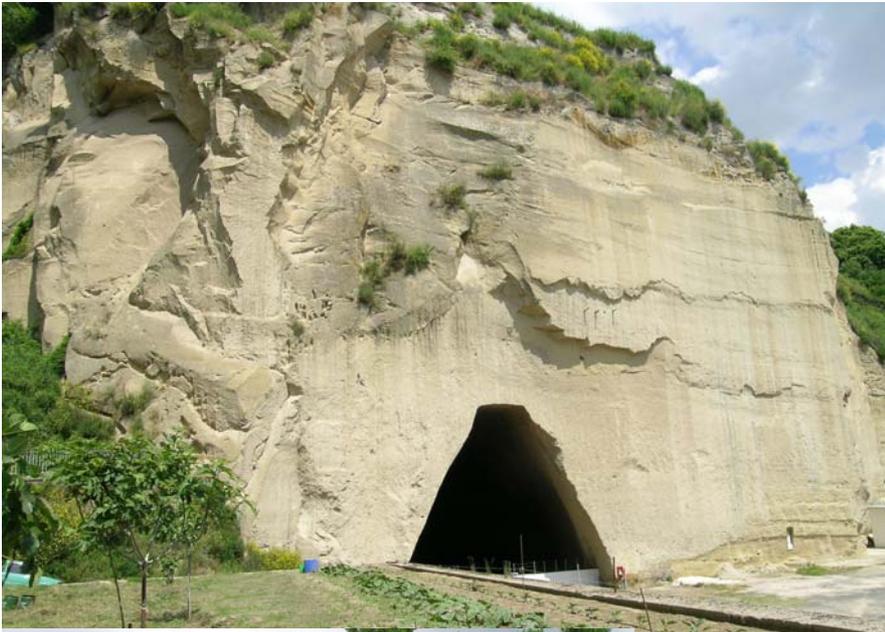


Figura 2.5 - Fronte di cava rilevato con il Laser Scanner.



Figura 2.6 - Particolare dello strumento in acquisizione.



Figura 2.7 - Rilievo con Laser Scanner.



Figura 2.8 - Particolare del fronte di cava rilevato.

Il *software* utilizzato per l'elaborazione dei dati *laser scanner* è il RISCAN PRO; tale programma è associato allo strumento Laser Scanner RIEGL's LMS-Z, utilizzato per il rilievo in quanto in possesso del Dipartimento di Ingegneria Geotecnica (RIEGL's, 2004).

Il RISCAN PRO permette di agire sia sulla configurazione del sensore di acquisizione, che sull'acquisizione e manipolazione dei dati e sulla loro archiviazione.

Le fasi di lavoro che si susseguono durante l'elaborazione dei dati laser scanner sono sinteticamente schematizzate di seguito (Capannini et al. 2003):

1. triangolarizzazione della nuvola di punti;
2. rimozione dei triangoli in ombra;
3. eventuale *smoothing* della *mesh* (questa procedura serve anche ad eliminare gli effetti del "rumore" presente nella misura delle distanze rilevate con la scansione)
4. sfooltimento dei triangoli pur mantenendo la precisione predefinita;
5. trasformazione dell'immagine originale per eliminare la distorsione dell'obiettivo (si usa la modellazione definita in fase di calibrazione della camera) per creare un'immagine che costituisce una prospettiva ideale;
6. esecuzione del *texturing* calcolando e memorizzando le coordinate immagine di ogni vertice della *mesh*.

Le fasi successive di lavoro sono state dedicate all'analisi geomeccanica del fronte di cava, in particolare sono stati sviluppati i seguenti *steps*:

- generazione del DTM e della mappa a curve di livello della zona di cava;
- estrazione delle sezioni;
- calcolo delle superfici di discontinuità;
- calcolo del Volume Unitario dei Blocchi.

Per gli ulteriori approfondimenti, si rimanda alla lettura del paragrafo 3.8, nel quale sono esplicitate le elaborazioni svolte, a partire dal rilievo laser scanner, al fine di valutare l'analisi di stabilità della parete rocciosa oggetto del rilievo.

2.2.3 CRITERI PER LA VALUTAZIONE DELLA STABILITÀ DEI VERSANTI IN ROCCIA - IL METODO RES

Il RES (*Rock Engineering Systems*) è una metodologia sviluppata da John A. Hudson allo scopo di affrontare i problemi di ingegneria delle rocce secondo una prospettiva sistemica.

Nell'introdurre il suo testo principale sul RES, Hudson [1992] spiega di essere stato spinto a questo approccio dall'osservazione della crescente complessità che i tecnici del campo si trovano ad affrontare. Tale complessità è alimentata, da un lato, dalla crescente rilevanza che vanno assumendo i progetti che vengono elaborati e, dall'altro, dalla crescente attenzione verso l'impatto dei progetti sull'ambiente e quindi verso la sua tutela. Entrambi i fattori esortano a considerare, per quanto concesso dai mezzi e dalle conoscenze a disposizione, tutti gli elementi dell'ambiente nel quale il progetto agisce e, soprattutto, le interazioni che la natura intesse tra gli elementi stessi.

Elementi e interazioni sono le nozioni basilari della Teoria Generale dei Sistemi, elaborata dal biologo austriaco Ludwig von Bertalanffy tra gli anni '30 e '50 del secolo scorso e successivamente estesa a molti e diversi campi del sapere scientifico e tecnico. Un sistema è, infatti, definito come «un complesso di elementi interagenti» [Bertalanffy, 1971]. Ai principi ed ai metodi di questa teoria fa riferimento la metodologia RES. Punto di forza del RES è la sua versatilità; è ben noto che, pur nell'ambito delle stesse leggi generali, i sistemi naturali hanno risposte diverse in funzione del luogo e del tempo.

Il RES presenta la caratteristica di essere *basato sull'obiettivo*: ciò vuol dire che, pur nell'ambito di uno schema generale stabilito in base al tipo di problema da affrontare, i parametri e le interazioni da portare in conto possono essere adattati di volta in volta al contesto, allo scopo dello studio, agli obiettivi del progetto; analogamente potrà variare il grado di dettaglio col quale si potrà e vorrà caratterizzare il sistema, i suoi elementi e le sue interazioni.

Dall'epoca della sua nascita, la Teoria Generale dei Sistemi è stata applicata, ancor prima che nell'Ingegneria delle Rocce, a molte altre discipline. Lo stesso RES, inoltre, ha trovato applicazione oltre che nel campo di origine (Mazzoccola, 1992; Nathanail et al., 1992; Cai et al., 1998; Dematteis et al., 2001; Migliore, 2001; Farina, 2004; Calcaterra et al., 2004 a; Bellucci

Sessa et al., 2005), anche in problemi di diversa natura (Caruso et al., 2002; Temel & Maru, 2002; Farina, 2004).

2.2.3.1 LA MATRICE DELLE INTERAZIONI COME RAPPRESENTAZIONE DEL MODELLO

Per gestire un modello sistemico, in base a quanto detto, è necessario tenere presenti contemporaneamente gli elementi e le interazioni che lo compongono. Serve allora uno strumento in grado di sintetizzare le informazioni a disposizione ed organizzarle in modo efficiente nonché presentarle in una forma facilmente comprensibile. Nella metodologia RES questo strumento è la matrice delle interazioni. «Il principio fondamentale della matrice delle interazioni consiste nell'elencare i principali soggetti o parametri lungo la diagonale principale e considerare le interazioni nelle celle non diagonali.» (Hudson, 1992; la traduzione del testo originale in inglese è opera di Farina, 2004) (Fig.2.9).

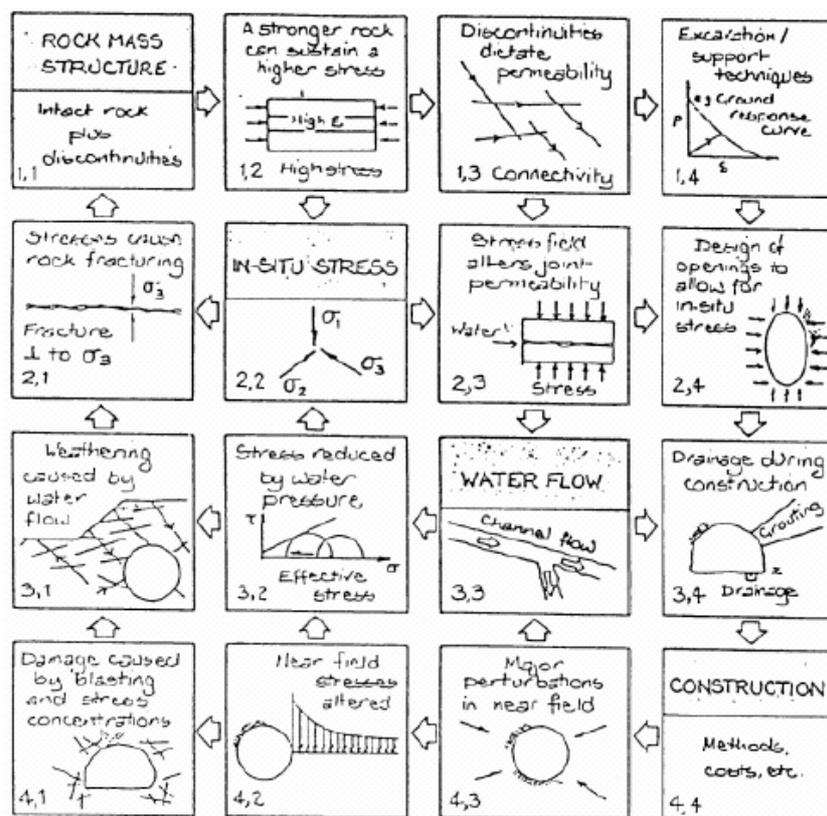


Figura 2.9 Un esempio di matrice delle interazioni [Mazzoccola, 1992].

«I termini della diagonale principale possono essere soggetti o concetti: essi non devono necessariamente avere valori quantitativi, sebbene ci siano dei vantaggi nell'assicurare che

siano tutti della stessa *qualità*», ad esempio misurabili con la stessa unità. Riguardo alle interazioni, «ci sono diversi modi di presentare le informazioni [...]: una cella di interazione può contenere un'analisi più dettagliata del meccanismo o, in alternativa si può tentare di rappresentare la significatività del meccanismo attraverso una certa forma di codifica» (Hudson, 1992; in Farina, 2004) (v. par 2.2.3.3.1).

L'interazione fra due elementi 'i' e 'j' del sistema presenta due diversi aspetti: l'influenza di 'i' su 'j' e quella di 'j' su 'i'; tali influenze sono, in generale, diverse tra loro. Nella matrice delle interazioni le suddette relazioni verranno poste rispettivamente, l'una nella cella ij e l'altra nella cella complementare ji (Fig. 2.10). Ne risulta che, facendo perno sulla diagonale principale, le interazioni vanno lette in senso orario.

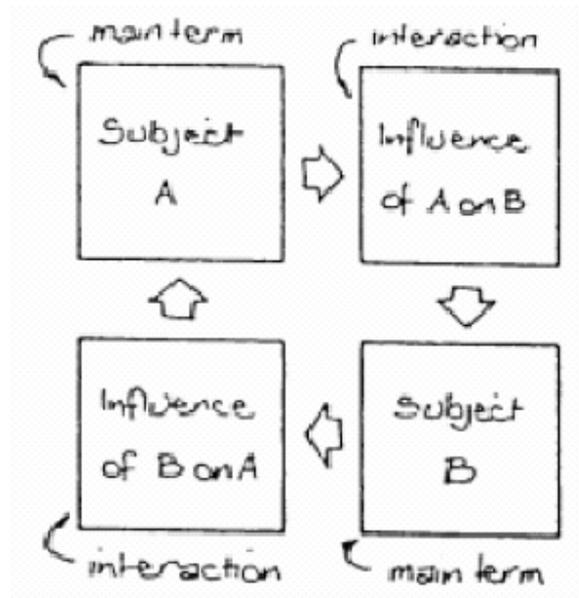


Figura 2.10 Rappresentazione dell'interazione tra due parametri [Mazzoccola, 1992].

All'interno della matrice viene, di norma, inserito un parametro speciale derivato dall'obiettivo dello studio, così da poter valutare le sue interazioni con gli elementi del sistema. Per convenzione esso viene inserito nell'ultima cella della diagonale principale.

2.2.3.1.1 Proprietà della matrice

Se N è il numero di elementi del sistema, nella matrice delle interazioni potranno comparire fino a $N^2 - N$ diverse interazioni. È stato già osservato che l'influenza di 'i' su 'j' è, in generale, diversa da quella di 'j' su 'i'. Ciò significa che la matrice è, in generale, asimmetrica. «L'asimmetria della matrice è associata al fatto che l'interazione dipende dal percorso» (Hudson, 1992; in Farina, 2004). Il che è un altro modo per dire che il sistema è non conservativo. È ovvio che qualora il sistema descritto sia conservativo, la matrice sarà simmetrica (Fig. 2.11) ed avrà delle proprietà particolari, che si potranno sfruttare nelle successive elaborazioni.

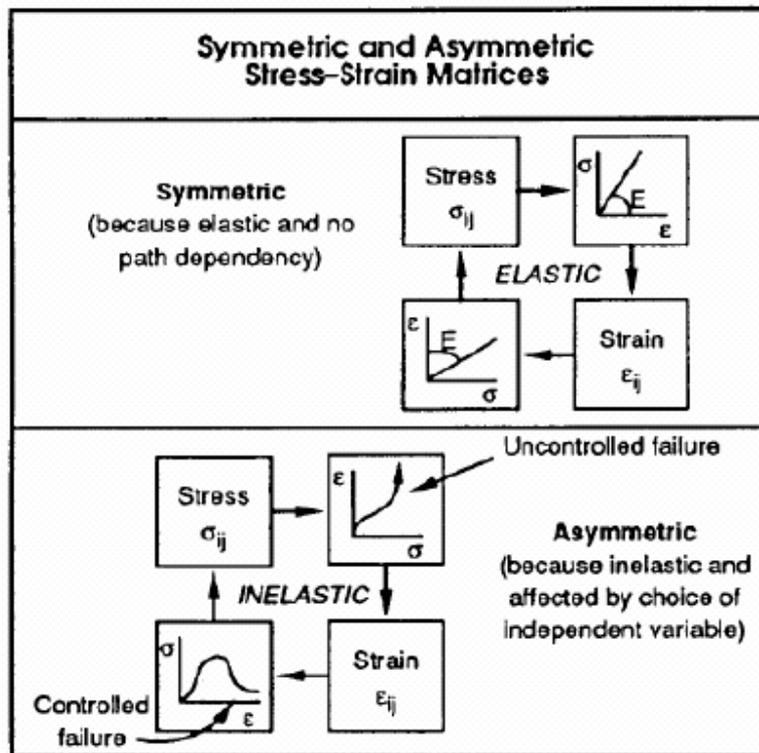


Figura 2.11 Esempi di matrici simmetriche ed asimmetriche: in regime perfettamente elastico, la relazione tensione - deformazione è lineare e *indipendente dal percorso*, mentre in regime elasto - plastico la relazione è diversa secondo la scelta della variabile indipendente, cioè *dipende dal percorso* [Hudson, 1992].

In generale si può studiare un fenomeno con il grado di dettaglio compatibile con i mezzi e gli obiettivi imposti. Per ciò che riguarda la matrice delle interazioni, un maggiore grado di dettaglio significa un maggior numero di parametri e relazione da portare in conto. Il numero

di parametri posti lungo la diagonale principale (la dimensione o *rango* della matrice) è ciò che l'Autore chiama risoluzione. In altre parole, «quanto maggiore è il numero di parametri, tanto più fine sarà la risoluzione» (Hudson, 1992; la traduzione del testo originale in inglese è riferita alla tesi di laurea di Farina, 2004).

Ricordiamo che risolvere significa anche distinguere, separare. Infatti, nello studio delle immagini questo termine viene usato con riferimento alla capacità di distinguere in un'immagine due oggetti distinti nella realtà. Allo stesso modo, nella matrice delle interazioni, usare una risoluzione più fine significa poter riconoscere relazione di causa-effetto più elementari; viceversa utilizzare una risoluzione grossolana significa aggregare in un parametro o in una interazione più parametri o meccanismi elementari. In quanto detto è esplicito che il concetto di risoluzione è collegato anche alle celle non diagonali ed alla densità che esse conferiscono alla matrice.

A partire dal concetto di risoluzione si può introdurre quello di gerarchia dei parametri semplicemente osservando che, in momenti successivi dell'approccio alla descrizione di un fenomeno, possono essere necessarie possibili risoluzioni differenti. Se un fenomeno viene descritto in momenti successivi con matrici di risoluzione diversa, è ovvio che, per coerenza tra le due fasi dello studio, tra i parametri che appartengono ad una matrice e quelli dell'altra dovrà instaurarsi un rapporto gerarchico.

Il processo di approfondimento dello studio di un fenomeno può essere rappresentato da un grafo ad albero tridimensionale in cui il nodo radice simboleggia la definizione e i rami la descrizione. A partire dalla definizione si possono generare in cascata matrici sempre più specifiche e dettagliate espandendo di volta in volta ogni parametro più complesso e generale in un gruppo di parametri più semplici e specifici (Fig. 2.12). Analogamente, scendendo nella scala gerarchica i termini delle celle non diagonali rappresenteranno meccanismi interattivi via più elementari.

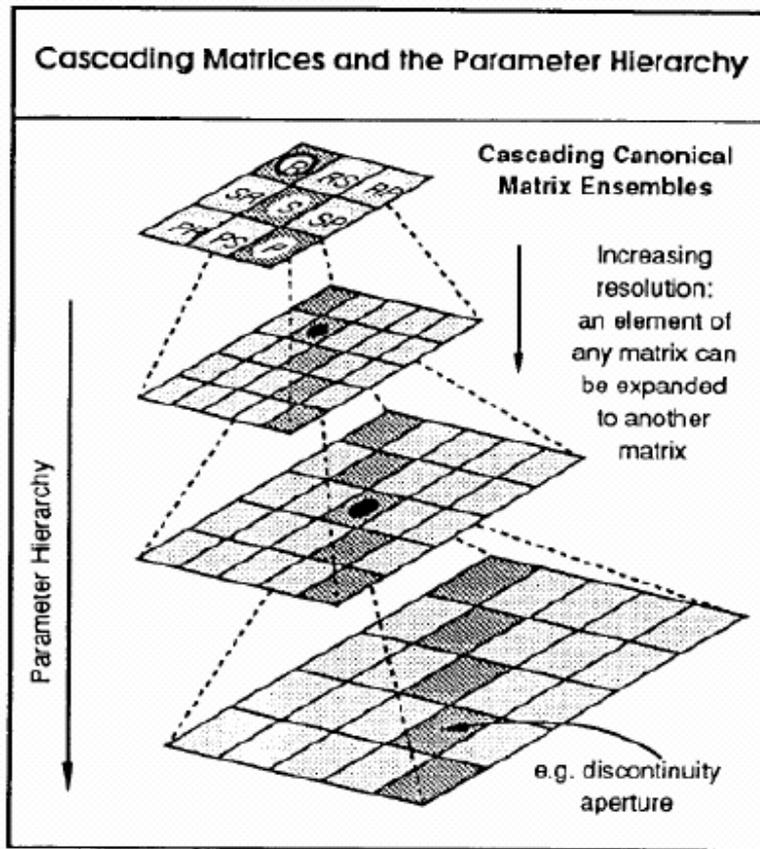


Figura 2.12 Incremento della risoluzione durante la discesa lungo la gerarchia [Hudson, 1992].

Dalla definizione di albero discende che ogni parametro potrà avere un numero qualsiasi di parametri figli ma un solo parametro padre (lo stesso dicasi per i meccanismi); in caso contrario non sarebbe garantita la possibilità di risalire la scala gerarchica con un procedimento di aggregazione (o sintesi).

Naturalmente nel processo di conoscenza del sistema ci si può – per scelta o per necessità – fermare ad un livello più aggregato per un determinato sottosistema, scegliendo invece per un diverso sottosistema un dettaglio più spinto: la matrice risultante avrà risoluzione variabile al suo interno (Fig. 2.13).

2.2.3.2 IL PROCEDIMENTO ANALITICO – SINTETICO

«Una volta che sia stato stabilito il contenuto del modello analitico, cioè il modello sia stato “mappato” in termini dei componenti rilevanti, il processo può essere invertito e può essere costruito un modello sintetico con queste componenti [...] Essenzialmente si entra nel sistema su base analitica e se ne esce su base sintetica» (Hudson, 1992; in Farina, 2004).

Trattandosi, nel caso generale, di un problema nuovo per il quale non si dispone di un modello *olistico* già pronto, il modello di riferimento va costruito *ad hoc* sulla base delle conoscenze specifiche disponibili per l'ambiente in esame. Il procedimento per l'applicazione della metodologia RES è, dunque, articolato in due fasi: una prima analitica (l'ingresso nel sistema) ed una successiva sintetica (l'uscita dal sistema).

Il principio ispiratore della modellazione analitica è che «assumiamo che ogni cosa sia presente nel modello: il problema è solo trovare cosa c'è». In pratica nella prima fase si scompone il “tutto”, cioè il sistema ambientale, nelle sue singole parti, cioè gli elementi e le interazioni, allo scopo di definirle ed esaminarle.

L'analisi viene articolata in sei stadi (Fig. 2.14).

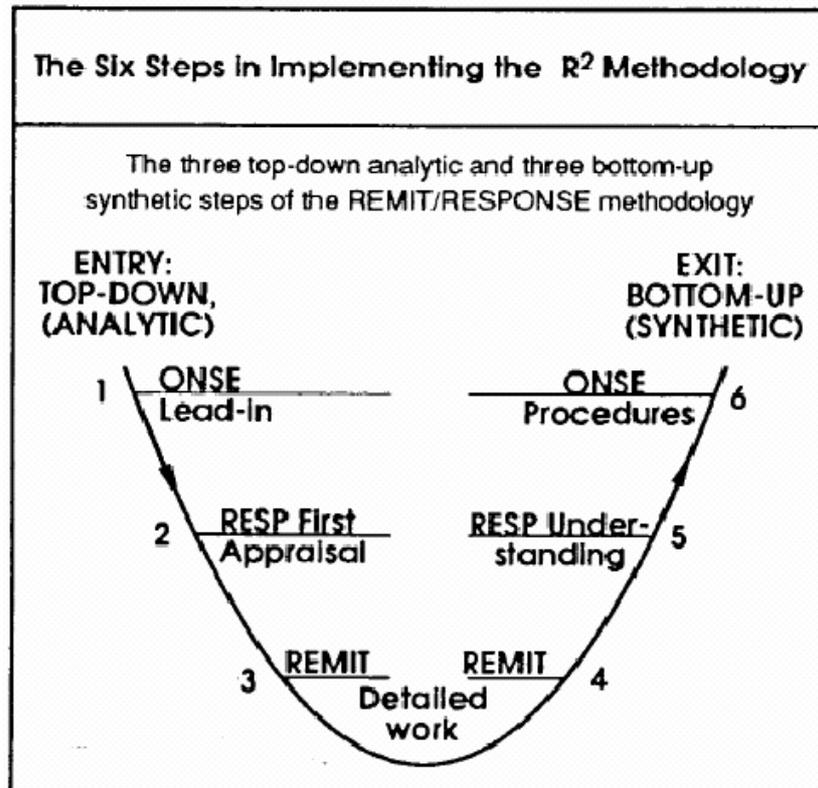


Figura 2.14 Le fasi analitica e sintetica dell'implementazione del RES, e gli stadi in cui si articolano [Hudson, 1992].

1. **Stabilire gli obiettivi:** dato che è stato già affermato che la metodologia è basata sull'obiettivo, sembrerà un'ovvietà rimarcare che bisogna iniziare con una definizione precisa di «ciò che si sta cercando di fare». Tuttavia sembra opportuno notare che lo stesso Hudson ribadisce questa considerazione in numerose occasioni, forse cercando di scongiurare la banalizzazione di questo momento fondamentale della procedura, che può avere notevole ripercussione sulla linearità ed agevolezza dei passi successivi.
2. **Analizzare in prima approssimazione il funzionamento del sistema:** lo scopo di questo passo è stabilire i parametri che sono coinvolti nel funzionamento del sistema. Ovviamente non esiste una regola assoluta per scegliere con quali e quanti parametri costruire in modello. Hudson presenta due matrici generali per lo studio di due classi di problemi: pendii e scavi sotterranei in roccia; a partire da una di esse, in base ai propri obiettivi, l'operatore dovrebbe da un lato scartare i parametri insignificanti per il proprio problema e dall'altro scegliere i parametri e le relazioni più interessanti e/o complessi da approfondire (v. par. 2.2.3.2.1).

3. **Analizzare i meccanismi interattivi:** si tratta di raccogliere le informazioni disponibili per la caratterizzazione delle interazioni tra tutti i parametri scelti, appurando quali sono presenti e significativi e quali sono assenti e insignificanti in virtù degli obiettivi, dei mezzi a disposizione e, quindi, del grado di dettaglio prescelto. Il prodotto di questo passo è una matrice molto dettagliata ed aderente al problema oggetto di studio. Gli ultimi due passi della fase analitica vengono attuati attingendo alla letteratura disponibile, alla consultazione di esperti, alla precedente esperienza dell'operatore nonché, eventualmente, alla raccolta di dati in sito. Con il terzo passo si conclude la fase analitica della procedura: a questo punto si ha la base di conoscenze necessaria per "sintetizzare" il problema. Si entra così nella fase di sintesi, articolata anch'essa in tre stadi.
4. **Consolidare e strutturare le conoscenze acquisite:** la fase sintetica comincia con la riorganizzazione delle conoscenze accumulate in una struttura funzionale agli obiettivi ed ai mezzi disponibili per la misurazione dei parametri e dei fenomeni. Tutto ciò può implicare una *ricompattazione* della matrice dettagliata a cui si è giunti come risultato del terzo passo .
5. **Comprendere il funzionamento del modello:** in questo passo si ha la possibilità di approfondire la comprensione iniziata con il secondo passo interpretando (ai nostri fini) il funzionamento del sistema così come è stato da noi strutturato, con il grado di dettaglio concesso dai vincoli imposti (tempo, finanze, strumenti...). L'interpretazione del modello passa attraverso la codifica della matrice delle interazioni (v. par. 2.2.3.3.1).
6. **Stabilire i metodi e le procedure da adottare:** come risultato della fase di sintesi si dispone della conoscenza completa de sistema, perciò si può passare a decidere ed implementare le azioni che sarà necessario intraprendere per ottenere gli obiettivi prefissati. Si potrà trattare di metodi di scavo, sequenza dei lavori, dati da raccogliere o - come è il caso di questo lavoro - algoritmi di calcolo.

2.2.3.2.1 La vagliatura gerarchica

Hudson definisce il processo di costruzione della matrice, cioè l'insieme dei passi 2, 3 e 4, come *vagliatura gerarchica*. Infatti, per semplificare la scelta dei parametri da utilizzare, conviene operare una selezione ad ogni livello man mano che si approfondisce l'analisi, sfruttando in questo modo il rapporto gerarchico tra i parametri appartenenti ad un livello ed il loro *padre* del livello superiore. «Man mano che la risoluzione aumenta, alcuni elementi della matrice vengono eliminati se sono al disotto di una *soglia di rilevanza* stabilita per quella risoluzione». È ovvio il vantaggio di questo modo di procedere rispetto all'eventualità di dover utilizzare una matrice finale molto dettagliata alla ricerca delle interazioni insignificanti, che però avranno richiesto un dispendio di risorse per essere definite.

Se il processo è molto spinto, si può arrivare ad una matrice estremamente fine («*skeleton*») che, per quanto possa fornire una conoscenza puntuale del sistema, difficilmente avrà un'utilità pratica diretta; perciò sarà certamente necessario riassemblare i componenti di questa matrice in un'altra di risoluzione adeguata all'obiettivo preposto (stadio 4).

2.2.3.3 L'INTERPRETAZIONE DEL MODELLO

2.2.3.3.1 La codifica della matrice

Per interpretare correttamente il funzionamento del sistema, oltre a conoscere l'esistenza degli elementi e delle relazioni, bisogna conoscere – stimare – la loro importanza o intensità. Bisogna, cioè, quantificare l'importanza di ogni parametro stabilendo quanto esso influenzi il sistema e quanto ne sia influenzato (attraverso i meccanismi identificati). A questo scopo la metodologia RES prevede la codifica della matrice, cioè l'attribuzione ad ogni relazione di un valore numerico in qualche modo proporzionale alla sua intensità. Naturalmente il sistema oggetto di studio è già conosciuto nella sua struttura generale (specie a questo stadio del procedimento), pertanto il momento della codifica non è altro che la formalizzazione di questa conoscenza.

Si possono proporre almeno cinque metodi di conoscenza che spaziano da una semplice *check-list* ad un'analisi numerica completa del sistema. Ancora una volta, la scelta sarà operata in base alle risorse ed agli obiettivi dello studio.

La codifica più elementare adotta un **metodo binario**, ed è il tipo di codifica che si può usare in qualunque caso: ci si limita, infatti, a stabilire se una certa azione è presente o assente, attribuendo quindi il valore 1 o 0.

Un approccio più sofisticato è costituito dal **metodo semi-quantitativo esperto** (ESQ): si classificano le relazioni su una scala a un certo numero di valori, da 0 a m oppure da $-m$ a $+m$. Si può interpretare questo metodo come un'estensione del metodo binario, ma esso può fornire una comprensione più *fine* del sistema. Naturalmente questo metodo è più sensibile alla discrezionalità dell'operatore.

Una capacità interpretativa più spinta può essere ottenuta con il **metodo della pendenza del grafico**. Posto che vi sia una relazione lineare tra due parametri, si può codificare tale relazione con la pendenza di questa retta. L'uso di questo metodo richiede la disponibilità di una curva per ogni coppia ordinata di parametri e, inoltre, che questa curva sia ben approssimata ad una retta: queste condizioni rendono questo metodo meno utilizzabile o comunque ne limitano l'uso a matrici (o sotto-matrici) di piccole dimensioni.

Procedendo nel grado di approfondimento, si può pensare ad un **metodo sistemico diretto** in cui i meccanismi vengono rappresentati tramite equazioni differenziali alle derivate parziali e si usano per la codifica le costanti associate alle soluzioni (ad esempio equazioni del primo ordine).

Infine si può concepire di effettuare un'analisi numerica completa del sistema, ossia ciò che viene definito **metodo esplicito**. Per quanto semplice, il metodo binario fornisce comunque un contributo all'interpretazione del funzionamento del sistema e fornisce la possibilità di confrontare tra loro sistemi diversi (v. par. 2.2.3.3.2); esso ha trovato anche applicazione diretta in casi pratici [Nathanail et al., 1992].

All'altro estremo, i metodi analitici, per quanto entusiasmanti possano sembrare le loro possibilità, sono scarsamente applicabili nella pratica, se non a casi di studio o a sistemi molto semplici. Probabilmente il metodo della pendenza, per quanto impegnativo e forse non agevole per una comune pratica professionale, è il più interessante [Jiao & Hudson, 1995].

Senza dubbio il metodo ESQ è, tra tutti, il più interessante e il più pratico, infatti, è quello usato nella grande maggioranza delle applicazioni note del RES. Inoltre, è quello che è stato usato in questo studio, pertanto tutto quanto si dirà nel seguito si riferisce specificamente ad esso.

2.2.3.3.2 Il diagramma cause - effetti

Considerando la matrice nel suo complesso, possiamo osservare che una generica riga 'i' contiene le influenze del parametro 'i' su tutti gli altri parametri del sistema, quindi rappresenta l'influenza di quel parametro sul sistema. Analogamente la colonna 'i', contenendo le influenze di tutti gli altri parametri su 'i', rappresenta l'influenza del sistema su 'i'.

Dopo aver codificato la matrice, si potranno sommare i codici contenuti in una stessa riga e quelli contenuti in una stessa colonna. Si definirà *causa* (C) del parametro 'i' la prima sommatoria ed *effetto* (E) sul parametro 'i' la seconda (Fig. 2.15).

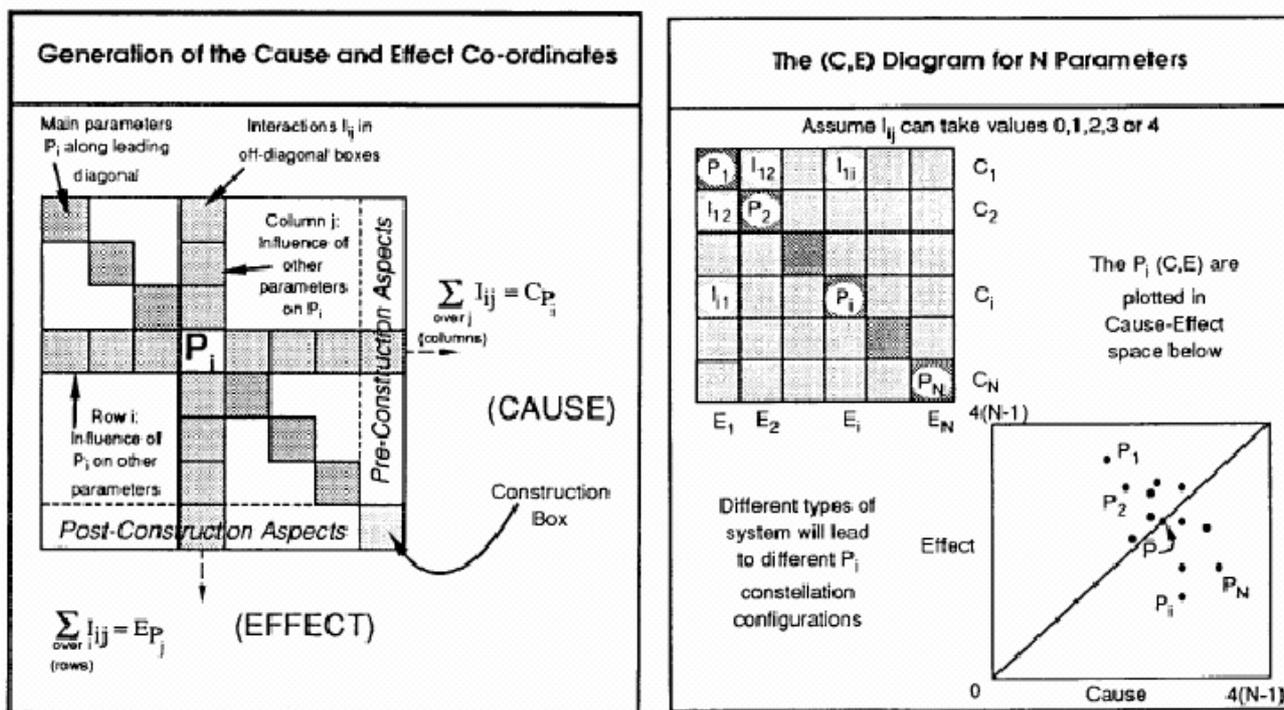


Figura 2.15 Matrice delle interazioni e diagramma cause - effetti [Hudson, 1992].

La rappresentazione dei valori così ricavati in un diagramma cartesiano è molto efficace ai fini dell'interpretazione del funzionamento del sistema (Fig. 2.15). La lunghezza di entrambi gli assi (per convenzione si riportano le cause sulle ascisse) è limitata a $m(N-1)$, essendo questo il massimo valore che la causa o l'effetto di un parametro possono assumere, nel caso particolare in cui a tutte le interazioni con gli altri parametri sia stato assegnato il massimo grado di significatività m .

La posizione di un punto all'interno di questo diagramma visualizza chiaramente il modo in cui il parametro che il punto rappresenta interagisce col sistema (Fig. 2.16). un punto che si trova lontano da entrambi gli assi avrà un alto valore sia di causa che di effetto, pertanto rappresenterà un parametro *molto interattivo* all'interno del sistema. Viceversa un punto prossimo all'origine identificherà un parametro *poco interattivo*.

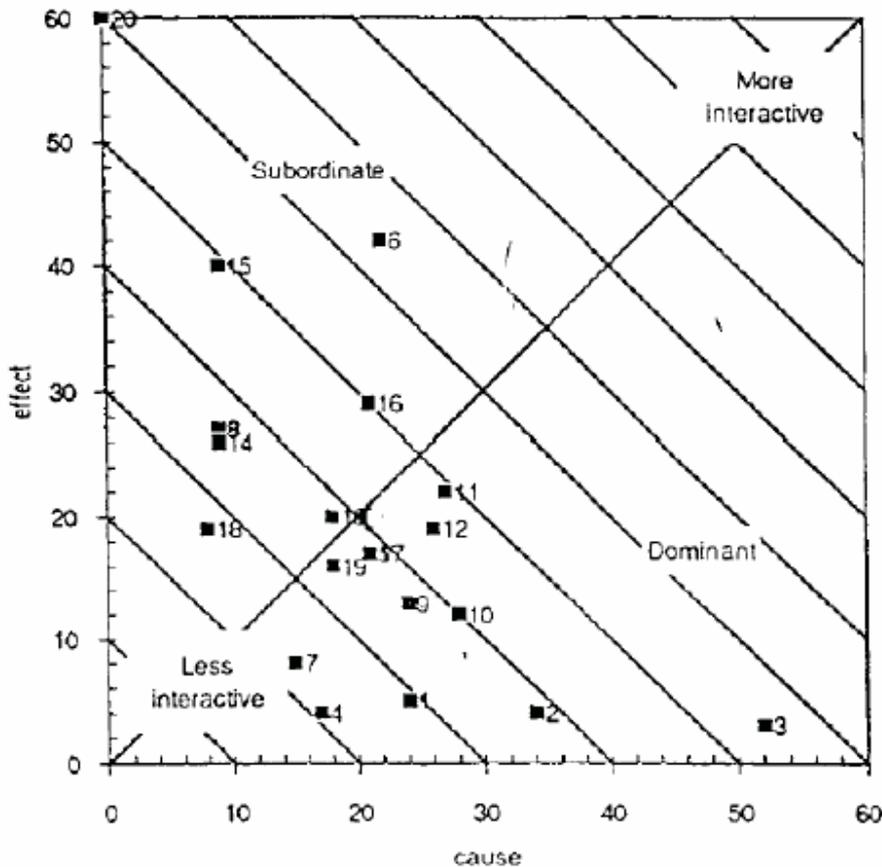


Figura 2.16 Esempio di diagramma cause - effetti, con l'indicazione del significato delle varie zone [Mazzoccola, 1992].

Inoltre un punto prossimo all'esterno dell'asse delle ascisse sarà rappresentativo di un parametro molto importante come causa, che subisce una scarsa influenza dal resto del sistema, cioè un parametro *dominante*. Di converso un parametro avrà il suo punto vicino all'asse delle ordinate quando è più rilevante l'effetto che il sistema ha su di esso rispetto a quello che esso stesso esercita sul sistema, cioè si tratta di un parametro *subordinato*.

Queste osservazioni si possono formalizzare ricavando, a partire dai valori C ed E, due ulteriori parametri. Si definiscono:

- *Interattività, o intensità interattiva*, il valore $I=C+E$, variabile tra 0 e $2m(N-1)$
- *Dominanza* il valore $D=C-E$, variabile tra $-m(N-1)$ e $m(N-1)$.

Si potrà dire se un parametro 'i' è dominante o subordinato guardando il segno di D_i . Per poter affermare che un parametro è molto o poco interattivo, invece, bisogna riferirsi al resto dei punti della nuvola o, più semplicemente, al suo baricentro.

Il baricentro della nuvola ha coordinate pari alla media delle cause e degli effetti di tutti i parametri; i due valori sono uguali tra loro per ovvie ragioni matematiche: «il baricentro dei punti giace sulla retta $C=E$ perché l'effetto di tutti i parametri sul sistema deve essere uguale all'effetto del sistema su tutti i parametri».

La posizione di un punto nel diagramma cause-effetti (o nel suo omologo interattività dominanza) è una sintesi efficace del comportamento del parametro, ma per poterla leggere è indispensabile tener presente il significato attribuito dall'operatore alla scala usata per codificare la matrice. Variando la scala o il suo significato si avrà per lo stesso sistema un diagramma diverso da significato simile ovvero un diagramma simile che esprime un diverso significato.

Ferma restando la considerazione ora espressa, quanto detto riguardo all'interpretazione della posizione di un punto nel diagramma si può estendere alla posizione ed alla forma della nuvola di punti rappresentativa di un intero sistema. Essa può essere concentrata in una dei quattro angoli del diagramma ovvero può essere allineata lungo la retta $C=E$ e perpendicolare ad essa.

Sulla base di queste informazioni si possono confrontare tra loro sistemi diversi, a patto di aver usato la stessa scala per la codifica e di averle attribuito lo stesso significato.

2.2.3.3 L'istogramma dell'intensità interattiva

A questo punto diventa di notevole importanza stabilire il numero delle interazioni per ogni parametro. Considerando però le interazioni positive e quelle negative (cause ed effetti) separatamente, si corre il rischio di dare poco risalto all'interattività del sistema. Quello che conta, infatti, non sono tanto i tipi di influenza, quanto il numero totale delle influenze. Quante più ce ne sono, cioè quanto più il sistema è reattivo, tanto più è instabile. La valutazione delle influenze totali si fa costruendo un istogramma (Fig. 2.17) in cui la somma delle Cause e degli Effetti di ogni parametro definisce le intensità interattive dei soggetti in gioco nel sistema.

La scelta di effettuare la somme C+E ha come scopo solo quello di evidenziare meglio il ruolo delle interattività di ogni parametro nel quadro generale dell'area. Infatti, sarebbe estremamente difficile stabilire quale delle due interazioni, tra le cause e gli effetti, sia più importante per il controllo del sistema.

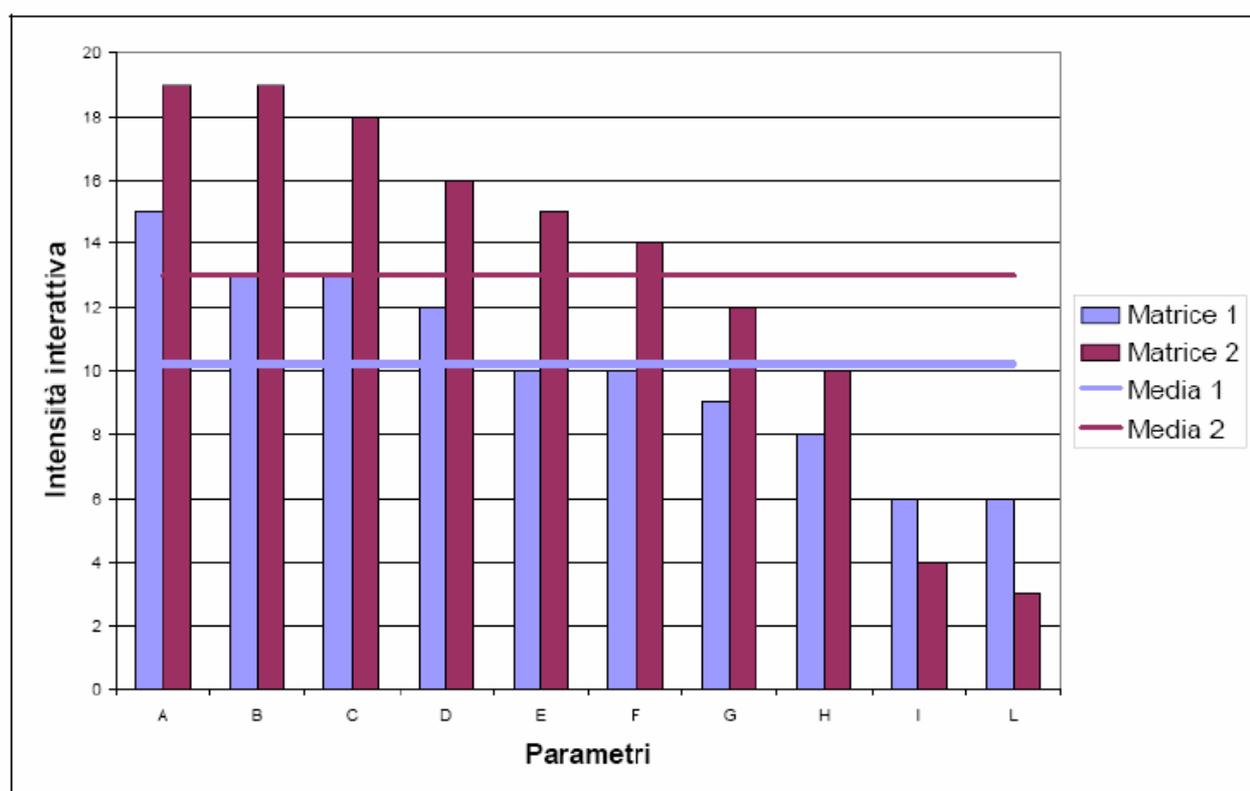


Figura 2.17 Esempi di istogrammi delle interattività: nel caso della matrice 2 si potrebbe pensare di escludere gli ultimi due parametri dalle elaborazioni, essendo molto meno interattivi della media (Nocerino, 2005).

2.2.3.4 LO SVILUPPO SEMIQUANTITATIVO COME ELABORAZIONE DEL MODELLO

Dopo aver definito l'importanza relativa di tutti i soggetti non resta che far entrare in gioco nel sistema il valore reale di tali elementi, passando da un'analisi qualitativa ad una quantitativa che possa essere applicata alle singole scarpate in esame. Si esclude l'instabilità potenziale in quanto fa parte del sistema al solo scopo di definire le interazioni che i parametri hanno con essa.

Di tutti i parametri, però, alcuni potrebbero essere descritti solo qualitativamente, mentre altri, ad esempio gli oggetti quantitativamente, pur essendo quantitativamente definiti, però, potrebbero rientrare in classi diverse. Per questo motivo, potrebbe non essere possibile utilizzare i valori assoluti di questi elementi per definire un indice di instabilità preciso, specie se i dati disponibili non godono di una certa precisione di dettaglio.

Nasce, quindi, la necessità di assegnare una classe di valutazione unica a tutti i parametri in cui, ognuno di essi, possa essere identificato al fine di ottenere un indice generale di instabilità che nasca dal confronto di tutti i soggetti interagenti.

Risulta chiaro che creando una classe di valori in cui possa essere quantificato ogni fattore, la precisione del metodo è sfavorita a causa di quegli elementi che risultano essere meno quantificabili degli altri, ad esempio se alla precedente instabilità venisse assegnata una classe di valutazione del secondo ordine "*inattiva*" e "*attiva*" ossia 0 o 1, anche tutti i valori degli altri elementi dovrebbero ricadere nella stessa classe di valutazione con i due indici possibili 0 - 1.

La scelta più giusta è quella di determinare, con un certo grado di approssimazione, dei limiti tra le classi di appartenenza attraverso la conoscenza della distribuzione generale dei valori in tutta l'area studiata e questo è ragionevole in quanto, l'intervallo dei valori da definire, dovrebbe discriminare le singole scarpate non in senso assoluto ma solo nell'obiettivo di distinguere la potenziale instabilità. Ad esempio considerando l'apertura delle discontinuità, non sarebbe il caso di fissare un limite di apertura diciamo a 8 cm solo perché questo separa due gruppi di scarpate, non avrebbe senso visto che comunque tra un'apertura di 6 cm ed una di 10 cm non c'è una reale differenza di potenziale instabilità in quanto entrambe comportano scarpate ad alto rischio.

Questo metodo rientra, quindi, in una codificazione semiquantitativa in quanto non tiene conto dei valori assoluti di ogni parametro, ma di un riadattamento di tali valori ad una classe di valutazione che sia il più vicina possibile alle disponibilità di dati ed alle esigenze di confronto tra i parametri compatibilmente con lo scopo dello studio.

L'ultima fase dell'implementazione è dedicata a stabilire le procedure da adottare per il caso di studio. Dei diversi metodi con i quali è stato finora applicato il RES, si vuole citare quello adottato da Mazzoccola [1992]. Esso consiste nel calcolare l'*indice di suscettibilità* o indice RMII (*Rock Mass Instability Index*) del sito 'k' tramite la sommatoria:

$$IS_k = \sum_t (I_t \cdot V_{k,t})$$

dove:

- I_t è il valore dell'intensità interattiva del parametro 'i', o un coefficiente ad esso proporzionale;
- $V_{k,t}$ è la misura del parametro 'i' per il sito 'k', ovvero il valore della classe in cui tale misura ricade.

Il coefficiente ha lo scopo di pesare il valore del parametro attraverso l'importanza del complesso delle sue interazioni con il resto del sistema. Questo indice rappresenta la sintesi più efficace del ruolo del parametro all'interno del sistema. In base ad esso si può operare una classifica di parametri, che costituisce un ulteriore modo di interpretare il sistema.

Dopo il calcolo dell'indice di instabilità si procede al calcolo dell'indice di prevedibilità PR (*Predictability Rating*) o di potenziale instabilità, secondo una successiva elaborazione dei dati. Tra tutti i dati si considerano solo quelli che contribuiscono all'instabilità del sistema nella misura del 80-90%. I fattori influenti sono scelti in base al confronto tra i parametri noti in letteratura come caratterizzanti e quelli che sono stati osservati nella zona di indagine.

Il calcolo dell'indice PR è generalmente effettuato per creare una distribuzione di instabilità tra le sole scarpate prese in esame, per distinguere, quindi, il grado di influenza della classifica adottata sui versanti d'esame. Nel presente studio, invece, il calcolo di questo indice non è stato applicato in maniera "classica", cioè costruendo una classifica tra le sole scarpate esaminate, ma è servito solo per una valutazione del grado di interattività dei parametri del

sistema. Lo scopo di questa valutazione è sorta per la necessità di dover applicare il sistema ad una più estesa area attraverso l'utilizzo solo dei parametri che hanno un alta influenza sulla potenziale instabilità.

2.2.4 INDIVIDUAZIONE DEI CINEMATISMI DELLE FRANE DA CROLLO (RSLOPE)

Le tipologie di meccanismi di instabilità, potenzialmente innescabili su un fronte roccioso, sono le seguenti:

- Scivolamento planare di blocchi di roccia;
- Scivolamento di cunei di roccia;
- Ribaltamento puro o con scivolamento di blocchi di roccia.

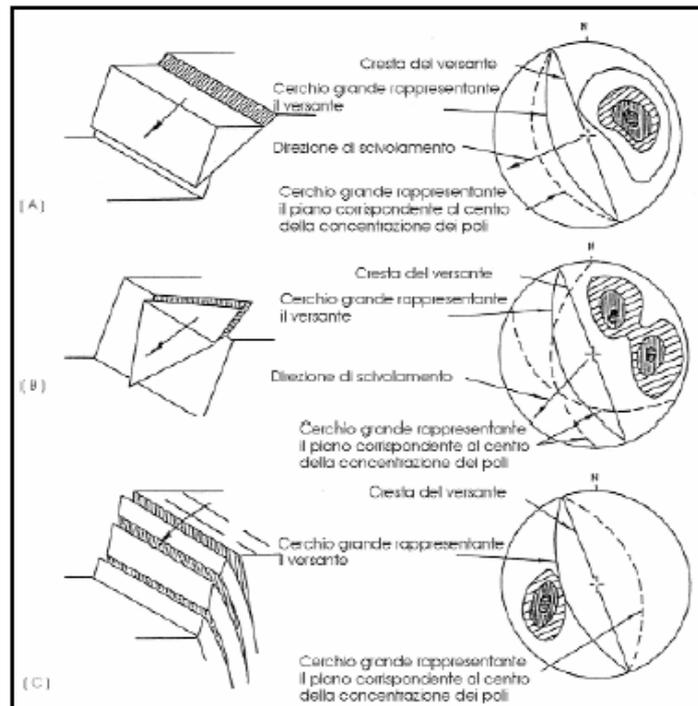


Figura 2.18 Meccanismi di instabilità di versanti in roccia e loro rappresentazione (Hoek & Bray, 1981).

Nello scivolamento planare (Fig. 2.18-A) i movimenti avvengono lungo una singola superficie che approssima un piano. Discontinuità addizionali possono definire l'estensione laterale della frattura planare, ma sono da considerarsi superfici di rilascio, che non contribuiscono alla stabilità della massa in rottura. Le quattro condizioni strutturali necessarie per questo meccanismo possono essere così sintetizzate:

1. la direzione d'immersione della discontinuità planare deve essere compresa in un arco di 20° rispetto alla direzione d'immersione del versante;
2. l'inclinazione della discontinuità planare deve essere minore di quella del versante e non deve presentare ostacoli al libero movimento dei blocchi;

3. l'inclinazione della discontinuità planare deve essere maggiore dell'angolo di attrito della superficie;
4. l'estensione laterale della potenziale massa in rottura deve essere definita o da superfici laterali di rilascio che non contribuiscono alla stabilità della massa o dalla presenza di un versante di forma convessa intersecato dalla discontinuità planare.

Lo scivolamento di cunei (Fig. 2.18-B) è caratterizzato da masse rocciose che scivolano lungo due discontinuità intersecanti, entrambe immergenti fuori dal versante ad un angolo obliquo rispetto allo stesso. Le condizioni strutturali necessarie per lo scivolamento di cunei sono le seguenti:

1. la linea d'intersezione deve approssimare la direzione d'immersione del versante;
2. l'inclinazione della linea d'intersezione deve essere minore dell'inclinazione del versante;
3. l'inclinazione della linea d'intersezione deve essere maggiore dell'angolo di attrito della superficie.

Il ribaltamento (Fig. 2.18-C) avviene in masse rocciose suddivise da un *set* di fratture approssimativamente parallele al versante e che immergono fortemente inclinate nel versante stesso. In questo meccanismo i blocchi o le colonne ruotano essenzialmente attorno ad un punto fisso mentre una certa quantità di scivolamento avviene tra gli stessi blocchi o colonne. Affinché il movimento si inneschi, la proiezione verticale del centro di gravità del blocco o della colonna deve cadere al di fuori della sua base. Le condizioni cinematiche necessarie per il ribaltamento sono:

1. la direzione d'immersione dei blocchi o colonne deve essere approssimativamente parallela a quella del versante (un *range* di $\pm 20^\circ$ sembra appropriato);
2. i blocchi e le colonne, dati dall'intersezione di due famiglie di discontinuità, devono immergere nel versante;
3. presenza di un *set* di superfici di discontinuità che formino la base dei blocchi potenzialmente ribaltabili.

Si può inoltre distinguere ribaltamento puro e ribaltamento con scivolamento.

La discriminante tra le due tipologie è data dalla presenza, alla base dei blocchi, di piani con inclinazione minore o maggiore dell'angolo di attrito: quando si realizza la seconda condizione si associa al ribaltamento una componente di scivolamento.

Le condizioni necessarie elencate per i tre meccanismi sono essenzialmente geometriche.

In realtà, un'analisi completa dei possibili cinematismi innescabili su un fronte roccioso, dovrebbe prevedere l'analisi di parametri dinamici come la pressione dei fluidi e fattori come l'assetto idrogeologico, che giocano un ruolo importante nella predisposizione al movimento e nell'innescamento dello stesso. Tuttavia, l'analisi meccanica delle condizioni di stabilità dei pendii rocciosi presenta spesso notevoli limitazioni, connesse soprattutto al grado di incertezza con cui possono essere determinati alcuni parametri fondamentali, quali la resistenza al taglio e, soprattutto, le pressioni dell'acqua all'interno delle discontinuità. Per tale motivo è spesso più efficace esprimere il grado di sicurezza dei pendii mediante analisi basate su criteri cinematici, piuttosto che in base ad analisi meccaniche rigorose in termini di fattore di sicurezza (Francioso & Schiattarella, 2002).

La valutazione dei cinematismi potenzialmente innescabili sui fronti rocciosi nelle aree di studio è stata fatta con l'uso del *software* RSLOPE (Leung, 1991).

RSLOPE è un programma in linguaggio DOS, di facile applicazione. I dati di *input* richiesti dal programma sono:

- giacitura del fronte;
- giacitura dei principali sistemi di discontinuità;
- angolo di attrito.

Come *output* il *software* distingue le direzioni di scivolamento di rotture planari o a cuneo, potenzialmente innescabili sui fronti in studio.

2.2.5 SISTEMI INFORMATIVI GEOGRAFICI

2.2.5.1 COS'È UN G.I.S.

Intorno alla metà degli anni '60, inizia a diffondersi sul mercato informatico una categoria di *software* atti alla gestione ed alla manipolazione dei dati geografici, noti come Sistemi Informativi Territoriali (SIT), o, nella terminologia anglosassone, Geographical Information System (GIS).

Quindi, un GIS è un sistema per la gestione, l'analisi e la visualizzazione di informazioni con contenuto geografico/spaziale.

La definizione probabilmente più completa che sia stata fornita di G.I.S. è quella che è stata formulata da P.A. Borrough nel 1986. In base a tale definizione, un G.I.S. è "*un potente insieme di strumenti in grado di acquisire, immagazzinare, recuperare, trasformare, analizzare e riprodurre dati spaziali riferiti al territorio*".

Oltre a tale definizione, ne sono state fornite altre da diversi autori; Aronoff (1989) ha definito i G.I.S. come "*un insieme di procedure, basate sull'utilizzo di strumenti informatici, atte a memorizzare e manipolare dati geografici*", mentre Cowen (1988) ha definito un G.I.S. come "*un sistema per il supporto decisionale su tematiche di natura ambientale che si basa sull'utilizzo di dati spazialmente riferiti*".

Caratteristica fondamentale di un GIS è, quindi, la capacità di georeferenziare i dati, cioè di attribuire ad ogni elemento le sue coordinate spaziali reali. Infatti, le coordinate di un oggetto non sono memorizzate relativamente ad un sistema di riferimento arbitrario (di una mappa), né relativamente al sistema di coordinate della periferica usata, come la tavoletta digitalizzatrice o il video, ma sono memorizzate secondo le coordinate del sistema di riferimento (G-B, UTM, ecc.) in cui realmente è situato l'oggetto. Essendo le configurazioni statiche e isolate parzialmente rappresentative, un sistema informativo territoriale deve essere costituito da elementi interagenti in cui la comprensione della realtà territoriale avviene attraverso approcci dinamici e relazionali. Alle operazioni standard effettuate sui *database* più comuni, quali ricerche ed analisi statistiche, il GIS integra le sue funzionalità quali la memorizzazione e l'immagazzinamento dei dati, la manipolazione e l'analisi degli stessi, la

creazione di rappresentazioni e copie di output (carte e tabelle). Lo strumento informatico, dunque, consente di effettuare analisi spaziali su oggetti del mondo reale attraverso l'esame di un suo modello informatizzato.

Un G.I.S. è particolarmente adatto per condurre sessioni anche molto approfondite di analisi dei dati geografici. Questo genere di sistema consente di gestire ed analizzare ogni genere di relazione spaziale intercorrente fra tutti gli elementi che fanno parte del *database*.

Questa funzionalità, nota come "analisi topologica" dei dati va al di là della mera descrizione della geometria e della localizzazione dei diversi elementi contenuti in una mappa. La topologia è infatti quella disciplina che studia le diverse relazioni spaziali (interconnessione, inclusione, contiguità, ecc.) che intercorrono fra entità geometriche diverse (punti, linee, aree, ecc.) all'interno di un determinato spazio. Mediante un'analisi di tipo topologico è quindi possibile determinare, ad esempio, come gli elementi lineari contenuti in una cartografia siano connessi fra loro ma anche quali aree siano contenute (interamente e/o parzialmente) all'interno di altre aree più ampie, o ancora, quali aree siano confinanti rispetto ad altre, ecc.

E' evidente, peraltro, che per ottenere una risposta corretta è necessario che il sistema G.I.S. in questione disponga di una adeguata base di dati strutturata secondo criteri topologici. Per definire l'organizzazione topologica dei dati, un sistema GIS deve necessariamente fare ricorso ad una particolare struttura del *data base*.

In un sistema G.I.S., tutti gli elementi grafici che fanno parte della cartografia sono riferiti ad un sistema comune di coordinate.

2.2.5.2 COME LAVORA UN G.I.S.

Il GIS memorizza le informazioni in un modello organizzato in più piani informativi (*layers*), ciascuno contenente un singolo tema, e rappresentati sullo schermo geometricamente da punti, linee o aree. Ciò per cui un GIS si distingue è la sua capacità di effettuare analisi spaziali: le relazioni spaziali tra gli attributi della banca dati ed il collegamento di questi con la parte geografica, porta il GIS a rappresentare un modello del mondo reale.

Lo sviluppo delle tecniche GIS ha portato in questi ultimi anni ad una costante crescita delle funzioni di analisi raggruppabili in tre categorie: analisi dei dati spaziali, degli attributi ed integrata.

Un GIS, in definitiva, rende disponibili le seguenti funzionalità di base:

- acquisizione di dati provenienti da fonti e tecniche diversificate;
- strutturazione dei dati acquisiti e memorizzazione dei loro attributi grafici, topologici ed alfanumerici;
- selezione e ricerca spaziale di oggetti mediante interrogazioni sulle loro componenti geometriche e/o alfanumeriche;
- disponibilità di operatori per elaborazioni e analisi spaziali sul database, con la possibilità di generazione di nuove informazioni a partire da quelle memorizzate;
- sovrapposizione automatica di livelli geografici (*map overlay*);
- generazione di aree di rispetto o di influenza (*buffer*);
- analisi delle reti (ricerca del minimo percorso, analisi di connettività);
- generazione di modelli digitali del terreno (*Digital Terrain Model*);
- visualizzazione delle informazioni e produzione di elaborati in uscita.

Per garantire un funzionamento efficiente dei GIS, come anticipato precedentemente, è necessaria una generale standardizzazione dell'organizzazione dei dati ed il riferimento ad uno stesso sistema di riferimento cartografico. Inoltre il linguaggio utilizzato per la descrizione degli attributi delle entità deve essere basato su termini e codici convenzionalmente adottati, in modo che non sia necessario, nell'interscambio di database prodotti da enti diversi, ricorrere ad una ricodifica dei termini e dei simboli utilizzati.

2.2.5.3 I G.I.S. A TRE DIMENSIONI

L'introduzione di modelli tridimensionali aumenta notevolmente le possibilità di analisi e il numero di indicazioni che si possono cogliere da ogni carta, andando ad incidere anche sull'aspetto divulgativo dei risultati ottenuti poiché le rappresentazioni tridimensionali permettono una maggiore leggibilità degli elementi propri del paesaggio. Il termine tridimensionale è di fatto assegnato a quei modelli in cui un attributo varia con continuità in un riferimento spaziale 3D. Per rappresentare la variazione continua di un attributo si utilizzano modelli ottenuti da funzioni matematiche di interpolazione: tale procedura consente di prevedere il valore di attributi di punti in regioni non campionate a partire dalle misurazioni effettuate in singoli punti con la stessa area o estensione. Il concetto di interpolazione si basa, quindi, sul fatto che i valori di punti molto vicini nello spazio sono probabilmente molto più simili rispetto a quelli di punti più lontani. Nei GIS si utilizzano esclusivamente superfici continue: un edificio o una faglia verticale, o qualunque tipologia che presenti per uno stesso punto (x, y) più valori di z, non possono essere rappresentati se non utilizzando un leggero *offset*, per l'impossibilità che ha un GIS nel gestire per uno stesso punto più coordinate spaziali.

I DTM (*Digital Terrain Model*), utilizzati per rappresentare la morfologia del territorio, sono solitamente realizzati in forma *raster* o a matrice delle altezze (*altitude matrix*) e prodotti, quindi, a partire da dati spaziali regolarmente o meno. Ogni elemento della griglia viene memorizzato con la rispettiva quota (*GRID*, matrice delle altezze), oppure con quota puntuale al centro della cella e con gli altri punti all'interno di essa che vengono interpolati.

Il DEM (*Digital Elevation Model*) ha le stesse caratteristiche, ma ha un significato più generico rispetto al precedente, in quanto può rappresentare superfici tridimensionali di varia natura.

La fortuna del modello DTM è dovuta alla facilità con cui le matrici possono essere manipolate con gli elaboratori elettronici e alla struttura topologica di facile comprensione.

Inoltre, essi offrono la possibilità di confrontare e valutare modelli digitali della stessa porzione di territorio, sovrapponendo i grigliati definiti da uguali dimensioni e medesima origine planimetrica.

In generale la struttura a griglia può dunque risultare troppo grossolana per descrivere efficacemente tutte le forme particolari del terreno, come la sommità dei rilievi, creste, linee di frattura, ecc.

Nonostante i citati problemi, il DTM basato sul modello a matrice rimane quello di più semplice realizzazione. Partendo così da una base di dati disposti in maniera irregolare sul terreno è possibile sovrapporre a tali punti una griglia regolare (matrice delle altezze), ottenuta utilizzando opportuni algoritmi matematici di interpolazione (metodo dei pesi; metodo della definizione delle aree di ricerca; metodo del Kriging, v. par. 3.6.1).

Il modello TIN (*Triangulated Irregular Model*) è stato realizzato per ovviare a particolari problemi dati dai GRID; definisce un DTM che va ad adattarsi perfettamente sulla griglia irregolare di punti tridimensionali. I TIN vengono modellati sulla base di una struttura vettoriale e topologica simile a quella usata per le reti di poligoni, e il modello utilizza una copertura continua di triangoli interconnessi. Il modello TIN utilizza, quindi, una distribuzione continua di triangoli ricavati generalmente con l'algoritmo di Delaunay in cui i vertici (nodi) dei triangoli sono costituiti dai punti osservati. Al contrario della matrice delle altezze, il modello TIN è vincolato a passare per tali punti. Esso va dunque a stendersi sui punti isolati e lungo le linee di discontinuità e di profilo, addensandosi in corrispondenza delle zone dove viene incrementata la densità dei punti misurati. Questo tipo di organizzazione li rende particolarmente efficaci quando si deve rappresentare un terreno molto accidentato con bruschi cambi di pendenza.

Molteplici sono le funzioni di analisi nell'ambito dei GIS tridimensionali; molte di esse sono state utilizzate nelle successive fasi di lavoro, per ottenere dati cartografici necessari all'elaborazioni della carta di suscettibilità per frane da crollo nelle aree di studio:

- restituzione di valori z interpolati;
- generazione di isoipse della morfologia, o isoipse del generico fenomeno tridimensionale;
- determinazione di profili topografici e sezioni composte;
- determinazione della linea di massima pendenza: simulazione che parte dall'idea di ricostruire il percorso che avrebbe una sfera se fosse lasciata rotolare a valle da un certo punto;

- analisi delle ombre: permette di determinare l'illuminazione ipotetica di una superficie in base all'altezza del sole sull'orizzonte e consente di determinare durata ed intensità dell'insolazione in una certa area;
- generazione di livelli raster o vettoriali delle pendenze e delle esposizioni;
- analisi di volume;
- analisi della morfologia;

(Giardino et al., 2004; Jaboyedoff et al., 2005).

2.2.6 SOFTWARE PER LA PREVISIONE DEL MOTO DI CADUTA DEI BLOCCHI

Lo studio della fase evolutiva del moto di crollo dei blocchi instabili è stato eseguito attraverso analisi tridimensionali e bidimensionali di caduta - massi.

Le analisi tridimensionali sono state eseguite utilizzando il codice ROTOMAP (Scioldo, 1991) che si basa sulla teoria "*lumped mass*" (v. paragrafo 3.6), in cui i blocchi sono schematizzati come punti materiali di massa conosciuta ed i loro percorsi di caduta sono calcolati lungo una maglia numerica tridimensionale rappresentante il versante.

La valutazione dei parametri di *input* previsti dal programma (coefficienti di restituzione normale e tangenziale, coefficiente di attrito alla roto-traslazione e angolo limite che segna il passaggio tra il moto a rimbalzi e quello di rotazione superficiale) è stata effettuata attraverso un processo di analisi a ritroso, simulando i percorsi di blocchi già distaccatisi dalla parete e presenti al piede del versante.

Nella fase preliminare di taratura del modello, per definire più adeguatamente i valori da assegnare ai parametri fisici e geomeccanici che governano il moto di caduta dei blocchi in frana, le sezioni corrispondenti ai percorsi di crollo la cui dinamica evolutiva era già nota sono state analizzate più dettagliatamente, attraverso analisi bidimensionali eseguite utilizzando il codice di calcolo CRSP (Pfeiffer & Bowen, 1989 a,b).

2.2.6.1 ROTOMAP

2.2.6.1.1 Introduzione al modello di calcolo

ROTOMAP è un programma nato per l'analisi dei pendii in cui possono verificarsi problemi di distacco in quota e successivo rotolamento a valle di blocchi di roccia, nonché per la progettazione delle opere di protezione.

La soluzione adottata dal programma per lo studio di un problema così complesso consiste nell'uso di un approccio di tipo statistico che consente di determinare le aree di probabilità di arresto dei blocchi e la distribuzione delle energie cinetiche.

Particolare importanza riveste la fase di ricostruzione del modello numerico del pendio, che potrà essere calcolato a partire da una distribuzione arbitraria di punti (terne X,Y,Z) trasformate dal programma in una griglia regolare.

La ricostruzione della topografia dell'area di studio avviene attraverso due fasi di lavoro: creazione di una griglia regolare a partire da una serie di punti sparsi; ricostruzione delle curve a partire dalla griglia regolare.

La griglia generata è a maglie quadrate, l'area di ognuna delle maglie del reticolo rappresenta una zona ove sono costanti l'inclinazione ed i parametri fisici utilizzati dal modello. Per tale motivo la dimensione delle maglie deve risultare grande rispetto alla dimensione media dei blocchi, ma piccola rispetto all'estensione dell'area in esame. Nel caso in esame è stata scelta un'area di 5 m², che soddisfa entrambe le condizioni citate, considerate le dimensioni dei blocchi potenzialmente instabili.

I metodi di calcolo proposti dal programma per la costruzione della griglia regolare sono:

- la Media Pesata
- il *Kriging*
- il Metodo della Superficie Polinomiale Limite

Nel caso in esame dopo aver ripetuto il calcolo utilizzando i diversi metodi, si è osservato che l'uso del *Kriging* fornisce la riproduzione cartografica più vicina alle carte topografiche note per l'area in esame. Per tale motivo si è utilizzato questo metodo per la ricostruzione della topografia del sito d'interesse.

I passaggi successivi, che precedono l'elaborazione dei percorsi di caduta, sono: l'assegnazione dei parametri fisici richiesti dal programma, dei quali si dirà nel prossimo paragrafo, e l'assegnazione dei punti di distacco da cui far partire le traiettorie.

Una volta terminato il calcolo dei percorsi dei blocchi, possono essere calcolate: le curve di isofrequenza dei punti di arrivo; le curve isoenergetiche, ricavate dall'elaborazione dei livelli di energia specifica media e massima; le altezze massime dei rimbalzi.

Infine, inserendo reti o valli paramassi, possono essere effettuate analisi dedicate alla definizione dell'intervento di protezione al fine di determinare quello che offre il miglior rapporto tra la protezione offerta ed il costo dell'intervento stesso.

2.2.6.1.2. Funzionamento del programma

Il tipo di problema in oggetto è evidentemente molto complesso in quanto il comportamento reale dei blocchi nel corso del rotolamento dipende da una infinità di parametri di tipo sia geometrico che fisico. Le leggi che regolano il rapporto tra i parametri geomorfologici ed i percorsi dei blocchi non sono lineari ma caotiche, nel senso che non esiste proporzionalità tra le variazioni dei dati di ingresso e le variazioni nei percorsi che ne derivano, in quanto variazioni anche molto piccole nelle condizioni iniziali provocano, di norma, grandi (e quindi imprevedibili) variazioni nelle condizioni finali.

Ne deriva quindi che l'unica soluzione possibile consista nell'utilizzo di un approccio di tipo statistico. In tal modo non sono determinati i punti di arrivo dei blocchi ma le aree di probabilità in cui i blocchi si arrestano.

I parametri fisici utilizzati dal modello sono i coefficienti di restituzione normale e tangenziale, il coefficiente di attrito al roto-scivolamento e l'angolo limite. I coefficienti di restituzione sono definiti dai rapporti tra energie post e pre-impatto; il coefficiente d'attrito di roto-scivolamento è riferito ad un blocco che rotola perdendo temporaneamente contatto con il pendio; l'angolo limite definisce il passaggio dalle condizioni di moto aereo a quelle di roto-scivolamento.

Il problema della caduta di blocchi è affrontato con un approccio statistico. E' necessario avere un approccio di questo tipo al problema essendo i percorsi di caduta dei blocchi fenomeni non convergenti, ossia soggetti ad un'elevata variabilità in confronto alle condizioni al contorno. Per tale motivo non è pensabile poter effettuare una o poche simulazioni per la corretta taratura del modello, né tantomeno poter prevedere percorso e punto di arresto di un masso reale. Quindi il programma valuta il comportamento medio, determinato attraverso la simulazione di un grande numero di scendimenti, ciascuno dei quali possa fornire l'informazione relativa ad un percorso medio e più probabile tra tutti quelli fisicamente ammissibili, rinunciando ad effettuare previsioni di tipo deterministico.

ROTOMAP, come già anticipato, è un modello del tipo *lumped mass*, ossia considera il generico blocco come un semplice punto di massa; questa scelta è spiegata come segue dai produttori del programma:

“può apparire una scelta semplificativa, ma comporta il vantaggio di poter eseguire un numero di simulazioni nettamente superiore rispetto al caso di considerare blocchi di forma ellissoidale, e si è ritenuto fondamentale, dal punto di vista dell'approccio statistico al problema, dare la massima importanza al numero di simulazioni eseguibili piuttosto che all'introduzione di una variabile giudicata di scarsa rilevanza statistica.” (Scioldo, 2000).

2.2.6.2 COLORADO ROCKFALL SIMULATION PROGRAM (CRSP)

2.2.6.2.1 Introduzione al modello di calcolo

Il programma CRSP (*Colorado Rockfall Simulation Program*) messo a punto da Pfeiffer e Bowen nel 1989, è un modello numerico di tipo stocastico che simula il comportamento delle frane in roccia. E' stato elaborato con lo scopo di modellare il moto di caduta di blocchi aventi la forma di sfere, cilindri o dischi, con sezione circolare nel piano verticale del movimento. E' stato utilizzato allo scopo di analizzare le traiettorie di caduta dei massi ed è in grado di fornire analisi statistiche della velocità, dell'energia cinetica e dell'altezza dei rimbalzi in diversi punti della scarpata.

Per descrivere il movimento del masso lungo un versante, il modello applica l'equazione del moto parabolico di un corpo ed il principio di conservazione dell'energia totale.

Sono utilizzate funzioni derivate empiricamente relative alla velocità, all'attrito ed alle proprietà del materiale costituente il versante per analizzare l'interazione dinamica fra il masso ed il pendio.

I parametri fisici richiesti dal programma per modellare il fenomeno di impatto sono: coefficienti di restituzione normale e tangenziale al pendio, rugosità del versante e dimensione dei blocchi.

2.2.6.2.2 Funzionamento del programma

Le ipotesi alla base dell'algoritmo di calcolo sono:

- tutti i calcoli vengono sviluppati in forma bidimensionale;
- il programma è in grado di tenere conto della dimensione e della forma del masso: quest'ultima può essere impostata come sferica, cilindrica o discoidale;
- il versante oggetto di analisi è simulato mediante la sua scomposizione in segmenti rettilinei (celle) con propria lunghezza ed inclinazione e ad ogni cella sono assegnate, in funzione della morfologia del terreno formante la cella stessa, le proprietà che influenzano la dinamica del masso che rimbalza sul versante: il coefficiente normale di restituzione (R_n), il quale misura il grado di elasticità in una collisione, in direzione normale alla cella; il coefficiente tangenziale di restituzione (R_t), il quale misura la resistenza per attrito al movimento, in direzione parallela al versante;
- assume che il masso non si frantumi all'impatto durante la caduta, mantenendo quindi costanti forma e dimensione, che influenzano in modo sostanziale la ripartizione dell'energia di traslazione e di rotazione attraverso il momento d'inerzia, e simulando così il caso peggiore;
- la variazione statistica osservata nella realtà delle cadute massi aventi origine da una stessa fonte è configurata variando casualmente l'angolo a cui avviene l'impatto tra un masso ed il pendio, entro limiti stabiliti dalla dimensione del masso e da un coefficiente di rugosità proprio della cella, funzione anch'esso della morfologia, che simula l'interazione delle irregolarità della superficie del terreno con il masso; la tipologia del rimbalzo è sostanzialmente determinata proprio da tale angolo di impatto (Wu, 1984).

La simulazione della caduta massi inizia entro una zona verticale, o zona di alimentazione, che rappresenta il punto, o i punti, di partenza del masso; è necessario inoltre assegnare le componenti iniziali di velocità orizzontale e verticale.

Il blocco è soggetto al movimento di caduta libera finché non collide con la superficie del pendio, cioè finché la sua traiettoria non interseca la poligonale che descrive il profilo del pendio.

Ad ogni punto di intersezione, nota la velocità pre-impatto, l'angolo α che la traiettoria forma con il pendio e la velocità di rotazione, sono calcolate la velocità post-impatto, orizzontale e verticale, e la nuova velocità di rotazione.

Al punto d'impatto, l'angolo di inclinazione del pendio ϕ è fatto variare con tecnica *random* entro un campo di valori compresi tra 0 e θ_{\max} .

Tale angolo massimo è calcolato in funzione della rugosità della superficie (definita come la variazione perpendicolare del pendio entro una distanza del pendio uguale al raggio del masso) e della dimensione del masso utilizzando la seguente equazione:

$$\theta_{\max} = \tan^{-1}(S/R) \quad [2.1]$$

dove:

S= rugosità della superficie

R= raggio del blocco.

L'angolo di impatto α è utilizzato per scomporre la velocità d'ingresso (V_1) in componenti di velocità tangenziale ($V_{t1} = V_1 \cos \alpha$) e normale ($V_{n1} = V_1 \sin \alpha$) rispetto alla superficie del pendio.

Il nuovo valore di velocità tangenziale in ogni punto di intersezione tra percorso del masso e pendio è calcolato utilizzando il teorema di conservazione dell'energia:

$$\left(\frac{1}{2} I \omega_1^2 + \frac{1}{2} M V_{t1}^2\right) f(F) S F = \frac{1}{2} I \omega_2^2 + \frac{1}{2} M V_{t2}^2 \quad [2.2]$$

dove:

M = massa del masso

I = momento d'inerzia del masso

I = $2MR^2/5$ (masso sferico)

I = $MR^2/2$ (masso discoidale)

I = $MR^2/4 + ML/12$ (masso cilindrico; L = lunghezza)

ω = velocità iniziale di rotazione

ω_2 = velocità finale di rotazione

V_{t1} = velocità tangenziale iniziale

V_{t2} = velocità tangenziale finale

$f(F)$ = Funzione d'attrito = $R_t + [(1-R_t)/((V_{t1} - \omega_1 R)^2/20) + 1.2]$;

SF = Fattore di scala = $R_t / [V_{n1} / (250R_n)]^2 + 1$.

In qualsiasi collisione non perfettamente elastica, un'aliquota dell'energia cinetica è perduta. All'impatto fra un masso e il pendio, la componente di energia cinetica parallela rispetto al pendio e l'energia di rotazione sono attenuate dall'attrito e da collisioni con elementi perpendicolari al pendio.

L'attrito è una funzione del materiale costituente il versante, determinata sia dal coefficiente tangenziale sia dall'eventualità che il masso stia inizialmente rotolando o scivolando lungo la superficie.

La velocità normale al pendio riveste anch'essa un ruolo fondamentale sulla perdita di energia cinetica tangenziale al pendio. Un aumento della velocità normale rispetto alla superficie dà come risultato una forza normale maggiore durante l'impatto.

Il fattore di scala: permette una correzione per le aumentate resistenze di attrito dovute ad un aumento della forza normale.

L'equazione su riportata può essere risolta al fine di ricavare nuove velocità tangenziali e di rotazione, imponendo la seguente relazione tra velocità di rotazione e velocità tangenziale:

$$V_{t2} = \omega_2 R \quad [2.3]$$

Questa equazione descrive la situazione in cui il masso rotola, anziché scivolare, lungo la superficie durante l'impatto.

I termini $f(F)$ e SF sono ricavabili attraverso espressioni empiriche che vengono utilizzate per valutare l'energia cinetica dissipata nelle collisioni tra blocco e pendio a causa dell'attrito e dell'urto. L'attrito riguarda principalmente la dissipazione dell'energia prodotta dalla velocità tangenziale, l'urto quella prodotta dalla velocità normale al pendio.

Attraverso passaggi di calcolo si ottiene l'espressione della velocità tangenziale in uscita:

$$V_{t2} = \sqrt{[R^2 (I\omega_1^2 + MV_{t1}^2)f(F)SF]/(I + MR^2)} \quad [2.4]$$

mentre la nuova velocità normale è data dalla:

$$V_{n2} = V_{n1} R_n / [1 + (V_{n1}/30)^2] \quad [2.5]$$

Questa equazione utilizza il coefficiente di restituzione (R_n) ed un fattore di scala funzione della velocità $[1/(1+V_{n1}/30)]$ per determinare la nuova velocità normale (V_{n1}). Tale fattore di scala impone una correzione per la diminuzione del coefficiente normale di restituzione man mano che la velocità di impatto aumenta.

E' stato verificato anche sperimentalmente che si ha una transizione da un rimbalzo più elastico a basse velocità verso un rimbalzo molto meno elastico, causato dall'accresciuta frantumazione del masso e dalla formazione di impronte sul pendio, a velocità di impatto più elevate (Habib, 1977).

Dopo ogni rimbalzo il programma esegue un'iterazione per trovare il lasso di tempo trascorso fino al rimbalzo successivo. Noto il tempo, è possibile calcolare la posizione del punto di impatto successivo: se la distanza percorsa dal masso tra un rimbalzo e il successivo è inferiore al suo raggio, si considera che il masso stia rotolando e gli viene data una nuova posizione x, y uguale ad una distanza di un raggio rispetto alla sua posizione precedente.

Questo procedimento consente di configurare un masso che rotola sotto forma di una serie di brevi rimbalzi, in maniera simile al modo in cui un masso irregolare rotola su di una superficie irregolare.

CAPITOLO 3. LE APPLICAZIONI NELLE AREE CAMPIONE

3.1 MONTE SARETTO, SARNO

3.1.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO – GEOMORFOLOGICO



Figura 3.1 Monte Saretto – ubicazione dell'area di studio.

Il rilievo di Monte Saretto è localizzato lungo il margine meridionale del massiccio calcareo di M. Pizzo D'Alvano che costituisce una delle strutture carbonatiche che delimitano il bordo nord-orientale del *graben* campano. In quest'area la tettonica estensionale plio-quadernaria ha smembrato l'originaria piattaforma ribassandola a gradinata verso il margine tirrenico e creando una serie di strutture monocliniche prevalentemente allungate lungo faglie a direzione appenninica. Anche Monte Saretto è una struttura monoclinica, con giaciture degli strati inclinati mediamente di 15-25° verso nord.

L'ossatura del M. Saretto è costituita da circa 450 m di calcari di piattaforma carbonatica del Cretacico inferiore riferibili all'Unità tettonica dei Monti Picentini-Taburno (Bonardi *et alii*, 1988) che risultano ricoperti da depositi detritici e piroclastici. Questi ultimi si sono depositati durante il Pleistocene superiore-Olocene per effetto delle diverse eruzioni vulcaniche del vicino (5 km) distretto vulcanico del Somma-Vesuvio (Artuso & Monteverde, 2004).

Per quanto riguarda l'assetto tettonico generale, le numerose misurazioni di giacitura di strato e di liscioni di faglia, nonché un attento studio delle fotografie aeree, hanno permesso di evidenziare le principali dislocazioni tettoniche che hanno interessato Monte Saretto.

Le più importanti, sepolte, delimitano la base del versante meridionale e sono allungate in direzione appenninica (N150°); sono presenti inoltre diversi sistemi trasversali (antiappenninici) che disarticolano il rilievo, dislocandolo a quote diverse comprese tra i 50 m ed i 450 m m.s.lm. In alcuni casi, sia lungo le direttrici appenniniche che quelle trasversali antiappenniniche, sono stati rilevati liscioni di faglia con indizi di cinematisma di tipo trascorrente.

Nell'insieme, comunque, i calcari di M. Saretto si presentano, anche se abbastanza fratturati, ben stratificati e decisamente carsificati.

Lungo la fascia pedemontana, nella zona di raccordo con il centro abitato di Sarno, i calcari sono ricoperti da una coltre di depositi piroclastici, in parte rimaneggiati, e da depositi detritici di versante. Questi terreni localmente possono superare i 5 m di spessore e, nella zona di piana, sono ricoperti da potenti successioni clastiche ed alluvionali di riempimento della piana del F. Sarno.

I terreni piroclastici che rivestono in maniera quasi continua il versante meridionale del Monte Saretto derivano dalle varie eruzioni pliniane e subpliniane del Somma-Vesuvio che si sono succedute nel corso degli ultimi 20.000 anni. Tali eruzioni, note in letteratura come "eruzione di Sarno" (22.000÷17.000 anni dall'attuale), "Ottaviano" (≈ 8.000 anni dall'attuale), "Avellino" (≈3.800 anni dall'attuale), "Pollena" (472 a.D.) ed "eruzione del 1631", sono state riconosciute e rinvenute sui versanti e la fascia di piedimonte dei Monti di Sarno (Bonardi et al. 1988).

Al fine di pervenire ad una caratterizzazione geologica di maggiore dettaglio, ma anche per determinare le grandezze fisico-meccaniche necessarie per l'implementazione della metodologia proposta e per la redazione della "Carta degli spessori della coltre piroclastica", ci si è avvalsi di una serie di indagini geognostiche (pozzetti esplorativi e prove penetrometriche "leggere") e geofisiche (sismica a rifrazione), coordinate da ricercatori del D.I.G..

I pozzetti esplorativi, generalmente spinti fino al substrato carbonatico, hanno interessato la

porzione di versante ad ovest del “Castello” (pozzetti T16 e T17), la concavità morfologica (Z.O.B.) di “Madonna del Carmine” e la porzione di versante limitrofo (T1, T2, T3, T4, T5, T18 e T19), la zona prossima all’area di testata del “Bacino Autuori” (T6÷T11), ed infine il *talus* in destra del predetto bacino (T12÷T15).

Dall’analisi dei dati stratigrafici si evince che:

- i depositi piroclastici si rinvennero in livelli rimaneggiati (*colluvium*) più o meno humificati;
- lo spessore massimo dei depositi piroclastici investigati è di circa 2.6 m ed i valori maggiori sono caratteristici dell’area di Z.O.B. (T1÷T4) e della zona prossima all’area di testata del “Bacino Autuori” (T6, T8, e T11);
- nella porzione medio-bassa del versante (T14 e T15) i livelli colluviali ricoprono depositi pseudo-cementati a matrice piroclastica (falda detritica) poggianti direttamente sul substrato carbonatico.

Gli stendimenti geofisici sono stati effettuati secondo allineamenti da 60 metri lineari e sviluppati longitudinalmente al versante. Anche gli stendimenti hanno interessato le aree prima citate ed in particolare l’area di Z.O.B. di “Madonna del Carmine” e la porzione di pendio limitrofo (SS1 ÷ SS7), il *talus* in destra del “Bacino Autuori” (SS8 ÷ SS11) e la zona prossima all’area di testata del predetto bacino (SS12 e SS13).

Dall’analisi dei dati emerge un modello sismostratigrafico del sottosuolo formato da tre orizzonti rifrattori. Il primo, caratterizzato da velocità V_p variabili da un max di 660 m/s ad un minimo di 375 m/s, può essere associato alla coltre vulcanoclastica di copertura. Il secondo, contraddistinto da una velocità $V_p \cong 1500$ m/s è riferibile alla porzione più alterata e fratturata del substrato carbonatico. Il terzo, con velocità $V_p \geq 2100$ m/s, è associato al substrato carbonatico “integro”.

Le 13 prove penetrometriche sono state concentrate nell’area di Z.O.B. di “Madonna del Carmine” (Pn1÷Pn4) e nella zona prossima all’area di testata del “Bacino Autuori” (Pn5÷Pn13). Tali prove sono state utilizzate per ottenere ulteriori elementi conoscitivi in merito allo spessore della coltre vulcanoclastica, utili al perfezionamento della “Carta degli spessori”. Inoltre, i dati penetrometrici, con l’ausilio di correlazioni empiriche, sono serviti per la stima dei valori dei parametri geotecnici della coltre.

Con riferimento alla campagna di indagini appena descritta è emerso quanto segue:

1. in merito alla coltre piroclastica, i dati emersi dagli scavi, dalle prove penetrometriche e dagli stendimenti sismici possono ritenersi tra loro congruenti, avendo fornito valori di spessore confrontabili. Inoltre, dall'indagine geofisica si evince un modello sismostratigrafico del versante formato da tre strati: coltre, substrato fratturato e/o alterato, substrato "integro".
2. sul versante meridionale del M.te Saretto la coltre piroclastica raggiunge gli spessori massimi nell'area di Z.O.B. di "Madonna del Carmine" (circa 4 m, Pn4) e nella zona prossima all'area di testata del "Bacino Autuori" (circa 3.7 m, Pn6). I depositi di copertura sono costituiti quasi esclusivamente da piroclastiti rimaneggiate (*colluvium*) ed humificate e da rare lenti di pomice in giacitura primaria;
3. nella zona di raccordo tra il versante e la piana antistante, si rinvencono depositi pseudo-cementati a matrice piroclastica, formanti lembi dissecati di detrito di versante, ricoperti da *colluvium* recente;
4. tutti i dati ricavati sono stati utilizzati nella definizione della "Carta degli spessori della coltre piroclastica" (Tavola 3.1).

Questa Carta rappresenta un elaborato di base fondamentale per lo studio della franosità dell'area, sia per quanto riguarda i fenomeni di crollo, che per quanto riguarda gli scorrimenti-colate rapide tipici dei depositi piroclastici.

La Carta è stata redatta in primo luogo attraverso l'osservazione di fotografie aeree di estremo dettaglio (scala 1:5000 anno 2003, fornite dal Commissariato di Governo per l'Emergenza Idrogeologica della Regione Campania). Questa prima analisi ha a sua volta consentito di programmare le indagini in sito precedentemente descritte, utili per la taratura delle successive osservazioni condotte in campagna. Sono stati quindi effettuati rilievi di campo, volti al riconoscimento degli spessori della coltre da affioramenti e/o lungo "tagli". I dati così ricavati sono stati integrati con quelli scaturiti dalla citata campagna di indagini.

Per quelle zone ove non è stato possibile eseguire indagini e/o effettuare osservazioni dirette, si è proceduto mediante correlazioni per similitudini morfologiche con siti dove lo spessore era noto.

Sono state individuate cinque classi di spessore:

- Classe **A** Substrato carbonatico affiorante
- Classe **B** Spessore 0,0 m ÷ 0,5 m
- Classe **C** Spessore 0,5 m ÷ 1,0 m
- Classe **D** Spessore 1,0 m ÷ 2,0 m
- Classe **E** Spessore 2,0 m ÷ 5,0 m

La Classe **A** caratterizza le cornici morfologiche, le aree di versante completamente denudate ed i tratti delle aste drenanti messi a nudo dall'erosione. Tale Classe rappresenta circa il 19 % del versante meridionale del M.te Saretto.

La Classe **B** rappresenta quelle aree di versante in cui le coperture sono discontinue e gli spessori assumono valori modesti, fino ad un massimo di 0,5 m. I terreni di copertura sono generalmente alterati e pedogenizzati. Questa classe è dominante rispetto alle altre: infatti è presente per circa il 52 % del versante in oggetto.

La Classe **C** si individua sia al contorno dei *talus* sia nelle aree medio-apicali del versante e ricopre circa il 15 % del rilievo. I terreni sono costituiti generalmente da piroclastiti sciolte rimaneggiate ed humificate.

La Classe **D** caratterizza, generalmente, le aree di *talus* ed i settori di versante di interfluvio regolarizzato, ed è inoltre presente nella parte centrale dello Z.O.B. in corrispondenza dell'ex ospedale "Villa dei Pini". I terreni che formano tale Classe sono quasi esclusivamente colluvioni humificate; a luoghi si rinvencono livelletti lenticolari di pomici centimetriche. Tale Classe ricopre il versante per circa il 10 %.

La Classe **E** è quella che ha una minore estensione areale, ricoprendo il versante per circa il 4 %. Caratterizza l'area di Z.O.B. in località "Madonna del Carmine", la porzione sommitale di versante di interfluvio regolarizzato in destra della testata del vallone "Autuori" e la fascia di raccordo tra il versante e l'antistante piana alluvionale. Anche in questa Classe i terreni sono costituiti generalmente da colluvioni più o meno humificate intercalate a livelli di pomici.

Lungo alcuni tagli naturali e nei numerosi pozzetti, sono state riconosciute solo alcune delle principali eruzioni del Somma-Vesuvio ed in particolare, quella di "Sarno", quella di "Pollena" e quella del "1631", che generalmente si alternano in maniera irregolare a livelli rimaneggiati (colluvioni) ed humificati.

In sintesi, quindi, si può affermare che le aree con coperture piroclastiche continue e con spessori significativi sono localizzate in soli 5-6 ambiti dell'intero versante (vedi Tavola 1.2). Le restanti aree presentano spessori molto ridotti (meno di 0,5 m) di piroclastiti e sono poco significative nei riguardi della franosità potenziale.

L'assetto geomorfologico generale è quello tipico di una monoclinale calcarea con il versante meridionale di "faglia" a maggiore pendenza e quello settentrionale di "strato" con acclività più modesta. Lungo il settore meridionale sono presenti numerose scarpate e piccole pareti da imputare a piccoli liscioni di faglia ma soprattutto ad effetti di morfoselezione lungo la successione stratigrafica di piattaforma carbonatica.

Nella Tavola 3.2 "Carta geomorfologica del versante meridionale del Monte Saretto" sono riportati i principali fattori geomorfologici che possono condizionare la stabilità del versante di M. Saretto.

In primo luogo sono stati differenziati i settori sommitali a debole pendenza (paleosuperfici e crinali) e quelli pianeggianti di fondovalle che corrispondono ad aree stabili.

Sul versante sono state indicate tutte le pareti e le scarpate sub-verticali che possono rappresentare zone di possibile distacco di crolli in roccia o di scorrimenti-colate rapide; nella Tavola è stato evidenziato in particolare il settore a monte della Sorgente Mercato Palazzo dove le scarpate e le cornici di morfoselezione sono particolarmente frequenti a varie altezze sul versante e dove si sono più volte manifestati distacchi ("settore di versante poco inciso con frequenti cornici litologiche ed interessato da locali frane da crollo").

Sono stati inoltre cartografati due piccoli bacini di ordine zero (Z.O.B.) e numerosi *hollows* che corrispondono a piccole concavità sul versante colmate da materiali piroclastici in parte rimaneggiati, aventi spessore variabile da 2 a 4 m.

Per quanto riguarda le frane, sono state cartografate alcuni coronamenti di crolli ed in particolare è stata riportata la traiettoria di quello avvenuto nell'aprile 2005; per gli scorrimenti-colate sono state cartografate le impronte delle frane dell'ottobre 2004 e del settembre 2006. In alcuni casi sono state evidenziate tracce di antiche frane di età non accertata.

Nelle zone di raccordo tra versante e fondovalle sono stati indicati alcuni elementi antropici che possono condizionare il percorso e l'arresto di eventuali frane, come alcune brusche

deviazioni del corso d'acqua, cave o alvei con briglie. Lungo i versanti sono stati evidenziati i tagli antropici legati alla presenza di tratturi e di sentieri che possono favorire l'innesco di frane.

Nella Tavola 3.3 è rappresentato l'uso del suolo relativo all'area di studio corrispondente al versante meridionale del Monte Saretto; l'utilità di tale Carta tematica è relativa alla scelta dei coefficienti di restituzione normale e tangenziale da assegnare ai diversi ambiti riconosciuti lungo il versante in studio.

3.2 COLLINA DEI CAMALDOLI, NAPOLI

3.2.1 INQUADRAMENTO GEOLOGICO – GEOMORFOLOGICO

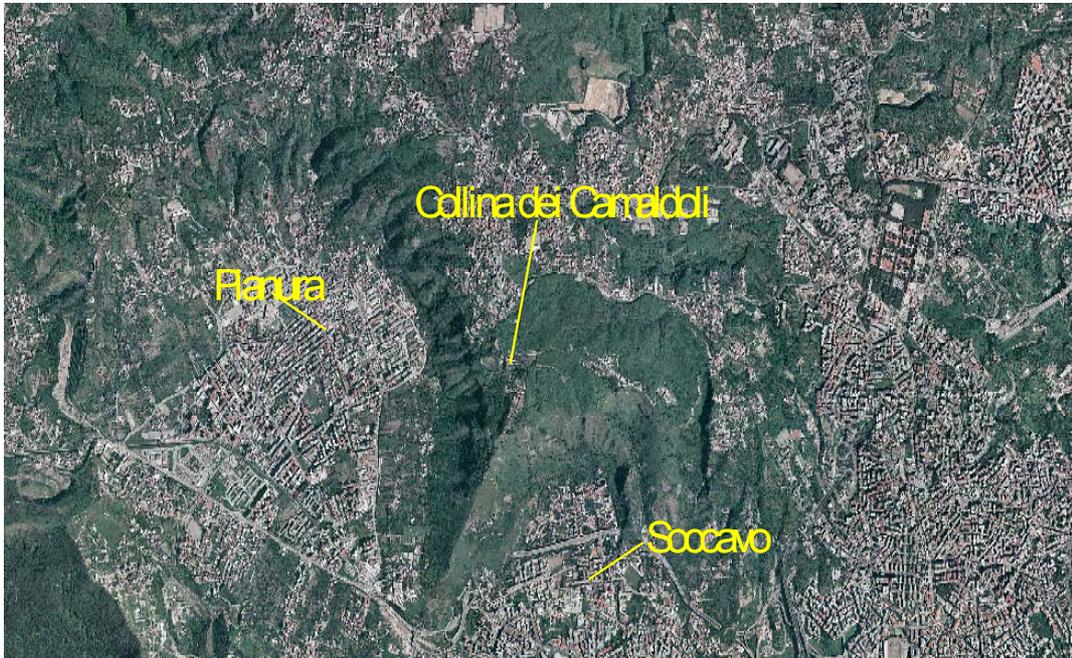


Figura 3.2 Collina dei Camaldoli - ubicazione dell'area di studio.

I Campi Flegrei costituiscono un sistema vulcanico policraterico in stato di *unrest* [Barberi et al., 1989], ubicato nel settore centrale del graben della Piana Campana, la cui attività ha inizio nel Pleistocene; i prodotti affioranti hanno invece un'età più recente di 45000 anni dal presente [Rittman, 1950; Di Girolamo et al., 1984; Beneduce et al., 1988; Di Vito et al., 1999].

L'evento principale dell'attività vulcanica flegrea recente è dato dalla deposizione dei prodotti dell'Ignimbrite Campana. Questa eruzione catastrofica fu seguita dal collasso dell'area e dalla conseguente formazione della caldera flegrea, ampia struttura di sprofondamento, avente un diametro di circa 14 km.

L'attività post-calderica è suddivisa in letteratura in quattro fasi [Rosi & Sbrana, 1987]:

- fase A) attività sottomarina antica, compresa tra 35000 e 10500 anni circa dal presente, che termina con la deposizione dei tufi gialli napoletani;
- fase B) attività prevalentemente subaerea antica, caratterizzata dalla migrazione dell'attività eruttiva verso la parte centrale della caldera, concentrata tra i 10500 e 8000 anni circa dal presente;

- fase C) attività subaerea recente, caratterizzata da un'ulteriore concentrazione dei centri eruttivi in un'area molto ristretta (eruzione di Averno, Cigliano, Solfatara, Astroni, Senga);
- fase D) attività subaerea di età storica (eruzione del M. Nuovo ed evento freatico della Solfatara).

Per effetto del tipo di attività prevalente, i terreni affioranti nell'area flegrea sono costituiti essenzialmente da prodotti piroclastici incoerenti, in *facies* di colata piroclastica, *surge*, caduta e, più raramente, da effusioni laviche; sovente i processi di mineralizzazione hanno conferito ai prodotti incoerenti una consistenza tufacea.

La Collina dei Camaldoli ricade nel settore orientale dell'area vulcanica flegrea, nel territorio dei Comuni di Napoli e Marano. Costituisce uno dei rilievi relitti che bordano la struttura calderica; di conseguenza, è stata interessata solo in maniera marginale dagli eventi descritti nei precedenti punti B e D. È il rilievo più elevato del sistema flegreo, culminando con la quota di 458 m s.l.m..

Essa costituisce un "alto" morfostrutturale delimitato, a Sud e a Ovest, da ripidi versanti connessi ai fenomeni di collasso vulcano-tettonico responsabili della formazione della caldera dell'Ignimbrite Campana (39.000 anni dal presente) e della caldera del Tufo Giallo Napoletano (TGN, 12.000 anni dal presente). Tali versanti bordano un'area sommitale costituita da un pianoro immergente verso i quadranti settentrionali, che si raccorda gradualmente con le aree urbanizzate di Marano e Chiaiano. L'inclinazione di tali versanti, a profilo concavo, è compresa tra poco più di 10° nella parte basale e valori prossimi ai 90° nel tratto apicale. Lungo i versanti incombenti sugli abitati di Pianura e Soccavo risulta ben esposta la serie stratigrafica di seguito sintetizzata, dal basso verso l'alto (Lirer e Munno, 1975; Di Girolamo et al., 1984; Lirer et al., 1987; Civetta et al., 1997; Orsi et al., 1996, 1998; Calcaterra et al., 2007).

- a) *Tufi di Torre Franco* (età: 42.000 anni dal presente) costituiti da fitte alternanze di livelli cineritici biancastri e di banchi di pomice e scorie.
- b) *Formazione del Piperno-Breccia Museo*. (età: 39000 anni dal presente): si rinviene in alcuni affioramenti non continui alla base del versante (es. loc. "Piccola Lourdes", Pignatiello, tra Bellavista e Monopoli, Vallone Verdolino) con spessori di poche decine di metri. Il

Piperno presenta una struttura eutassitica (scorie nere appiattite e talora saldate, di dimensioni da centimetriche a decimetriche ricche in cristalli di sanidino, immerse in una matrice cineritica grigiastra); la Breccia Museo si rinviene con blocchi lavici, scorie e grosse pomice in scarsa matrice sabbiosa, debolmente cementata.

- c) *Tufi Biancastri Stratificati* (età compresa tra 39.000 e 12.000 anni dal presente) costituiti da strati di cineriti ricche in lapilli accrezionari e pomice, ed intercalazioni di livelli pomice, a struttura da pianoparallela a debolmente ondulata; lo spessore massimo è di alcune decine di metri.
- d) *Tufo Giallo Napoletano* (età: 12.000 anni dal presente), costituito da pomice, litici e scorie, di dimensioni centimetriche, di colore giallo-verdastro, immersi in matrice giallastra. La struttura varia da massiva a stratoide, lo spessore è di diverse decine di metri. Il TGN affiora con continuità lungo i ripidi versanti aggettanti su Soccavo e Pianura, mentre nel settore nord-occidentale si rinviene solo lungo il fondo-alveo dei valloni maggiormente incisi.
- e) Al *top* della successione stratigrafica sono presenti i *prodotti piroclastici incoerenti* relativi all'attività flegrea degli ultimi 12.000 anni (eruzioni di: Agnano-M. Spina, Solfatara, Astroni). Lo spessore di questi depositi varia da pochi metri, in corrispondenza delle aree di versante più acclivi, ad alcune decine di metri nell'area sommitale (dove si misurano spessori di circa 30 m in prossimità dell'Eremo) e nel settore nord-occidentale dell'area in oggetto (dove lo spessore supera i 40 m nel Vallone Bietola).
- f) Nelle concavità ed al piede del versante sono presenti depositi fluvio-colluviali, costituiti da piroclastiti rimaneggiate a granulometria prevalentemente fine, con inglobati frammenti e blocchi lapidei. I cumuli hanno notevole spessore e si elevano talora nettamente rispetto al p.c..

Nell'area di piana è presente una potente successione di depositi piroclastici sciolti, di età minore di 12.000 anni dal presente, in giacitura prevalentemente primaria, a tetto della formazione del TGN.

Perforazioni realizzate in passato hanno messo in luce la sequenza vulcanostratigrafica attraversata in situ, costituita da: depositi dei centri eruttivi di Astroni, Solfatara e Agnano-M. Spina e, intercalati ad essi (in particolare nell'ambito dei depositi del vulcano di Astroni e

tra quelli di Solfatara e Agnano M. Spina), esigui livelli di depositi colluviali e di frana connessi all'instabilità post-deposizionale delle coltri piroclastiche (Tavola 3.4 e Tavola 3.5).

3.2.2 FENOMENI FRANOSI DELLA COLLINA DEI CAMALDOLI

La collina dei Camaldoli è frequentemente sede di fenomeni franosi, caratterizzati da differenti tipologie di movimento. Un ruolo decisivo per l'innesco di tali fenomeni è spesso svolto dalle precipitazioni meteoriche. Le frane più frequenti sono date dagli scorrimenti traslativi (circa il 50%). Tali frane interessano prevalentemente i depositi piroclastici incoerenti a tetto del Tufo Giallo Napoletano e hanno mobilizzato volumi modesti (da qualche decina a poche centinaia di m³) con spessori raramente superiori al m. Gli scorrimenti traslativi presentano un rapporto spessore/lunghezza molto basso (D/L pari mediamente a 0.09) e risultano sovente equidimensionali in pianta.

Tra le frane di tipo semplice sono diffuse le colate e i crolli. Le prime sono state rinvenute frequentemente nella formazione dei Tufi Biancastri Stratificati, i secondi laddove le condizioni morfologiche (pareti subverticali) e lo stato di fratturazione risultano predisponenti. Tra le frane complesse un numero elevato è dato dagli scorrimenti-colate, in particolare lungo il versante di Soccavo, dove si sono potuti osservare i fenomeni di maggiore rilievo dell'intero areale flegreo degli ultimi anni (Parise et al., 2004; Calcaterra & Orsi, 2002).

In alcuni casi, dopo una fase iniziale di innesco avvenuta secondo uno scorrimento di tipo traslativo nelle piroclastiti a tetto del TGN o il crollo di massi tufacei, l'impatto sul versante sottostante ha determinato la mobilizzazione della coltre più superficiale delle coperture ed il conseguente incremento del volume mobilizzato.

Numerosi fenomeni, con una forte prevalenza percentuale delle frane da scorrimento, si sono attivati anche nel settore sommitale della collina, lungo i ripidi versanti delle incisioni che solcano il pianoro sommitale - individuatisi a seguito dell'approfondimento dell'area di testata del bacino del Vallone Verdolino - ed in corrispondenza di sbancamenti e tagli stradali.

L'interesse della presente ricerca è rivolto a frane di tipo crollo e ribaltamento, le quali si rinvencono frequentemente laddove le condizioni morfologiche (pareti subverticali) e lo stato di fratturazione risultano predisponenti. In tali tipi di movimento, come noto, il meccanismo di rottura è condizionato dall'interazione tra la geometria del versante e la distribuzione spaziale delle discontinuità. Lungo il versante occidentale della collina dei Camaldoli sono

presenti costoni tufacei subverticali in cui sono visibili discontinuità aperte; tali aree sono caratterizzate da un elevato grado di instabilità. In particolare le aree considerate più pericolose sono quelle corrispondenti alle pareti di tufo che si trovano nei dintorni della chiesa Piccola Lourdes. In tale zona anche recentemente, in seguito ad intensi eventi pluviometrici, si sono osservati fenomeni di crollo: nell'Aprile 2002 e nel Maggio 2005.

3.3 PROGETTO G.I.S. DELLE AREE DI STUDIO

Lo studio di fenomeni di instabilità richiede l'analisi e l'interpretazione di realtà complesse, all'interno delle quali diversi e numerosi elementi interagiscono tra loro.

Per entrambe le aree di studio, vista la notevole quantità di dati acquisiti, si è proceduto alla realizzazione di un *progetto GIS*, grazie al quale è possibile osservare, in qualsiasi momento, l'insieme dei dati noti: cartografici, fotografici o ricavati dai rilievi eseguiti in sito (ad es. indagini geostrutturali e geomeccaniche).

È stato creato un *database* completo, all'interno del quale, oltre a catalogare tutta la cartografia tematica a disposizione, si è proceduto all'elaborazione di ulteriori basi cartografiche necessarie alle successive implementazioni utili per la valutazione della suscettibilità all'innescò, al transito ed all'invasione di frane da crollo.

3.3.1 IL MONTE SARETTO

All'interno del *progetto GIS* strutturato per la gestione dei dati relativi all'area di studio del Monte Saretto si riconoscono due differenti fasi di lavoro: la prima riguarda la raccolta di dati disponibili, la seconda riguarda la predisposizione di ulteriori dati, utili alle successive fasi di elaborazione.

La prima fase di progetto riguarda il reperimento di tutte le informazioni utili al fine della valutazione della suscettibilità di frane da crollo. Tale fase riguarda essenzialmente l'acquisizione di dati bibliografici e d'archivio, nonché il rilievo delle pareti rocciose oggetto dello studio.

Da fonti bibliografiche e d'archivio sono state ricavate le seguenti Carte tematiche:

- Carta topografica dell'area di studio, ricavata dal rilievo fotogrammetrico eseguito in scala 1:200;
- Carta dello spessore delle coperture piroclastiche;
- Carta geomorfologica;
- Carta dei lineamenti tettonici;
- Carta dell'uso del suolo;
- distribuzione cartografica degli elementi esposti a rischio;

- ortofoto dell'area di studio.

Dai rilievi geomeccanici eseguiti in sito è stato possibile elaborare un *database* nel quale sono state riportate le informazioni raccolte nelle diverse stazioni di misura. In particolare in tale *database* sono raccolti i seguenti dati:

- distribuzione cartografica delle stazioni geomeccaniche eseguite e dei blocchi riconosciuti come potenzialmente instabili;
- distribuzione dei parametri geomeccanici misurati in sito;
- volume dei blocchi potenzialmente instabili;
- rilievo fotografico dei blocchi potenzialmente instabili;
- distribuzione cartografica dei blocchi franati.

Durante la fase di elaborazione di dati necessari alle successive fasi dello studio, sono state ricavate le seguenti carte tematiche:

- modello digitale del terreno DTM, ricavato a partire dalla Carta topografica dell'area di studio;
- Carta delle acclività;
- Carta dell'esposizione alla luce del sole delle singole scarpate;
- Carta della rugosità (presenza di asperità) presenti sull'area di studio;
- Carta dei coefficienti di restituzione (relativi alle velocità normale e tangenziale in fase di impatto del blocco in frana sul versante) ricavata dalla sovrapposizione della Carta delle coperture piroclastiche e della Carta dell'uso del suolo.

3.3.2 LA COLLINA DEI CAMALDOLI

Anche per quanto riguarda l'area di studio relativa alla Collina dei Camaldoli, sono state sviluppate due differenti fasi di studio. Durante la prima fase di ricerca si è proceduto alla raccolta di tutti i dati disponibili da fonti bibliografiche e d'archivio; inoltre sono state eseguite diverse indagini in sito, allo scopo di integrare le informazioni già disponibili, di configurare i sistemi di discontinuità presenti e di rilevare la presenza di blocchi franati nel corso di precedenti fenomeni di dissesto.

A partire da fonti bibliografiche e d'archivio sono state rielaborate le seguenti Carte tematiche:

- Carta topografica, opportunamente quotata, in modo da poter procedere ad elaborazione 3D nelle successive fasi di lavoro;
- Carta geologica;
- Carta geomorfologica;
- distribuzione cartografica degli elementi esposti a rischio;
- ortofoto.

A partire dai dati raccolti durante i rilievi in sito è stato possibile elaborare un *database*, all'interno del quale sono state organizzate tutte le informazioni ricavate durante le campagne di indagine:

- distribuzione cartografica delle stazioni geomeccaniche eseguite;
- distribuzione dei parametri geomeccanici misurati in sito;
- volume e forma dei blocchi in parete, potenzialmente instabili;
- distribuzione cartografica di blocchi franati.

Completata la fase di raccolta dei dati di base, si è proceduto all'elaborazione di ulteriori carte tematiche, necessarie per le successive fasi di studio:

- modello digitale del terreno DTM, ricavato a partire dalla Carta topografica.
- Carta delle acclività;
- Carta dell'esposizione alla luce del sole delle singole scarpate;
- Carta della rugosità (presenza di asperità) presenti sull'area di studio;

- Carta dei coefficienti di restituzione (relativi alle velocità normale e tangenziale in fase di impatto del blocco in frana sul versante) ricavata dalla rielaborazione della Carta geologica.

Come sarà meglio esplicitato nei capitoli seguenti, a partire dalla conoscenza di questi parametri di base, si è proceduto all'applicazione della metodologia RES completamente integrata in ambiente GIS, al fine di valutare la suscettibilità all'innescò ed all'invasione di frane da crollo.

3.4 DATI/RISULTATI DEI RILIEVI GEOSTRUTTURALI E GEOMECCANICI

3.4.1 MONTE SARETTO

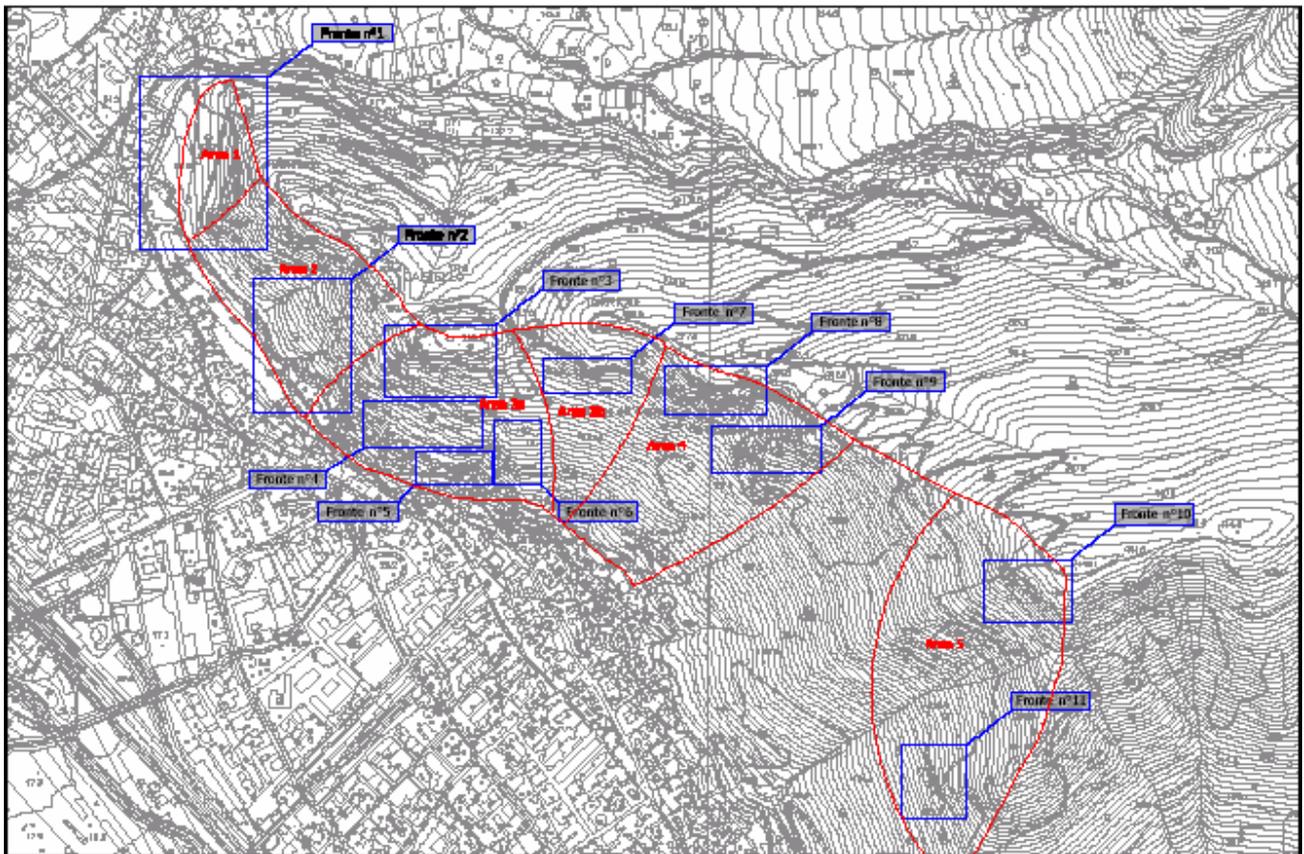


Figura 3.3 Ubicazione delle stazioni di misura

I rilievi sono stati eseguiti da geologi-rocciatori che hanno investigato l'intera dorsale del Monte Saretto nell'ambito di indagine coordinate da ricercatori del D.I.G.. Per i rilievi sono state utilizzate tecniche di progressione in parete con metodologie speleoalpinistiche. La strumentazione utilizzata per eseguire i rilievi geomeccanici in roccia è consistita in:

- attrezzature speleoalpinistiche;
- idonea strumentazione fotografica;
- martello di Schmidt;
- pettine di Barton;
- bussola di Clar.

Per caratterizzare l'ammasso roccioso, sia dal punto di vista strutturale che meccanico, sono state realizzate n° 18 stazioni geomeccaniche di dettaglio, tutte costituite da uno stendimento orizzontale ed uno verticale, e circa 80 discese in parete, sezionando così l'intero versante.

Il versante è stato suddiviso in 11 fronti significativi (Fig. 3.3), su ognuno dei quali è stata eseguita l'elaborazione dei dati geomeccanici con una verifica finale dei meccanismi di rottura ed una classificazione dell'ammasso secondo Bieniawski (1973, 1976, 1979, 1989).

In particolare per ogni singola discontinuità sono state osservati i seguenti parametri, come riportato nel paragrafo 2.2.1:

1. Orientazione, ovvero azimuth di immersione ed inclinazione (la prima rappresenta l'intersezione del piano di discontinuità con il piano orizzontale, la seconda rappresenta l'intersezione del piano di discontinuità con il piano verticale perpendicolare alla direzione della discontinuità);
2. Tipo di discontinuità, ovvero distinzione tra piani di strato, fratture e faglie,
3. Persistenza, ovvero estensione areale percentuale di una discontinuità e sua dimensione, intesa come lunghezza della discontinuità in esame;
4. Apertura: distanza tra i lembi dei blocchi rocciosi che delimitano il piano di discontinuità;
5. Riempimento: tipo di materiale presente all'interno della discontinuità;
6. Presenza di acqua nella discontinuità;
7. Forma della discontinuità;
8. Rugosità, stimata utilizzando il "pettine" di Barton;
9. Compattezza (JCS), espressa come resistenza alla compressione uniassiale della roccia (determinata mediante l'utilizzo del martello di Schmidt).

Inoltre, dalla S.I.A. Geognostica s.r.l., sono state eseguite prove sperimentali di taglio diretto su giunti naturali con scatola di Hoek seguendo le raccomandazioni ISRM (ISRM, 1978).

In particolare su ogni fronte significativo individuato sono state osservate le principali famiglie di discontinuità e le loro caratteristiche. Lo studio è stato mirato principalmente alla definizione della stabilità dei fronti, individuando i vari meccanismi di rottura che si possono innescare.

Per rappresentare le caratteristiche dell'ammasso roccioso, per ogni singolo fronte è stata eseguita un'analisi statistica delle discontinuità utilizzando gli istogrammi e le proiezioni stereografiche equiareali di Schmidt; esse visualizzano, come noto, i piani di discontinuità mediante alcuni parametri quali l'azimut di immersione ed i poli (che rappresentano l'intersezione della perpendicolare al piano con la sfera). Quest'ultima rappresentazione stereografica, essendo equiareale e rispettando, quindi, i rapporti fra le aree proiettate, consente di effettuare un'analisi statistica della distribuzione dei poli, per l'individuazione dei valori di giacitura più rappresentativi delle singole famiglie, corrispondenti con le zone di massimo addensamento.

Per ogni fronte l'analisi statistica delle discontinuità è stata quindi rappresentata attraverso i seguenti diagrammi:

- Diagramma dei poli delle proiezione degli angoli uguali relativi alle discontinuità presenti (emisfero inferiore);
- Proiezione equiareale relative alle discontinuità presenti (emisfero inferiore);
- Ciclografiche dei sistemi principali di discontinuità - proiezione aree uguali - emisfero inferiore.

Un'indicazione della stabilità dei fronti è stata ricavata dall'analisi dei piani rappresentativi dei sistemi principali di discontinuità sotto forma di ciclografiche in proiezioni stereografiche. Infatti, conoscendo l'angolo d'attrito dei giunti (desumibile da prove con scatola di Hoek) sono stati valutati i possibili meccanismi di rottura dell'ammasso analizzando l'intersezione dei piani di discontinuità e la propria giacitura rispetto al fronte in esame. Ciò è stato fatto per ogni fronte nel quale è stato suddiviso l'intero versante; i risultati ottenuti sono stati verificati con l'ausilio dell'applicativo RSLOPE.

FRONTE 1

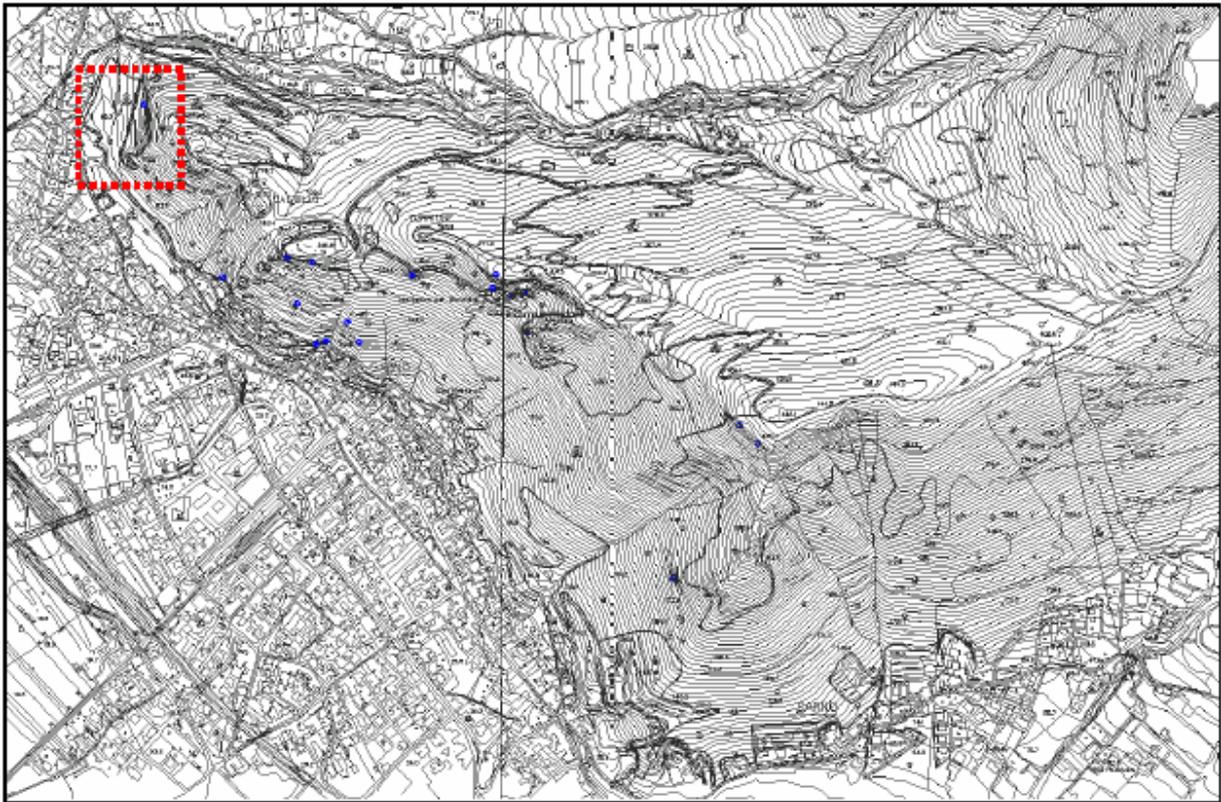


Figura 3.4 - Da: Carta Tecnica Regionale 1:5000 - stralcio in scala adattata con ubicazione del fronte n° 1.

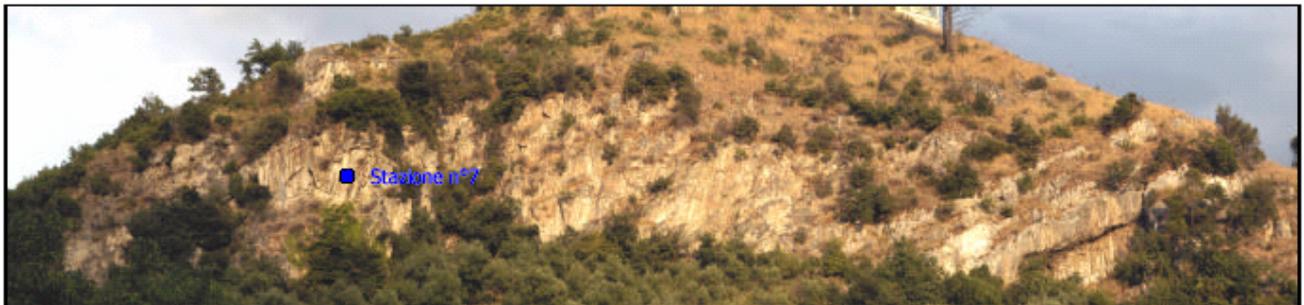
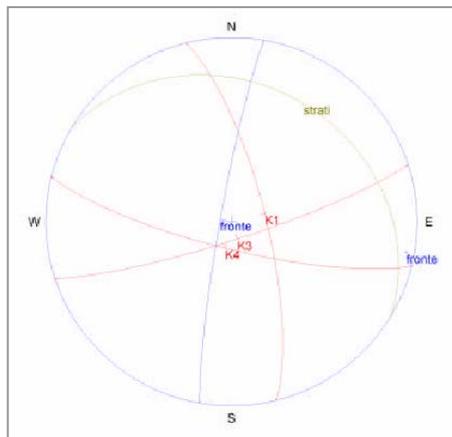


Figura 3.5 Fotografia del fronte n° 1.



Sistema	Azimut d'immersione / inclinazione (piano medio)	Spaziatura Xt	Persistenza	Apertura
K1	76/75	200 - 600 cm - lontane	1-3 m - bassa	0.5-2.5 mm - aperte
K3	162/82	60 - 200 cm - molto distanti	3-10 m - media	0.5-2.5 mm - aperte
K4	194/76	200 - 600 cm - lontane	1-3 m - bassa	2.5- 10 mm - molto aperte
strati	31/26	60 - 200 cm - molto distanti	> 20 m - molto alta	chiusa

Tab. 3.1 - Schema riassuntivo dei dati rilevati ed elaborati nella stazione di misura n° 18.

Fig. 3.6 - Ciclografiche delle famiglie di discontinuità - proiezione aree uguali - emisfero inferiore.

FRONTE 1									
Stazioni	Principali sistemi di fratturazione	Meccanismi di rottura	V.R.U: (Volume di Roccia Unitario)	Dimensione max dei blocchi in parete	Jv	RQD	Jcs (Mpa)	RMR (Bieniawski, 1989)	Classe
N° 7	K1 - K2 - K3 stratificazione	Ribaltamenti laterali; Scivolamenti planari lungo i giunti di strato	1,1 mc	1,5 mc	5,75	96,03%	K4 - 45; K1 - 45	68	III Discreta

Tab. 3.2 - Sintesi dei risultati acquisiti sul fronte 1.

Il fronte n° 1 è ubicato sul bordo settentrionale della dorsale del Monte Saretto ed ha un'estensione di circa 1000 m²; è caratterizzato da un'inclinazione di circa 80°, che raggiunge la verticalità in alcune zone, e da un azimut di immersione di circa 280°.

Sul fronte è stato possibile realizzare una stazione geomeccanica (n° 7) e 8 discese su corda.

In base alla classifica di Bieniawski, il fronte 1 risulta avere un livello di qualità discreto; è caratterizzato dalla presenza di 3 sistemi di discontinuità principali, con grado di apertura medio da elevato a molto elevato (0.5 ÷ 2.5 mm). Le discontinuità si presentano con spaziatura media da "lontana" a "molto distante", persistenza tra media e bassa. Da ciò risulta che il volume di roccia unitario è di notevoli dimensioni, superiore ad 1 m³. I meccanismi di rottura potenzialmente innescabili sono riconducibili a ribaltamenti (sistema K1) ed a rotture a cuneo tra i sistemi di discontinuità K1 e Strati.

FRONTE 2

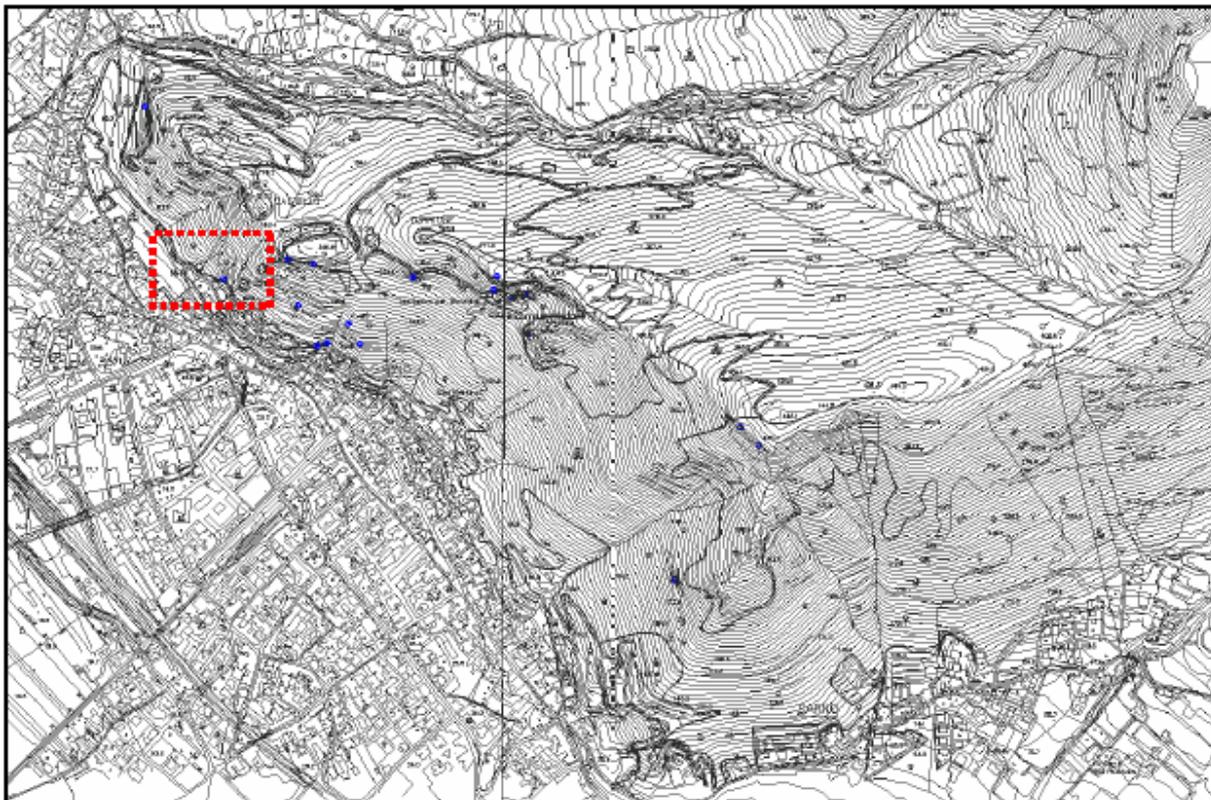


Figura 3.7 - Da: Carta Tecnica Regionale 1:5000 - stralcio in scala adattata con ubicazione del fronte n° 2.

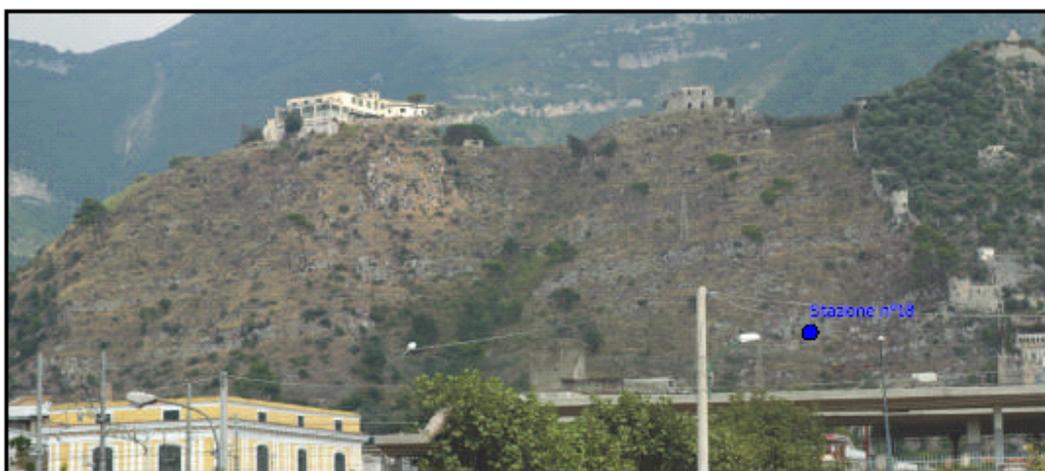
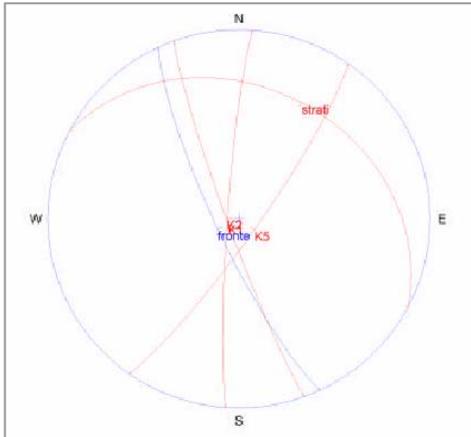


Figura 3.8 Fotografia del fronte n° 2.



Sistema	Azimet d'immersione / inclinazione (piano medio)	Spaziatura Xt	Persistenza	Apertura
K1	250/85	200 -600 cm - lontane	1-3 m - bassa	2.5- 10 mm - molto aperte
K2	274/85	200 -600 cm - lontane	1-3 m - bassa	chiuse
K5	125/82	60 - 200 cm - molto distanti	3-10 media	10- 100 mm - ampie
strati	31/28	60 - 200 cm - molto distanti	> 20 m - molto alta	chiuse

Tab. 3.3 - Schema riassuntivo dei dati rilevati ed elaborati nella stazione di misura n° 18.

Fig. 3.9 - Ciclografiche delle famiglie di discontinuità - proiezione aree uguali - emisfero inferiore.

FRONTE 2									
Stazioni	Principali sistemi di fratturazione	Meccanismi di rottura	V.R.U: (Volume di Roccia Unitario)	Dimensione max dei blocchi in parete	Jv	RQD	Jes (Mpa)	RMR (Bieniawski, 1989)	Classe
N° 18	K1 - K2 - K5 stratificazione	Ribaltamenti laterali; Scivolamenti planari; bassa percentuale di rotture a cuneo	0,8 mc	2 mc	6,40	93,88%	K1 - 110; K5 - 110	79	II Buona

Tab. 3.4 - Sintesi dei risultati acquisiti sul fronte 2.

Il fronte n° 2 è ubicato nella parte occidentale del versante meridionale della dorsale del Monte Saretto ed è caratterizzato da un'inclinazione di circa 80° e da un azimet di immersione di circa 250°.

Sul fronte è stata eseguita una stazione geomeccanica (n° 18).

In base alla classifica di Bieniawski, il fronte 2 risulta avere un livello di qualità discreto; è caratterizzato dalla presenza di 3 sistemi di discontinuità principali, con grado di apertura variabile: il sistema K2 si presenta mediamente con discontinuità chiuse, mentre i sistemi K1 e K3 hanno apertura dei giunti classificata tra "beante" ed "aperta", (2,5 ÷ 100 mm); la spaziatura media si riferisce a discontinuità da "lontane" a "molto distanti" (60 ÷ 600 cm), la persistenza varia da bassa a molto alta. Da ciò risulta che il volume di roccia unitario è minore di 1 m³; tuttavia il volume massimo dei blocchi rilevati in parete è di circa 2 m³. I meccanismi di rottura potenzialmente innescabili sono scivolamenti a cuneo tra i sistemi K2 e K5 e ribaltamenti (sistema K5).

FRONTE 3

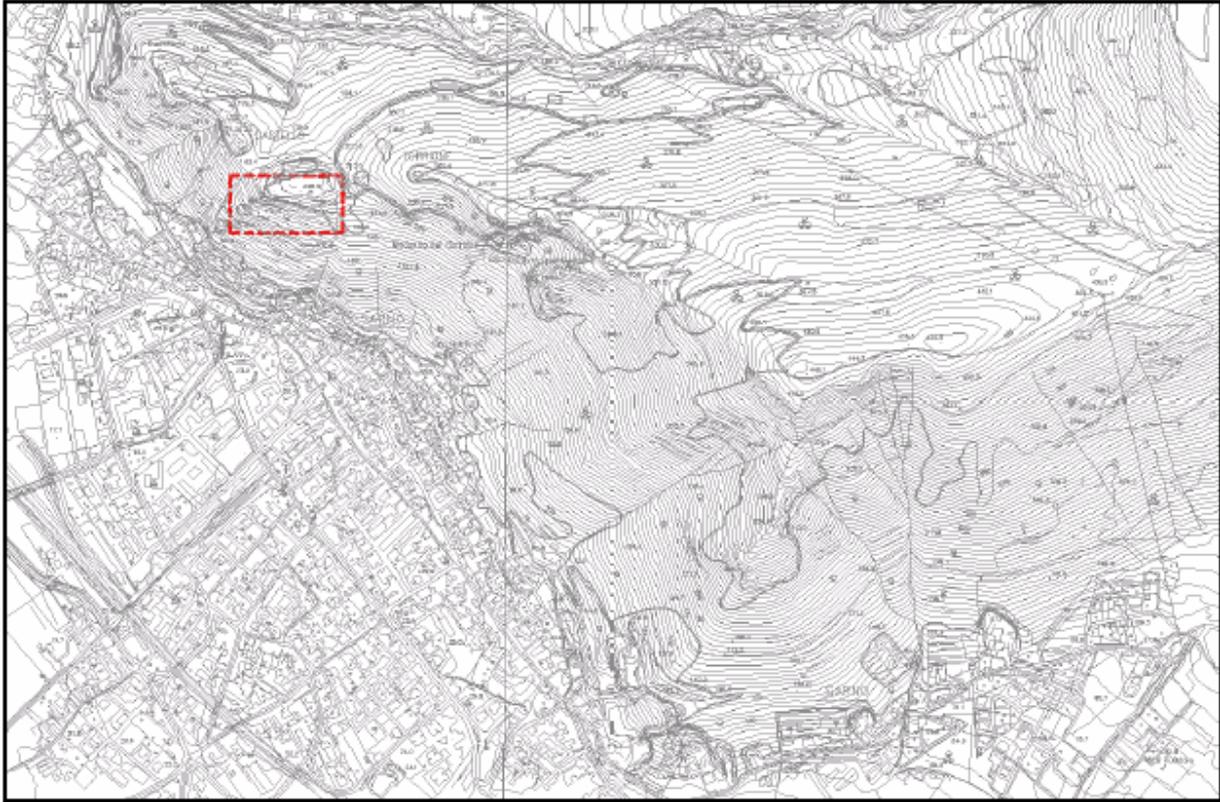


Figura 3.10 - Da: Carta Tecnica Regionale 1:5000 - stralcio in scala adattata con ubicazione del fronte n° 3.



Figura 3.11 Fotografia del fronte n° 3.

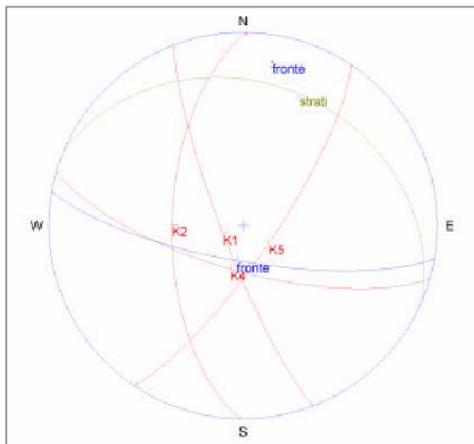


Fig. 3.12 - Ciclografiche delle famiglie di discontinuità - proiezione aree uguali - emisfero inferiore.

Sistema	Azimut d'immersione / inclinazione (piano medio)	Spaziatura Xt	Persistenza	Apertura
K1	249/81	200 - 600 cm - lontane	1-3 m - bassa	0.5- 2.5 mm - aperte
K2	271/60	60 - 200 cm - molto distanti	1-3 m - bassa	0.1 - 0.25 mm attigue
K4	196/71	60 - 200 cm - molto distanti	1-3 m - bassa	2.5- 10 mm - molto aperte
K5	124/77	60 - 200 cm - molto distanti	0-1 molto bassa	10- 100 mm - ampie
strati	23/27	60 - 200 cm - molto distanti	> 20 m - molto alta	10- 100 mm - ampie

Tab. 3.5 - Schema riassuntivo dei dati rilevati ed elaborati nelle stazioni di misura n° 1 e 2.

FRONTE 3									
Stazioni	Principali sistemi di fratturazione	Meccanismi di rottura	V.R.U: (Volume di Roccia Unitario)	Dimensione max dei blocchi in parete	Jv	RQD	Jcs (Mpa)	RMR (Bieniawski, 1989)	Classe
N° 1 - 2	K1 - K2 - K3 - K4 - K5 stratificazione	Ribaltamenti laterali; Scivolamenti planari; Rotture a cuneo	1,2 mc	3 mc	5,80	95,86%	K4 - 115; K5 - 75	47	IV Scadente

Tab. 3.6 - Sintesi dei risultati acquisiti sul fronte.

Il fronte n° 3 è ubicato nella parte occidentale del versante meridionale della dorsale del Monte Saretto, a valle del Castello Aragonese; è caratterizzato da un'inclinazione di circa 75°, che raggiunge la verticalità in alcune zone, e da un'azimut di immersione di circa 190°.

Sul fronte è stato possibile realizzare due stazioni geomeccaniche (n° 1 e 2).

In base alla classifica di Bieniawski, il fronte 3 presenta un livello di qualità scadente; è caratterizzato dalla presenza di 5 sistemi di discontinuità principali, con grado di apertura variabile: il sistema K2 risulta mediamente con le pareti delle discontinuità classificate "attigue", mentre i sistemi K1, K3, K4 e K5 hanno apertura dei giunti classificata tra "beante" ed "aperta", (variabile tra 0.5 e 100 mm); la spaziatura media è tipica di discontinuità da "lontane" a "molto distanti" (60 ÷ 600 cm); persistenza da molto bassa a bassa. Ne deriva che il volume di roccia unitario ha dimensioni notevoli, superiori ad 1 m³; ciò è confermato dal volume massimo dei blocchi rilevati in parete che è di circa 3 m³. I meccanismi di rottura potenzialmente innescabili, anche in questo caso, sono: scivolamenti planari, lungo il sistema K4; rotture a cuneo, tra i sistemi K1 e K5, K4 e K5, K1 e K4, K2 e K5.

FRONTE 4

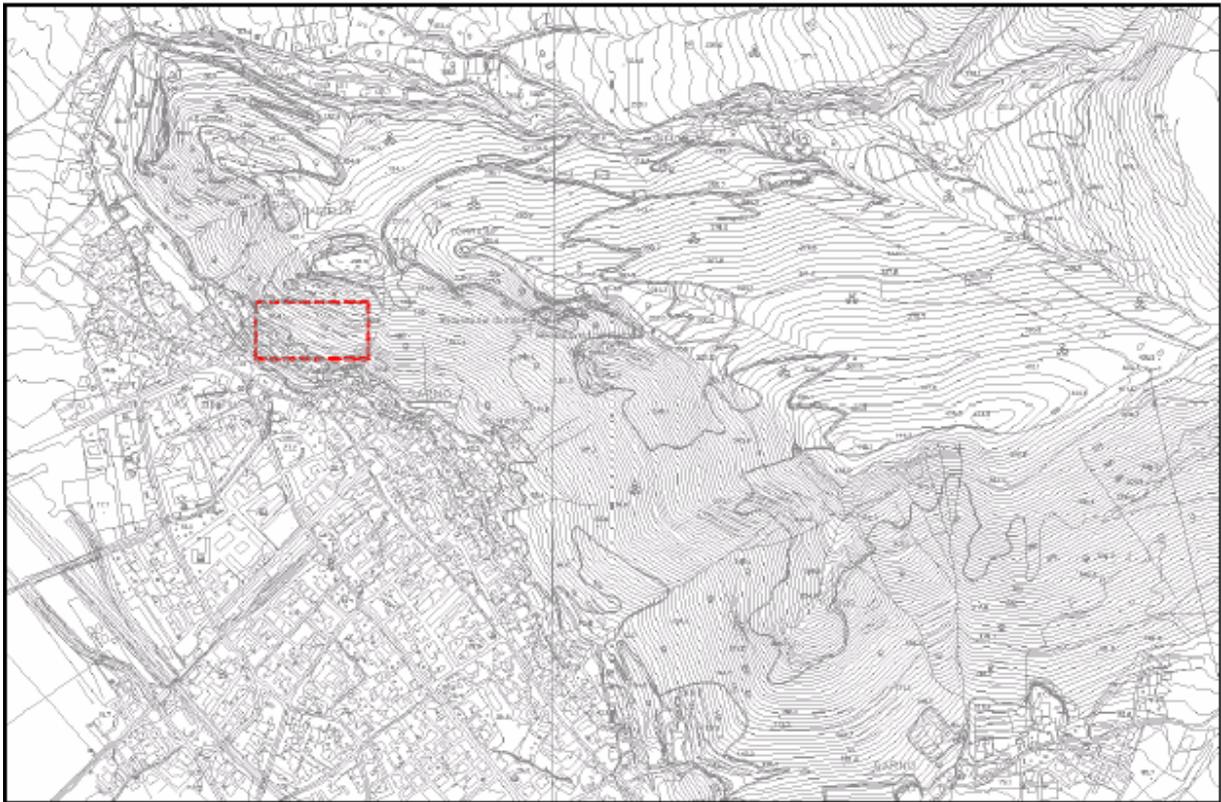


Figura 3.14 - Da: Carta Tecnica Regionale 1:5000 - stralcio in scala adattata con ubicazione del fronte n° 4.



Figura 3.15 Fotografia del fronte n° 4.

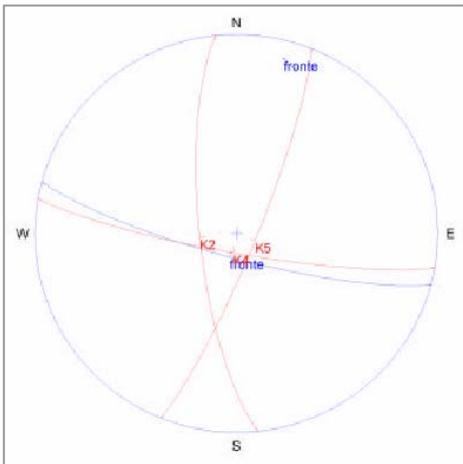


Fig. 3.16 - Ciclografiche delle famiglie di discontinuità - proiezione aree uguali - emisfero inferiore.

Sistema	Azimut d'immersione / inclinazione (piano medio)	Spaziatura Xt	Persistenza	Apertura
K1	264/75	200 -600 cm - lontane	1-3 m - bassa	2.5- 10 mm - molto aperte
K4	190/82	200 -600 cm - lontane	1-3 m - bassa	chiusa
K5	112/82	60 -200 cm - molto distanti		2.5- 10 mm - molto aperte

Tab. 3.7 - Schema riassuntivo dei dati rilevati ed elaborati nella stazione di misura n° 8.

FRONTE 4									
Stazioni	Principali sistemi di fratturazione	Meccanismi di rottura	V.R.U: (Volume di Roccia Unitario)	Dimensione max dei blocchi in parete	Jv	RQD	Jcs (Mpa)	RMR (Bieniawski, 1989)	Classe
N° 8	K3 - K5 - K6 - K7 - K8 stratificazione	Scivolamenti planari; Rotture a cuneo	0,4 mc	1 mc	5,30	97,51%	K1 - 52; K4 - 53	71	II Buona

Tab. 3.8 - Sintesi dei risultati acquisiti sul fronte.

Il fronte n° 4 è ubicato nella parte occidentale del versante meridionale della dorsale del Monte Saretto; è caratterizzato da un'inclinazione di circa 80° e da un azimut di immersione di circa 190°.

Sul fronte è stato possibile realizzare una stazione geomeccanica (n° 8).

In base alla classifica di Bieniawski, il fronte 4 risulta avere un livello di qualità buono; è caratterizzato dalla presenza di 3 sistemi di discontinuità principali, con grado di apertura variabile: il sistema K4 risulta mediamente con i giunti delle discontinuità classificati "chiusi", mentre i sistemi K1 e K5 hanno i giunti molto aperti (tra 2.5 e 10 mm); spaziatura media da "lontana" a "molto distante" (60 ÷ 600 cm); persistenza bassa. Il volume di roccia unitario ha dimensioni notevolmente inferiori rispetto ai fronti esaminati precedentemente: risulta infatti inferiore a 0.5 m³; di contro, il volume massimo dei blocchi rilevati in parete è di circa 1 m³. I meccanismi di rottura potenzialmente innescabili sono scivolamenti a cuneo tra i sistemi K1 e K5.

FRONTE 5

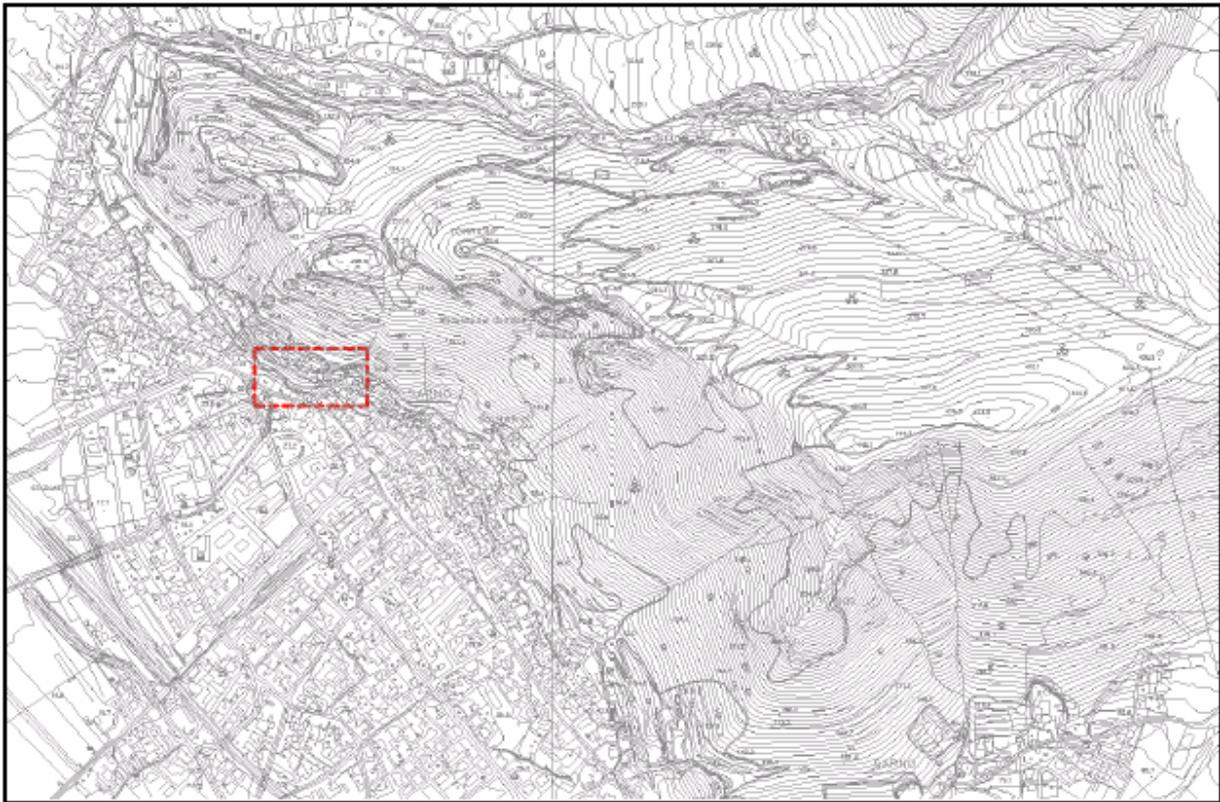


Figura 3.17 - Da: Carta Tecnica Regionale 1:5000 - stralcio in scala adattata con ubicazione del fronte n° 5.



Figura 3.18 Fotografia del fronte n° 5.

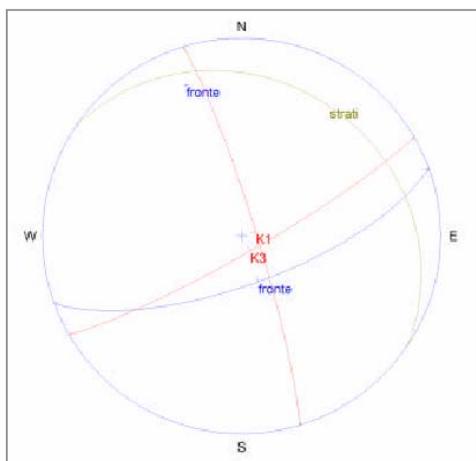


Fig. 3.19 - Ciclografiche delle famiglie di discontinuità - proiezione aree uguali - emisfero inferiore.

Sistema	Azimut d'immersione / inclinazione (piano medio)	Spaziatura Xt	Persistenza	Apertura
K1	73/84	200 -600 cm - lontane	1-3 m - bassa	2.5- 10 mm - molto aperte
K3	150/83	60 - 200 cm - molto distanti	1-3 m - bassa	2.5- 10 mm - molto aperte
strati	34/22	20 - 60 cm - distanti	> 20 m - molto alta	0.5- 2.5 mm - aperte

Tab. 3.9 - Schema riassuntivo dei dati rilevati ed elaborati nelle stazioni di misura n° 3 e 4.

FRONTE 5									
Stazioni	Principali sistemi di fratturazione	Meccanismi di rottura	V.R.U: (Volume di Roccia Unitario)	Dimensione max dei blocchi in parete	Jv	RQD	Jcs (Mpa)	RMR (Bieniawski, 1989)	Classe
N° 3 - 4	K1 - K3 stratificazione	Scivolamenti planari lungo le superfici del sistema K3; Rotture a cuneo	0,35 mc	(lastra) 2 mc	5,20	97,84%	K1 - 43	72	II Buona

Tab. 3.10 - Sintesi dei risultati acquisiti sul fronte.

Il fronte n° 5 è ubicato nella parte occidentale del versante meridionale della dorsale del Monte Saretto, immediatamente a monte del nucleo storico dell'abitato di Sarno; è caratterizzato da un'inclinazione di circa 70° e da un azimut di immersione di circa 160°.

Sul fronte è stato possibile realizzare due stazioni geomeccaniche (n° 3 e 4).

In base alla classifica di Bieniawski, il fronte 5 risulta avere un livello di qualità buono; è caratterizzato dalla presenza di 2 sistemi di discontinuità principali, con grado di apertura molto alto (tra 2.5 e 10 mm); spaziatura media da "lontana" a "molto distante" (60 ÷ 600 cm); persistenza bassa. Anche in questo caso, come per il fronte 4, il volume di roccia unitario ha dimensioni inferiori a 0,5 m³; tuttavia, il volume massimo dei blocchi rilevati in parete è di circa 2 m³. I meccanismi di rottura potenzialmente innescabili sono ribaltamenti lungo il sistema K3, l'applicazione del codice RSLOPE non evidenzia altri cinematismi d'instabilità possibili.

FRONTE 6

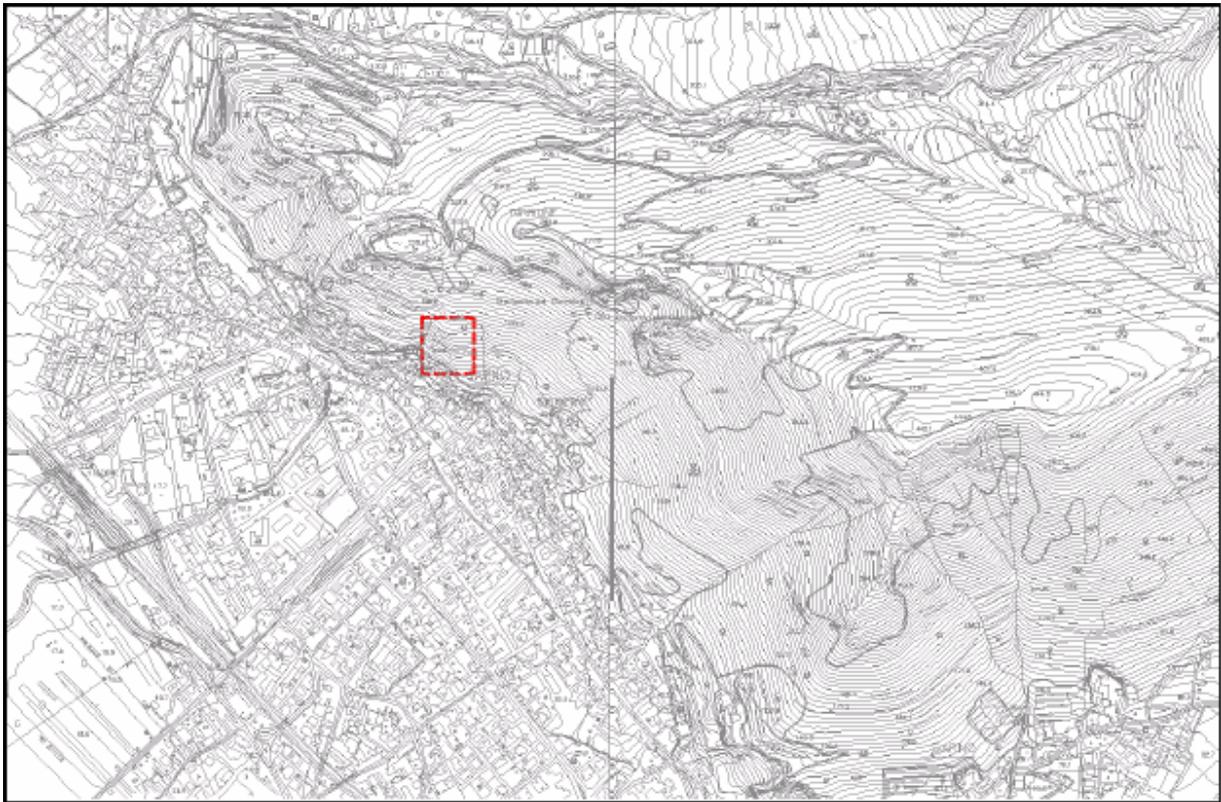


Figura 3.20 - Da: Carta Tecnica Regionale 1:5000 - stralcio in scala adattata con ubicazione del fronte n° 6.



Figura 3.21 Fotografia del fronte n° 6.

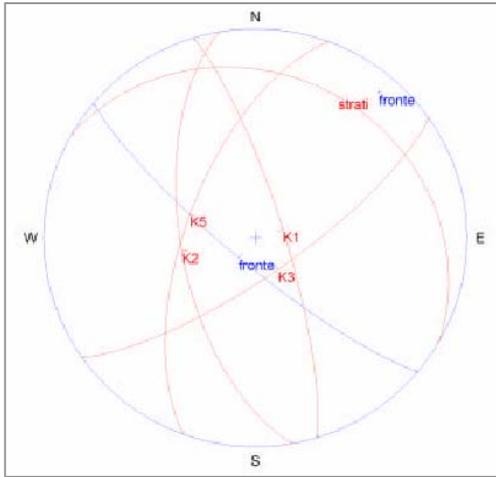


Fig. 3.22 - Ciclografiche delle famiglie di discontinuità - proiezione aree uguali - emisfero inferiore.

Sistema	Azimut d'immersione / inclinazione (piano medio)	Spaziatura Xt	Persistenza	Apertura
K1	73/79	60 -200 cm - molto distanti	1-3 m - bassa	10- 100 mm - ampie
K2	260/61	200 -600 cm - lontane	1-3 m - bassa	2.5 - 10 mm molto aperte
K3	145/75	20 -60 cm - distanti	1-3 m - bassa	10- 100 mm - ampie
K5	290/63	20 -60 cm - distanti	0 - 1 m molto bassa	2.5 - 10 mm molto aperte
strati	30/23	20 -60 cm - distanti	10 - 20 m alta	2.5 - 10 mm molto aperte

Tab. 3.11 - Schema riassuntivo dei dati rilevati ed elaborati nelle stazioni di misura n° 5 e 6.

FRONTE 6									
Stazioni	Principali sistemi di fratturazione	Meccanismi di rottura	V.R.U: (Volume di Roccia Unitario)	Dimensione max dei blocchi in parete	Jv	RQD	Jcs (Mpa)	RMR (Bieniawski, 1989)	Classe
N° 5 - 6	K1 - K2 - K3- K5 stratificazione	Ribaltamenti laterali; Scivolamenti planari; possibili rotture a cuneo	0,5 mc	1,5 mc	7,65	89,76%	K1 - 44; K3 - 48	61,5	III Discreta

Tab. 3.12 - Sintesi dei risultati acquisiti sul fronte 6.

Il fronte n° 6 è ubicato nella parte occidentale del versante meridionale della dorsale del Monte Saretto, immediatamente a monte del nucleo storico dell'abitato di Sarno; è caratterizzato da un'inclinazione di circa 80° e da un azimut di immersione è di circa 220°.

Sul fronte è stato possibile realizzare due stazioni geomeccaniche (n° 5 e 6).

In base alla classifica di Bieniawski, il fronte 6 risulta avere un livello di qualità discreto; è caratterizzato dalla presenza di 4 sistemi di discontinuità principali, con grado di apertura da "molto aperte" ad "ampie" (tra 2.5 mm e 100 mm); spaziatura media da "distante" a "lontana" (20 ÷ 600 cm); persistenza tra molto bassa e bassa. Anche in questo caso, come per i fronti 4 e 5, il volume di roccia unitario ha dimensioni limitate (circa 0,5 m³); il volume massimo dei blocchi rilevati in parete è di circa 1,5 m³. I meccanismi di rottura potenzialmente innescabili sono: scivolamenti planari, lungo il sistema K2; ribaltamenti, lungo il sistema K1; rotture a cuneo, tra i sistemi K2 e K3, K3 e K5.

FRONTE 7

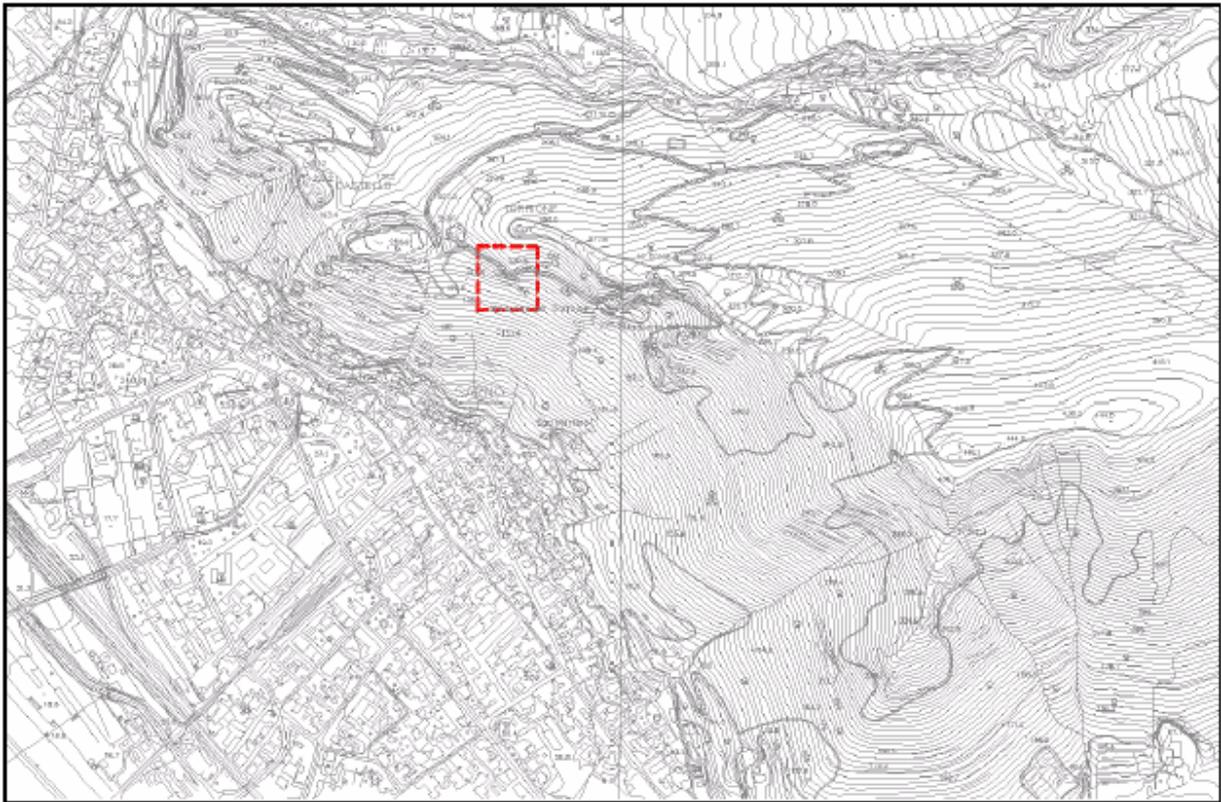


Figura 3.23 - Da: Carta Tecnica Regionale 1:5000 - stralcio in scala adattata con ubicazione del fronte n° 7.



Figura 3.24 Fotografia del fronte n° 7.

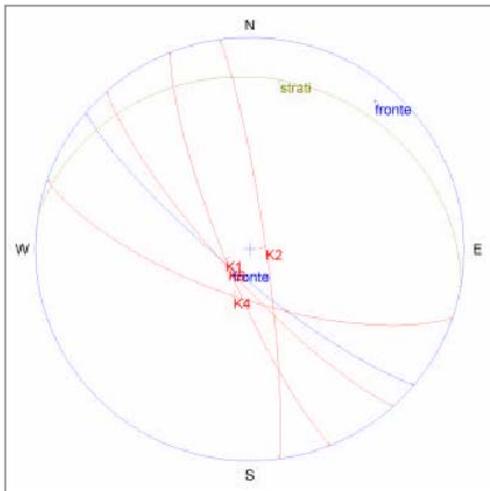


Fig. 3.25 - Ciclografiche delle famiglie di discontinuità - proiezione aree uguali - emisfero inferiore.

Sistema	Azimut d'immersione / inclinazione (piano medio)	Spaziatura Xt	Persistenza	Apertura
K1	248/80	60 - 200 cm - molto distanti	0-1 m - molto bassa	0.5- 2.5 mm - aperte
K2	82/84	60 - 200 cm - molto distanti	0-1 m - molto bassa	0.5- 2.5 mm - aperte
K4	199/71	60 - 200 cm - molto distanti	0-1 m - molto bassa	2.5- 10 mm - molto aperte
K6	228/79	60 - 200 cm - molto distanti	0-1 m - molto bassa	0.5- 2.5 mm - aperte
strati	10/20	20 - 60 cm - distanti	>20 molto alta	0.5- 2.5 mm - aperte

Tab. 3.13 - Schema riassuntivo dei dati rilevati ed elaborati nella stazione di misura n° 9.

FRONTE 7									
Stazioni	Principali sistemi di fratturazione	Meccanismi di rottura	V.R.U: (Volume di Roccia Unitario)	Dimensione max dei blocchi in parete	Jv	RQD	Jcs (Mpa)	RMR (Bieniawski, 1989)	Classe
N° 9	K1 - K2 - K4 - K6 stratificazione	Rotture a cuneo; Scivolamenti planari; possibili ribaltamenti laterali	1,3 mc	2,5 mc	6,80	92,56%	K6 - 55	45,5	IV Scadente

Tab. 3.14 - Sintesi dei risultati acquisiti sul fronte 7.

Il fronte n° 7 è ubicato all'incirca al centro del versante meridionale del Monte Saretto, immediatamente a valle del Torrione; è caratterizzato da un'inclinazione di circa 80° e da un azimut di immersione di circa 220°.

Sul fronte è stato possibile realizzare una stazione geomeccanica (n° 9).

In base alla classifica di Bieniawski, il fronte 7 risulta avere un livello di qualità scadente; è caratterizzato dalla presenza di 4 sistemi di discontinuità principali, con grado di apertura da "aperte" a "molto aperte" (tra 0.5 mm e 10 mm); spaziatura media molto distante (60 ÷ 200 cm); persistenza molto bassa. Da ciò risulta che il volume di roccia unitario ha dimensioni notevoli, superiori a 1 m³; inoltre il volume massimo dei blocchi rilevati in parete è di circa 2,5 m³. I meccanismi di rottura potenzialmente innescabili sono: scivolamenti planari, lungo il sistema K4; rotture a cuneo, tra i sistemi K1 e K4, K2 e K6, K1 e K6, K4 e K6; ribaltamenti lungo il sistema K2.

FRONTE 8

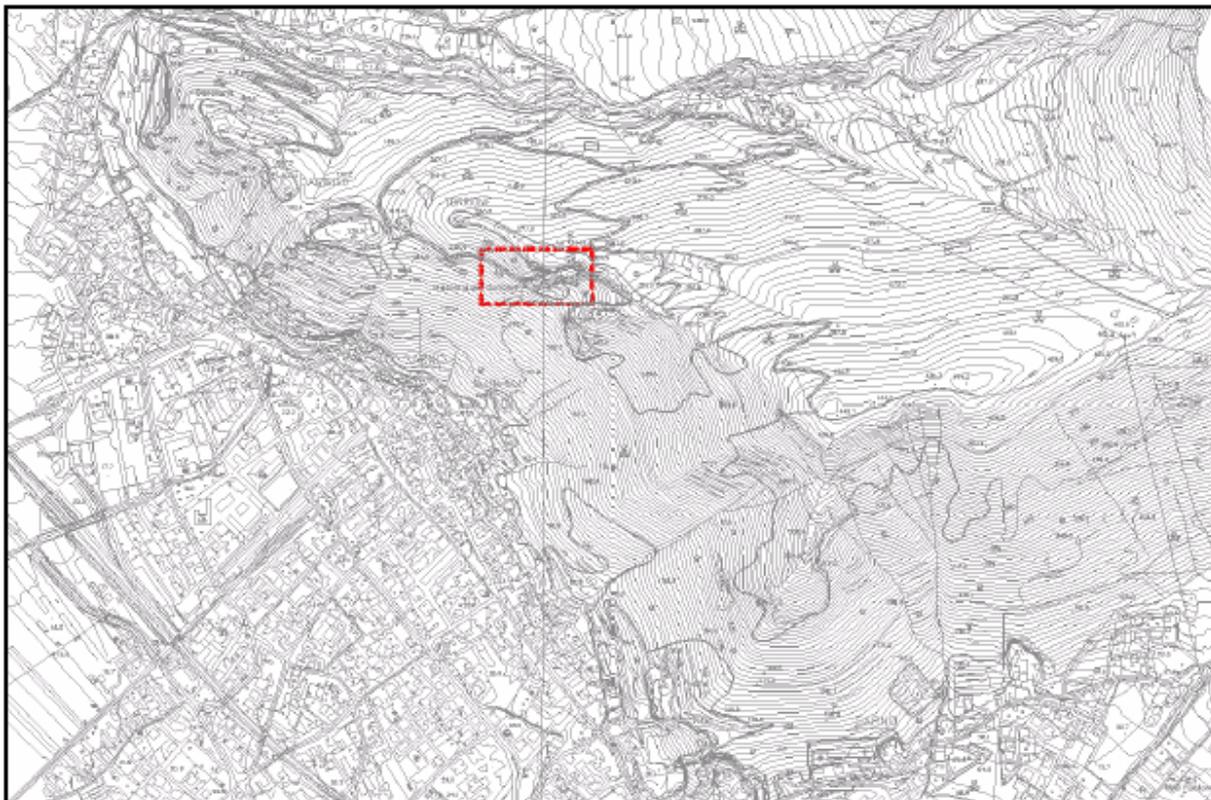


Figura 3.26 - Da: Carta Tecnica Regionale 1:5000 - stralcio in scala adattata con ubicazione del fronte n° 8.

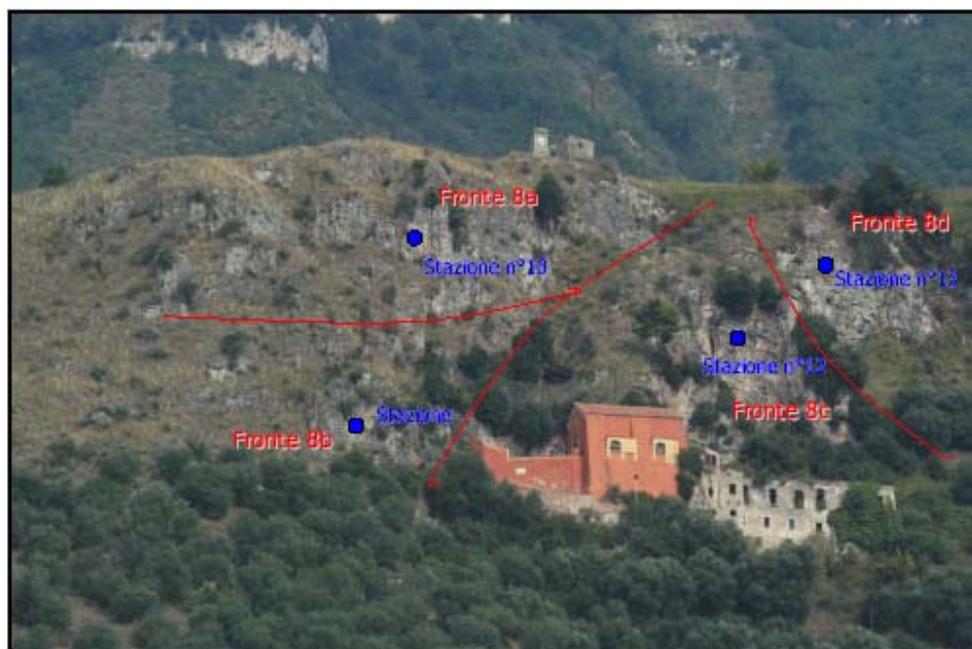
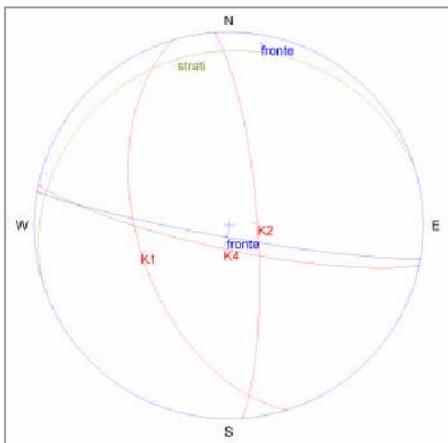


Figura 3.27 Fotografia del fronte n° 8.

Il fronte n° 8 è ubicato all'incirca al centro del versante meridionale del Monte Saretto, nella parte sommitale del versante, in corrispondenza della cresta; sul fronte è stato possibile realizzare quattro stazioni geomeccaniche (n° 10, 11, 12 e 13). Il fronte 8 è caratterizzato da un'inclinazione di circa 85° e da un azimut di immersione di circa 190°

L'analisi geomeccanica dei parametri rilevati è stata eseguita separatamente per ciascuna stazione di misura (vedi Fig. 3.27).

FRONTE 8a



Sistema	Azimut d'immersione / inclinazione (piano medio)	Spaziatura Xt	Persistenza	Apertura
K1	253/79	60 -200 cm - molto distanti	1-3 m - bassa	0.5-2.5 mm - aperte
K2	86/78	20 -60 cm - distanti	1-3 m - bassa	0.5-2.5 mm - aperte
K4	192/80	20 -60 cm - distanti	0-1 m - molto bassa	0.5-2.5 mm - aperte
strati	343/11	200 -600 cm - lontane	0-1 m - molto bassa	chiuse

Tab. 3.15 - Schema riassuntivo dei dati rilevati ed elaborati nella stazione di misura n° 10.

Fig. 3.28 - Ciclografiche delle famiglie di discontinuità - proiezione aree uguali - emisfero inferiore.

FRONTE 8a									
Stazioni	Principali sistemi di fratturazione	Meccanismi di rottura	V.R.U: (Volume di Roccia Unitario)	Dimensione max dei blocchi in parete	Jv	RQD	Jcs (Mpa)	RMR (Bieniawski, 1989)	Classe
N° 10	K1 - K2 - K3 stratificazione	Scivolamenti planari; possibili ribaltamenti laterali	1,2 mc	2,5 mc	6,55	93,39%	K1 - 70; K2 - 140	67,5	III Discreta

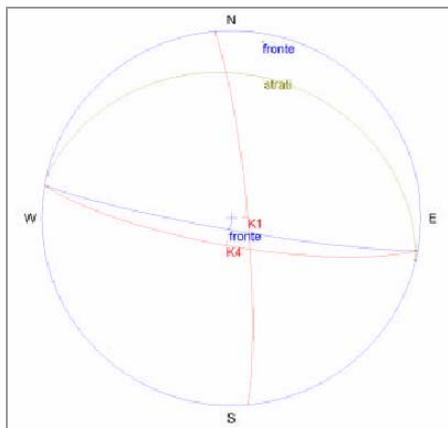
Tab. 3.16 - Sintesi dei risultati acquisiti sul fronte 8a.

Il fronte 8a corrisponde alla stazione geomeccanica n° 10.

In base alla classifica di Bieniawski, il fronte 8a risulta avere un livello di qualità discreto; è caratterizzato dalla presenza di 3 sistemi di discontinuità principali, con giunti aperti (tra 0.5 e 2.5 mm); spaziatura tra "distante" e "lontana" (60 ÷ 600 cm); persistenza tra molto bassa e bassa. Il volume di roccia unitario ha dimensioni superiori ad 1 m³ (circa 1,2 m³); il volume massimo dei blocchi rilevati in parete è di circa 2,5 m³. I meccanismi di rottura

potenzialmente innescabili sono: scivolamenti planari, lungo il sistema ad alto angolo K4, rotture cuneiformi lungo intersezioni ad alto (K2-K4) e basso angolo (K1-K2).

FRONTE 8b



Sistema	Azimut d'immersione / inclinazione (piano medio)	Spaziatura Xt	Persistenza	Apertura
K2	85/83	20 - 60 cm - distanti	1-3 m - bassa	0.5-2.5 mm - aperte
K4	190/78	60 - 200 cm - molto distanti	3-10 m - media	2.5- 10 mm - molto aperte
strati	13/24	60 - 200 cm - molto distanti	> 20 m - Molto alta	chiuse

Tab. 3.17 - Schema riassuntivo dei dati rilevati ed elaborati nella stazione di misura n° 11.

Fig. 3.29 - Ciclografiche delle famiglie di discontinuità - proiezione aree uguali - emisfero inferiore (K1 deve intendersi K2).

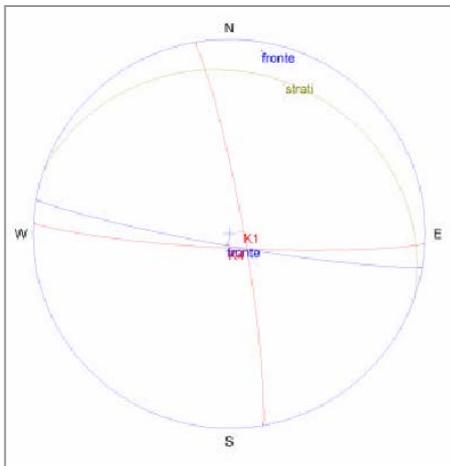
FRONTE 8b									
Stazioni	Principali sistemi di fratturazione	Meccanismi di rottura	V.R.U: (Volume di Roccia Unitario)	Dimensione max dei blocchi in parete	Jv	RQD	Jcs (Mpa)	RMR (Bieniawski, 1989)	Classe
N° 11	K2 - K4 stratificazione	Scivolamenti planari	0,65 mc	1 mc	5,45	97,02%	K2 - 55; K4 - 72	70	III Discreta

Tab. 3.18 - Sintesi dei risultati acquisiti sul fronte.

Il fronte 8b corrisponde alla stazione geomeccanica n° 11.

In base alla classifica di Bieniawski, il fronte 8b risulta avere un livello di qualità discreto; è caratterizzato dalla presenza di 2 sistemi di discontinuità principali, giunti da aperti a molto aperti (tra 0.5 e 10 mm); spaziatura tra "distante" e "molto distante" (60 ÷ 200 cm); persistenza da bassa a media. Il volume di roccia unitario ha dimensioni inferiori ad 1 m³ (circa 0,6 m³), mentre il volume massimo dei blocchi rilevati in parete è di circa 1 m³. I meccanismi di rottura potenzialmente innescabili sono scivolamenti cuneiformi lungo l'intersezione ad alto angolo K2-K4.

FRONTE 8c



Sistema	Azimet d'immersione / inclinazione (piano medio)	Spaziatura Xt	Persistenza	Apertura
K1	80/84	60 - 200 cm - molto distanti	> 20 m - Molto alta	0.5-2.5 mm - aperte
K4	183/84			
strati	20/18			

Fig. 3.30 - Ciclografiche delle famiglie di discontinuità - proiezione aree uguali - emisfero inferiore.

Tab. 3.19 Schema riassuntivo dei dati rilevati ed elaborati nella stazione di misura n° 12.

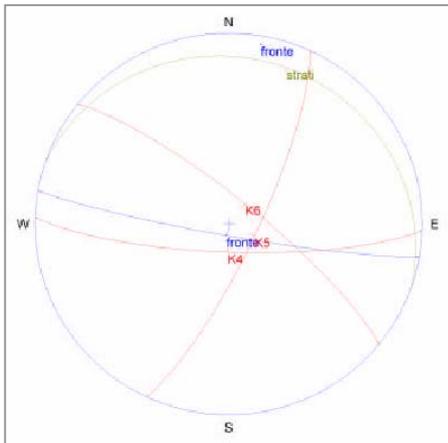
FRONTE 8c									
Stazioni	Principali sistemi di fratturazione	Meccanismi di rottura	V.R.U: (Volume di Roccia Unitario)	Dimensione max dei blocchi in parete	Jv	RQD	Jes (Mpa)	RMR (Bieniawski, 1989)	Classe
N° 12	K1 - K4 stratificazione	Scivolamenti planari	0,9 mc	1,5 mc	5,20	97,84%	K2 - 34; K4 - 41	67	III Discreta

Tab. 3.20 - Sintesi dei risultati acquisiti sul fronte 8c.

Il fronte 8c corrisponde alla stazione geomeccanica n° 12.

In base alla classifica di Bieniawski, il fronte 8c risulta avere un livello di qualità discreto; è caratterizzato dalla presenza di 2 sistemi di discontinuità principali, con giunti da aperti a molto aperti (tra 0.5 e 10 mm); spaziatura tra "molto distante" e "lontana" (60 ÷ 600 cm); persistenza bassa. Il volume di roccia unitario ha dimensioni di poco inferiori ad 1 m³ (circa 0,9 m³), mentre il volume massimo dei blocchi rilevati in parete è di circa 1,5 m³. La giacitura dei vari sistemi di discontinuità evidenzia una situazione di sostanziale stabilità, con la parziale eccezione di teorici scivolamenti planari, lungo il sistema ad alto angolo K4.

FRONTE 8d



Sistema	Azimut d'immersione / inclinazione (piano medio)	Spaziatura Xt	Persistenza	Apertura
K4	190/85	20 - 60 cm - distanti	1-3 m - bassa	0.5-2.5 mm - aperte
K5	115/78	20 - 60 cm - distanti	1-3 m - bassa	0.5-2.5 mm - aperte
K6	39/79	60 - 200 cm - molto distanti	1-3 m - bassa	0.5-2.5 mm - aperte
strati	20/14	20 - 60 cm - distanti	> 20 molto alta	0.5-2.5 mm - aperte

Tab. 3.21 - Schema riassuntivo dei dati rilevati ed elaborati nella stazione di misura n° 13.

Fig. 3.31 - Ciclografiche delle famiglie di discontinuità - proiezione aree uguali - emisfero inferiore.

FRONTE 8d									
Stazioni	Principali sistemi di fratturazione	Meccanismi di rottura	V.R.U: (Volume di Roccia Unitario)	Dimensione max dei blocchi in parete	Jv	RQD	Jcs (Mpa)	RMR (Bieniawski, 1989)	Classe
N° 13	K4 - K5 - K6 stratificazione	Scivolamenti planari; ribaltamenti laterali	0,75 mc	1,5 mc	7,75	89,43%	K4 - 28	35,5	IV Scadente

Tab. 3.22 - Sintesi dei risultati acquisiti sul fronte.

Il fronte 8d corrisponde alla stazione geomeccanica n° 13.

In base alla classifica di Bieniawski, il fronte 8d risulta avere un livello di qualità scadente; è caratterizzato dalla presenza di 3 sistemi di discontinuità principali, con giunti mediamente aperti (tra 0.5 e 2.5 mm); spaziatura tra "distante" e "molto distante" (20 ÷ 200 cm); persistenza bassa. Il volume di roccia unitario ha dimensioni inferiori ad 1 m³ (circa 0,75 m³), mentre il volume massimo dei blocchi rilevati in parete è di circa 1,5 m³. I meccanismi di rottura potenzialmente innescabili sono scivolamenti cuneiformi secondo l'intersezione tra K4 e K6; ribaltamenti lungo il sistema K6.

FRONTE 9

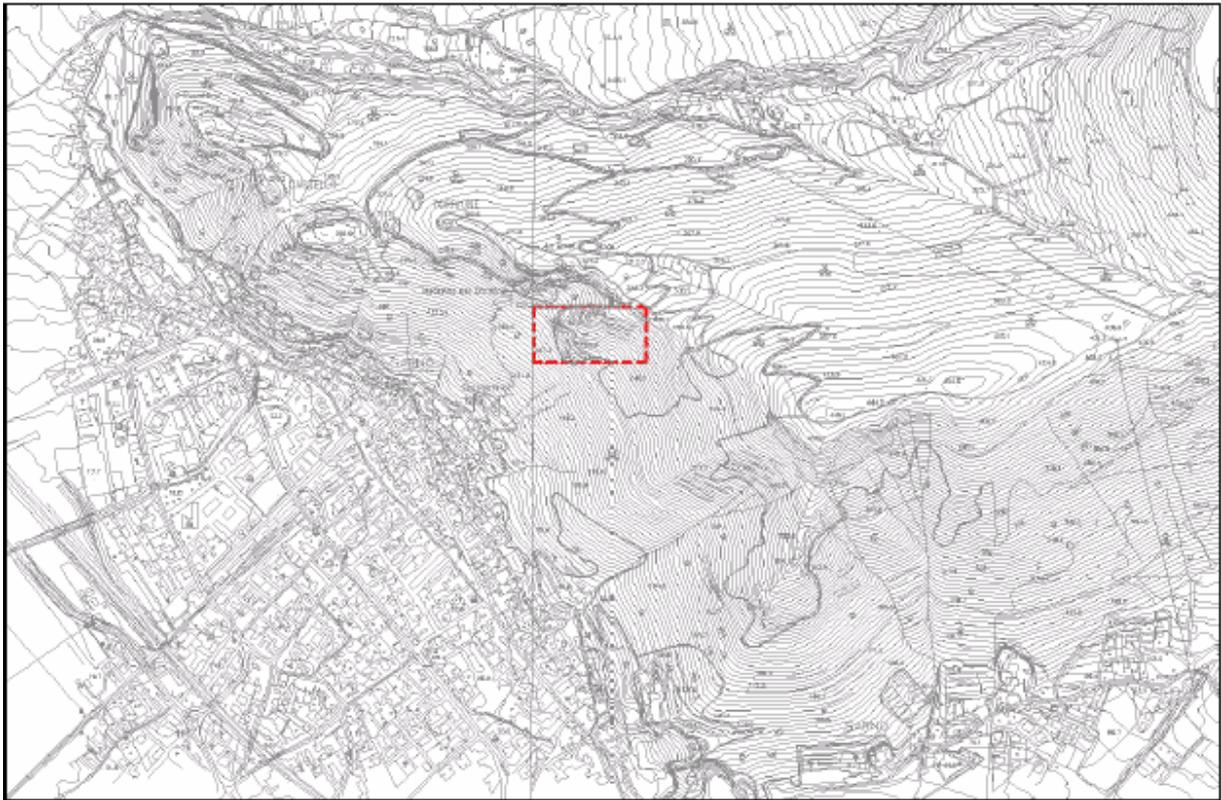


Figura 3.32 - Da: Carta Tecnica Regionale 1:5000 - stralcio in scala adattata con ubicazione del fronte n° 9.

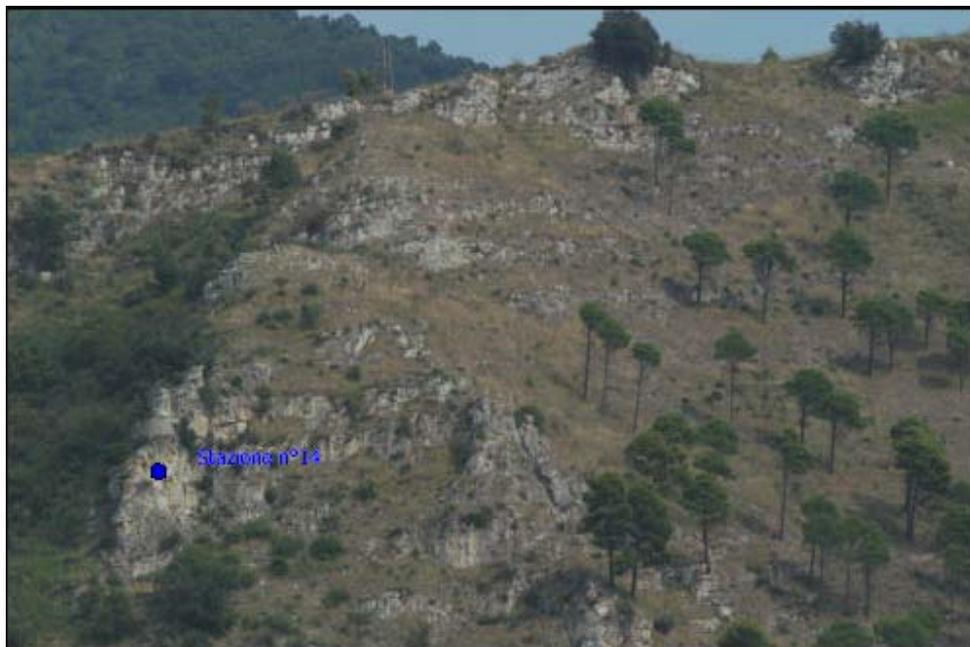


Figura 3.33 Fotografia del fronte n° 9.

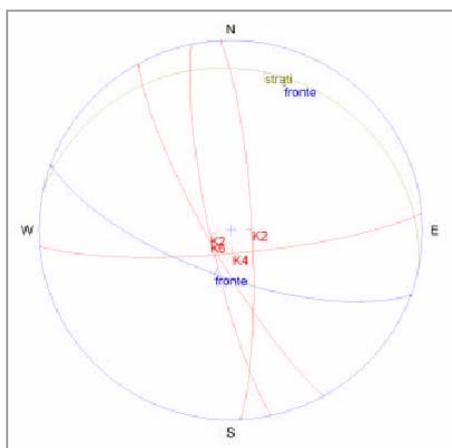


Fig. 3.34 - Ciclografiche delle famiglie di discontinuità - proiezione aree uguali - emisfero inferiore (N.B. La sigla K2 è stata riportata erroneamente due volte; quella di sinistra deve intendersi K1).

Sistema	Azimut d'immersione / inclinazione (piano medio)	Spaziatura Xt	Persistenza	Apertura
K1	258/81	60 - 200 cm - molto distanti	3-10 media	0.5- 2.5 mm - aperte
K2	87/81	60 - 200 cm - molto distanti	1-3 m - bassa	2.5- 10 mm - molto aperte
K4	175/80	60 - 200 cm - molto distanti	1-3 m - bassa	0.5- 2.5 mm - aperte
K6	241/80	60 - 200 cm - molto distanti	0-1 m - molto bassa	2.5- 10 mm - molto aperte
strati	10/20	20 - 60 cm - distanti	>20 molto alta	0.5- 2.5 mm - aperte

Tab. 3.23 - Schema riassuntivo dei dati rilevati ed elaborati nella stazione di misura n° 14.

FRONTE 9									
Stazioni	Principali sistemi di fratturazione	Meccanismi di rottura	V.R.U: (Volume di Roccia Unitario)	Dimensione max dei blocchi in parete	Jv	RQD	Jcs (Mpa)	RMR (Bieniawski, 1989)	Classe
N° 14	K1 - K2 - K4 - K6 stratificazione	Possibili rotture a cuneo e ribaltamenti	1,40 mc	2,0 mc	7,60	89,92%	K1 - 38; K2 - 29; K4 - 110	55	III Discreta

Tab. 3.24 - Sintesi dei risultati acquisiti sul fronte 9.

Il fronte n° 9 è ubicato nel settore centrale del versante meridionale del Monte Saretto, in corrispondenza all'area di distacco del crollo avvenuto il 5 aprile 2005; è caratterizzato da un'inclinazione di circa 70° e da un azimut di immersione di circa 200°.

Sul fronte è stato possibile realizzare una stazione geomeccanica (n° 14).

In base alla classifica di Bieniawski, il fronte 9 risulta avere un livello di qualità discreto; è caratterizzato dalla presenza di 4 sistemi di discontinuità principali, con giunti da aperti a molto aperti (tra 0.5 e 10 mm); spaziatura media "molto distante" (60 ÷ 200 cm); persistenza tre media e bassa. Da ciò risulta che il volume di roccia unitario ha dimensioni superiori a 1 m³ (circa 1,4 m³); il volume massimo dei blocchi rilevati in parete è di circa 2 m³. I meccanismi di rottura potenzialmente innescabili sono: scivolamenti planari secondo il sistema K4; rotture a cuneo, tra i sistemi K1-K2 e K2-K6.

FRONTE 10

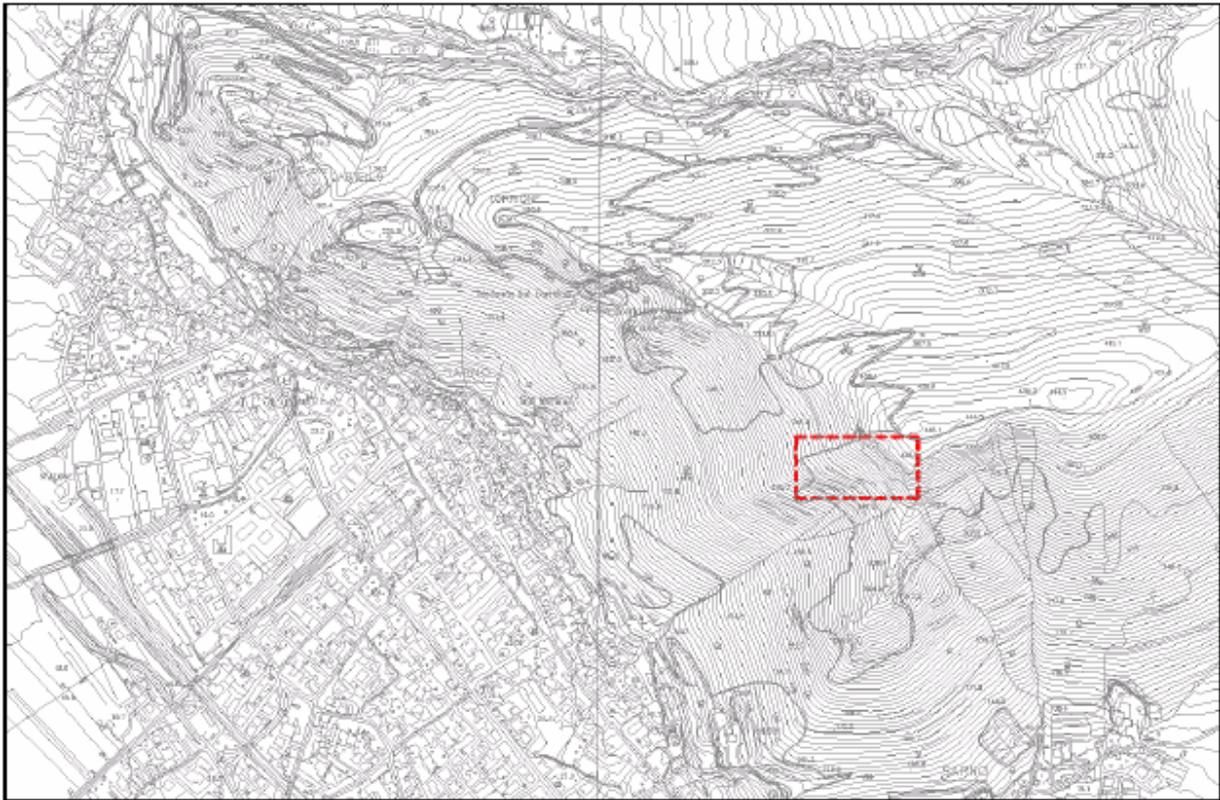


Figura 3.35 - Da: Carta Tecnica Regionale 1:5000 - stralcio in scala adattata con ubicazione del fronte n° 10.



Figura 3.36 Fotografia del fronte n° 10.

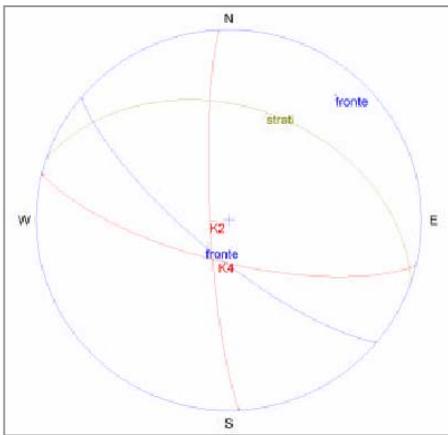


Fig. 3.37 - Ciclografiche delle famiglie di discontinuità - proiezione aree uguali - emisfero inferiore.

Sistema	Azimut d'immersione / inclinazione (piano medio)	Spaziatura Xt	Persistenza	Apertura
K2	267/82	60 - 200 cm - molto distanti	3-10 media	0.5- 2.5 mm - aperte
K4	194/72	60 - 200 cm - molto distanti	3-10 media	0.5- 2.5 mm - aperte
strati	19/40	60 - 200 cm - molto distanti	20 - alta	0.5- 2.5 mm - aperte

Tab. 3.25 - Schema riassuntivo dei dati rilevati ed elaborati nella stazione di misura n° 15 e 16.

FRONTE 10									
Stazioni	Principali sistemi di fratturazione	Meccanismi di rottura	V.R.U: (Volume di Roccia Unitario)	Dimensione max dei blocchi in parete	Jv	RQD	Jcs (Mpa)	RMR (Bieniawski, 1989)	Classe
N° 15 - 16	K2 - K4 stratificazione	Scivolamenti planari e possibili ribaltamenti laterali	0,80 mc	1,2 mc	5,60	96,52%	K2 - 55; K4 - 41	61	III Discreta

Tab. 3.26 - Sintesi dei risultati acquisiti sul fronte 10.

Il fronte n° 10 è ubicato nel settore orientale del versante meridionale del Monte Saretto, laddove comincia una graduale regolarizzazione del versante, man mano che ci si sposta ancora verso est; è caratterizzato da un'inclinazione di circa 75° e da un azimut di immersione di circa 220°.

Sul fronte è stato possibile realizzare due stazioni geomeccaniche (n° 15 e 16).

In base alla classifica di Bieniawski, il fronte 10 risulta avere un livello di qualità discreto; è caratterizzato dalla presenza di 2 sistemi di discontinuità principali, con giunti mediamente aperti, (tra 0.5 e 2.5 mm); spaziatura media "molto distante" (60 ÷ 200 cm); persistenza media.

Il volume di roccia unitario ha dimensioni di circa 0,8 m³; il volume massimo dei blocchi rilevati in parete è di circa 1,2 m³. La situazione complessiva è di sostanziale stabilità, a parte la possibilità di rotture a cuneo lungo l'intersezione ad alto angolo tra K2 e K4.

FRONTE 11

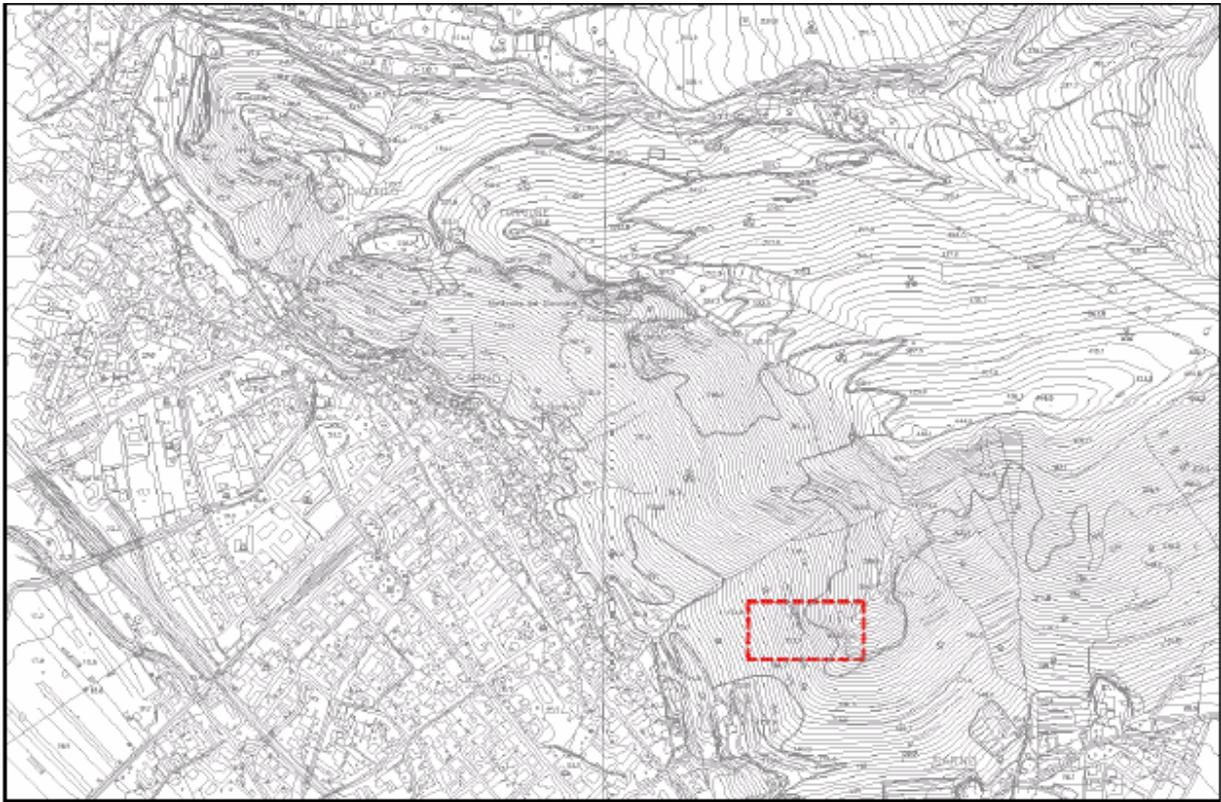


Figura 3.38 - Da: Carta Tecnica Regionale 1:5000 - stralcio in scala adattata con ubicazione del fronte n° 11.

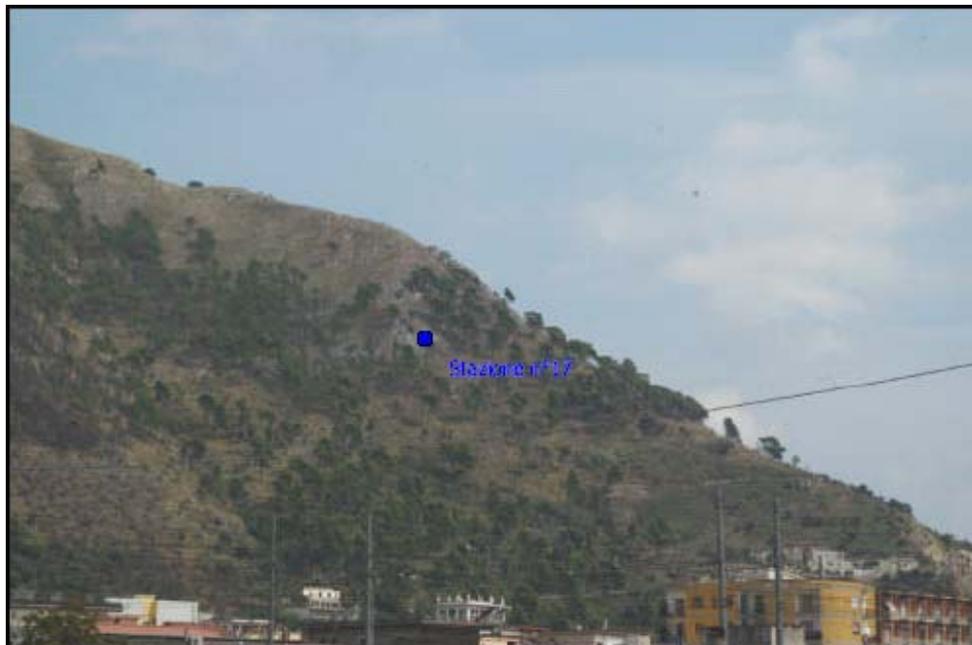


Figura 3.39 Fotografia del fronte n° 11.

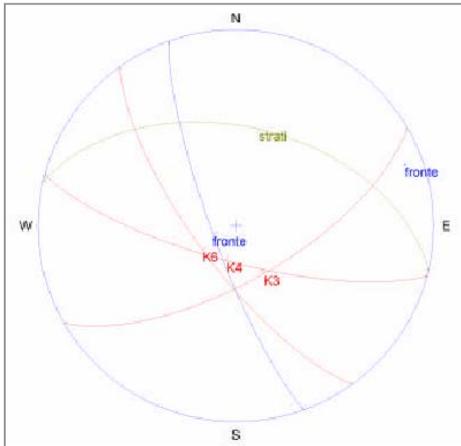


Fig. 3.40 - Ciclografiche delle famiglie di discontinuità - proiezione aree uguali - emisfero inferiore.

Sistema	Azimut d'immersione / inclinazione (piano medio)	Spaziatura Xt	Persistenza	Apertura
K3	150/67	20 – 60 cm - distanti	0-1 molto bassa	2.5- 10 mm - molto aperte
K4	195/75	20 – 60 cm - distanti	1-3 m - bassa	10- 100 mm – ampie
K6	234/73	20 – 60 cm - distanti	1-3 m - bassa	2.5- 10 mm - molto aperte
strati	13/48	60 - 200 cm – molto distanti	>20 – molto alta	0.5- 2.5 mm - aperte

Tab. 3.27 - Schema riassuntivo dei dati rilevati ed elaborati nella stazione di misura n° 17.

FRONTE 11									
Stazioni	Principali sistemi di fratturazione	Meccanismi di rottura	V.R.U: (Volume di Roccia Unitario)	Dimensione max dei blocchi in parete	Jv	RQD	Jcs (Mpa)	RMR (Bieniawski, 1989)	Classe
N° 17	K3 - K4 - K5 stratificazione	Scivolamenti planari e possibili rotture a cuneo	0,80 mc	1,0 mc	7,60	89,92%	K3 - 140; K6 - 110	60,5	III Discreta

Tab. 3.28 - Sintesi dei risultati acquisiti sul fronte 11.

Il fronte n° 11 è ubicato all'estremo sud-orientale del versante meridionale del Monte Saretto; è caratterizzato da un'inclinazione di circa 80° e da un azimut di immersione di circa 250°.

Sul fronte è stato possibile realizzare una stazione geomeccanica (n° 17).

In base alla classifica di Bieniawski, il fronte 11 risulta avere un livello di qualità discreto; è caratterizzato dalla presenza di 3 sistemi di discontinuità principali, con giunti mediamente tra molto aperti ed ampi (tra 2.5 e 100 mm); spaziatura media "distante" (20 ÷ 60 cm); persistenza tra molto bassa e bassa. Il volume di roccia unitario ha dimensioni di circa 0,8 m³; il volume massimo dei blocchi rilevati in parete è di circa 1 m³. I meccanismi di rottura potenzialmente innescabili sono: scivolamenti planari, lungo il sistema K6; rotture a cuneo lungo l'intersezione tra i sistemi K4 e K6.

Dall'analisi di dettaglio sui fronti, sono stati riconosciuti i sistemi principali di discontinuità riportati nella Tabella riassuntiva 3.29.

Denominazione dei sistemi	Direzione prevalente	Azimet d'immersione del piano medio	Inclinazione media (°)
K1	N165	75	80
K2	N180	85	85
K3	N60	150	75
K4	N90	185	75
K5	N35	125	80
K6	N140	230	80
Strati (fronti 1 – 2-3-4-5-6)	N120	30	25
Strati (fronti 7 – 8-9-10-11)	N105	15	30

Tabella 3.29 Tabella di sintesi dei principali sistemi di discontinuità identificati sui fronti.

Nelle Tabelle 3.30 e 3.31 è riassunta la classificazione di Bieniawski, riconosciuta per l'intero ammasso roccioso in studio.

Fronte	RMR	AREA ²
1	C	1
2	B	2
3	D	3a
4	B	
5	B	
6	C	3b
7	D	
8	C - D	4
9	C	
10	C	5
11	C	

Tabella 3.30 Schema riassuntivo della classificazione di Bieniawski.

RMR	0-25	25-50	50-70	70-90	90-100
CLASSE	V	IV	III	II	I
QUALITA'	Molto scadente	Scadente	Discreta	Buona	Ottima
	E	D	C	B	A

Tabella 3.31 Classi di qualità degli ammassi rocciosi secondo Bieniawski.

I risultati conseguiti evidenziano una marcata disomogeneità degli ammassi rocciosi, anche su brevi distanze; infatti i fronti risultati con caratteristiche migliori sono il fronte n°2, il fronte n°4 e il fronte n°5, viceversa quelli risultati con caratteristiche più scadenti sono il fronte n°3, il fronte n°7 e il fronte n°8. Quest'ultima evidenza è di notevole rilievo, in quanto i fronti n° 7 e 8 (Fig. 3.3) sono tra i più alti in quota lungo il versante considerato. La loro scadente qualità può quindi tradursi in una propensione al dissesto con effetti significativi sulla porzione di centro abitato direttamente sottoposto a tali fronti.

I risultati fin qui ottenuti, sia per quanto riguarda la caratterizzazione geomeccanica dei diversi fronti (caratteristiche dei principali sistemi di discontinuità riconosciuti), che per quanto riguarda i risultati ottenuti dalla classificazione dell'ammasso roccioso secondo Bieniawski, sono stati utilizzati nelle successive fasi di lavoro finalizzate all'applicazione del metodo RES sull'intera area di studio (paragrafo 3.5).

3.4.2 LA COLLINA DEI CAMALDOLI

Nei mesi di Maggio e Giugno 2006 è stata eseguita una campagna di rilevamento nell'area di studio della Collina dei Camaldoli. Durante tale campagna di rilevamento sono state effettuate le seguenti analisi:

- rilevamento geologico e geomorfologico;
- individuazione dei fronti rocciosi idonei ed accessibili per il posizionamento delle stazioni geostrutturali e geomeccaniche;
- rilievi geostrutturali e geomeccanici;
- censimento di opere di mitigazione del rischio per frane da crollo;
- censimento dei blocchi tufacei franati;

Sono state eseguite 2 stazioni geomeccaniche, i risultati delle quali sono stati integrati con dati già disponibili presso il Dipartimento di Ingegneria Geotecnica - Sezione di Geologia Applicata, derivanti da precedenti campagne di misura (Calcaterra et al., 2004b; Di Crescenzo & Santo, 2001) (Fig. 3.41).

La limitatezza delle misure raccolte è stata determinata soprattutto dalla ridotta estensione degli stendimenti, dovuta alla mancanza di fronti in roccia ben esposti o raggiungibili, soprattutto per quanto riguarda le scarpate in tufo affioranti sul versante incombente su Soccavo. Tuttavia i dati raccolti sono risultati significativi ed hanno permesso di identificare dei sistemi di giunti ben precisi, all'interno degli ammassi studiati.



Figura 3.41 Ubicazione stazioni di misura.

Tutti i dati raccolti durante la campagna di rilevamento sono stati archiviati in un *progetto GIS*, il quale rappresenta, di fatto, l'archivio di base del progetto dove sono allocati tutti i dati raccolti, alfanumerici e cartografici, di base e tematici, in maniera sistematizzata e normalizzata sia a livello puramente informatico, sia a livello dei contenuti tecnici.

Come esempio dell'*output* del progetto GIS elaborato, in Figura 3.42 è riprodotta la distribuzione geografica dei blocchi caduti durante una frana verificatasi nel marzo 2005, ciascuno corredato da documentazione fotografica.

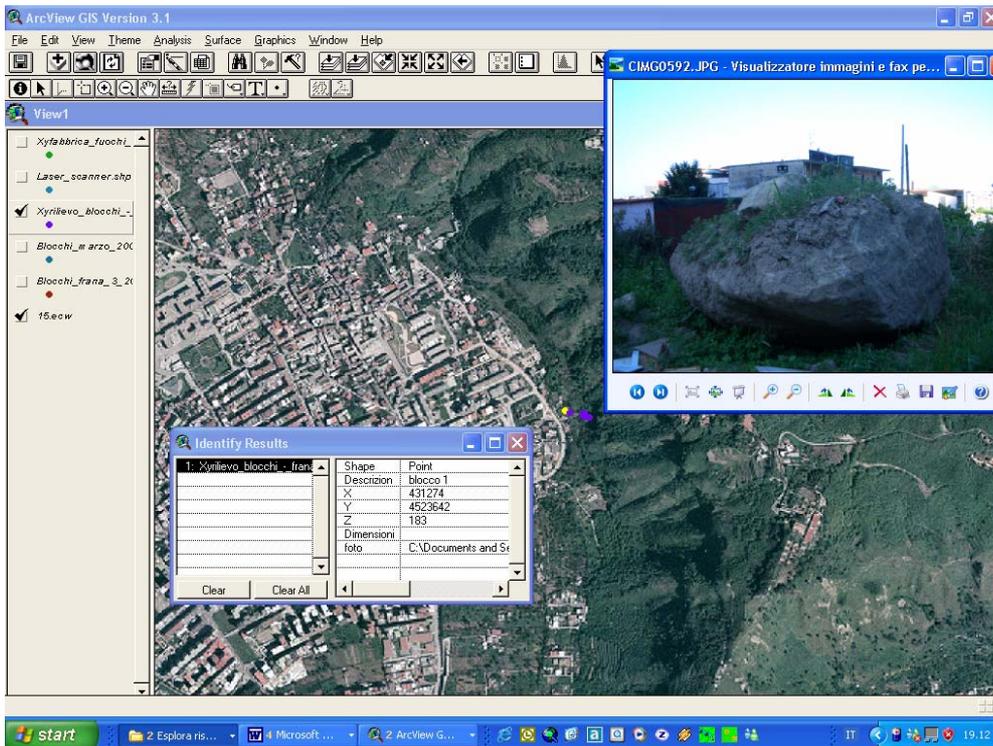


Figura 3.42 Database dei blocchi franati nel marzo 2005. Per ciascun punto è noto: il rilievo fotografico ed il volume del blocco.

Stazione 1

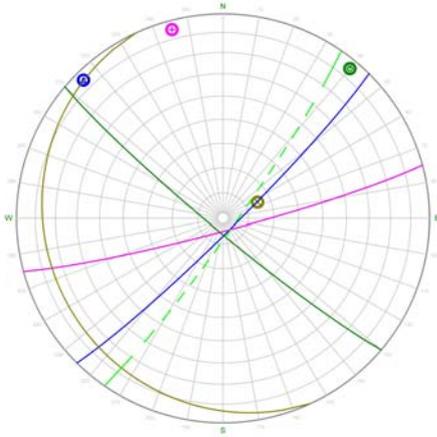


Fig. 3.43 Ciclografiche delle famiglie di discontinuità - proiezione aree uguali - emisfero inferiore.

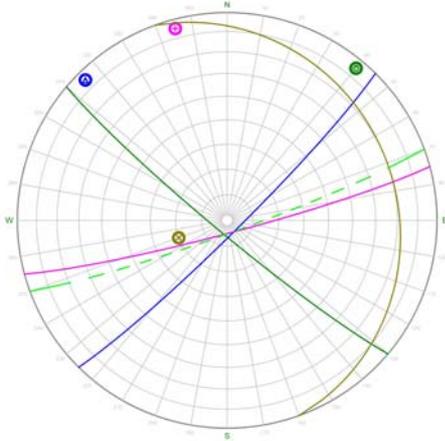
Stazione 1	
Sistema	Giacitura
K1	220/85
K2	135/85
K3	165/85
Strati	245/15

Tab. 3.32 Sistemi di discontinuità riconosciuti



La stazione 1 è situata sul versante orientale della Collina dei Camaldoli, incumbente sull'abitato di Soccavo; è caratterizzata da un'inclinazione di circa 85° e da un azimut di immersione di circa 125° . Dall'osservazione delle proiezioni stereografiche delle principali famiglie di discontinuità riconosciute, risulta che il fronte è per lo più stabile, non essendo evidenti meccanismi di rottura potenzialmente innescabili.

Stazione 2



Stazione 2	
Sistema	Giacitura
K1	220/85
K2	135/85
K3	165/85
Strati	070/20

Tab. 3.33 Sistemi di discontinuità riconosciuti

Fig. 3.44 Ciclografiche delle famiglie di discontinuità - proiezione aree uguali - emisfero inferiore.



La stazione 2 si trova sul versante orientale della Collina dei Camaldoli, incombente su Soccavo; ; è caratterizzata da un'inclinazione di circa 85° e da un azimut di immersione di circa 160° . Sono state riconosciute 3 famiglie di giunti, oltre agli strati. È interessante osservare la congruenza tra le famiglie di discontinuità principali riconosciute nella stazione 1 e nella stazione 2; anche in questo caso, come per la stazione 1, il fronte risulta per lo più stabile.

Stazione 3

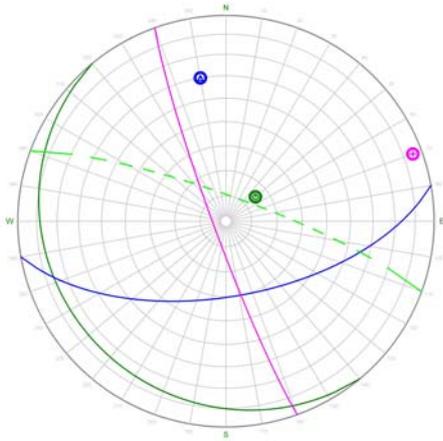
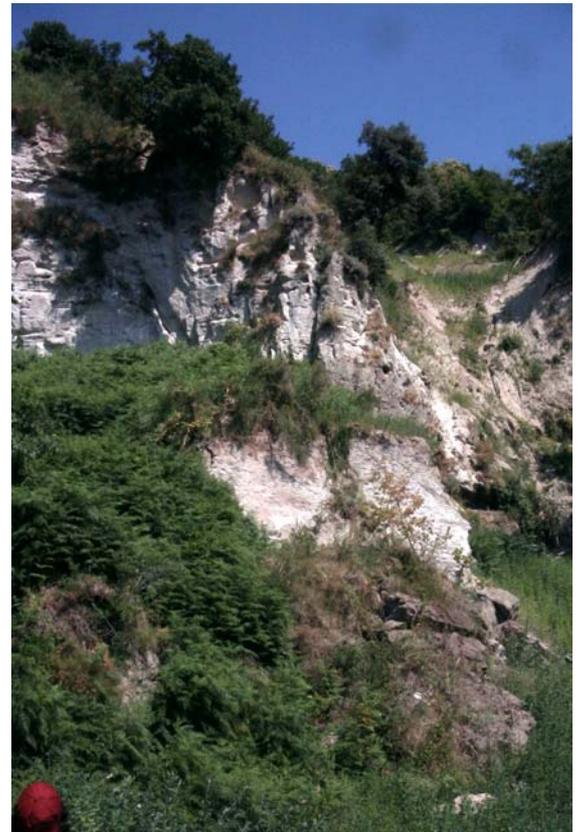


Fig. 3.45 Ciclografiche delle famiglie di discontinuità - proiezione aree uguali - emisfero inferiore.

Stazione 3	
Sistema	Giacitura
K1	170/60
K2	250/85
Strati	230/15

Tab. 3.34 Sistemi di discontinuità riconosciuti



La stazione 3 è situata sul versante occidentale della Collina dei Camaldoli, incombenza sull'abitato di Pianura; è caratterizzata da un'inclinazione di circa 80° e da un'azimut di immersione di circa 70° . Dall'osservazione delle ciclografiche rappresentanti le principali famiglie di discontinuità, risulta che i meccanismi di rottura potenzialmente innescabili su tale fronte sono scivolamenti a cuneo tra le famiglie K2 e K3 e tra K2 e gli strati.

Stazione 4

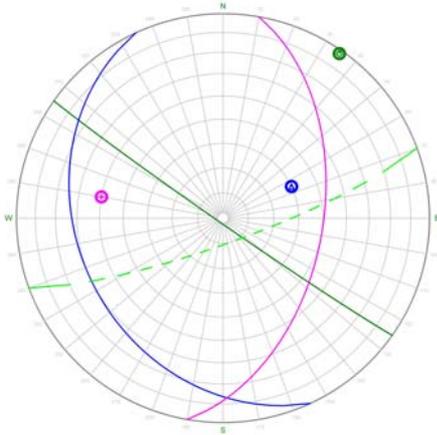
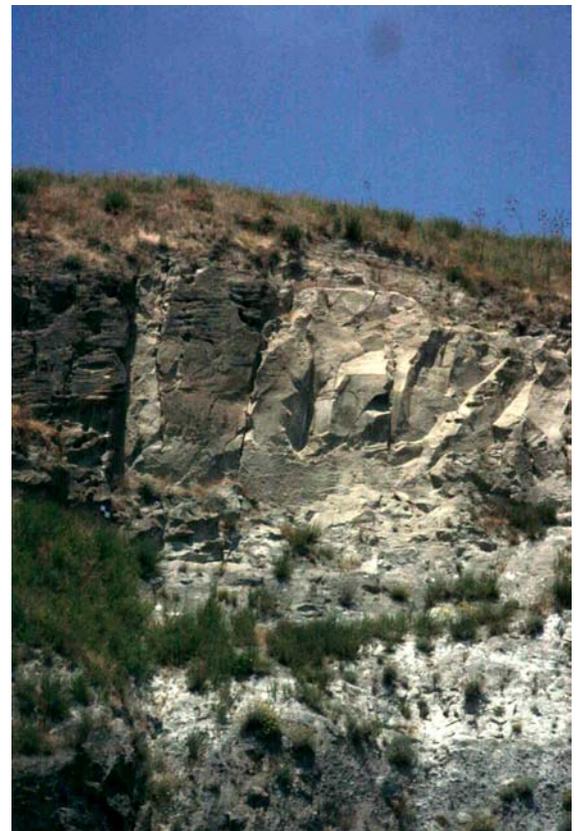
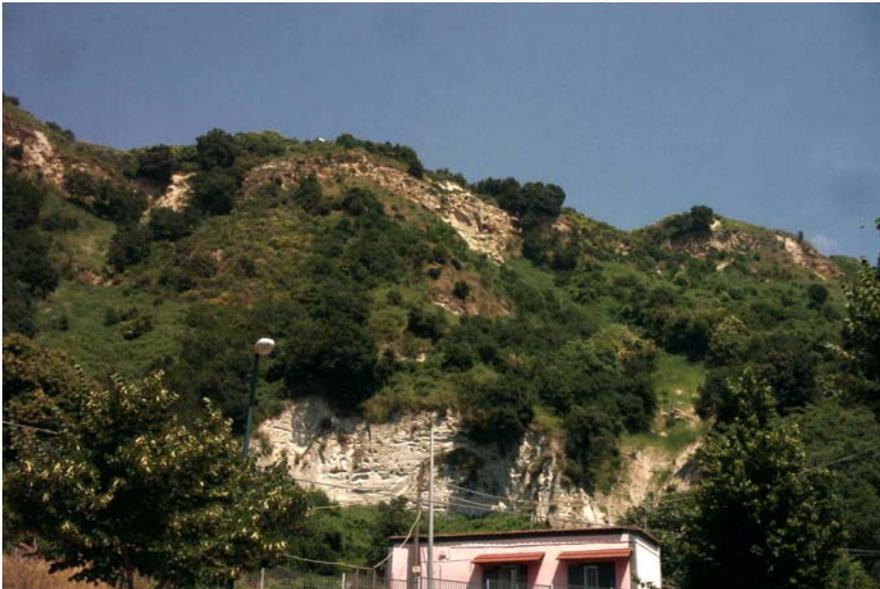


Fig. 3.46 Ciclografiche delle ramiglie di discontinuità - proiezione aree uguali - emisfero inferiore.

Stazione 3	
Sistema	Giacitura
K1	215/88
K2	100/50
Strati	245/30

Tab. 3.35 Sistemi di discontinuità riconosciuti



La stazione 4 è situata sul versante occidentale della Collina dei Camaldoli, incumbente sull'abitato di Pianura; è caratterizzata da un'inclinazione di circa 80° e da un azimut di immersione di circa 170° . Dall'osservazione delle ciclografiche rappresentanti le principali famiglie di discontinuità, non si notano evidenti meccanismi di rottura potenzialmente innescabili su tale fronte, di conseguenza si ritiene che il fronte sia in una condizione complessiva di sostanziale stabilità.

3.5 APPLICAZIONE DEL METODO RES ALLE AREE DI STUDIO

3.5.1 PARAMETRI CHE INFLUENZANO IL SISTEMA

Per una corretta applicazione della presente metodologia al caso in esame è opportuno valutare i parametri costituenti la matrice del RES, ritenuti determinanti per lo scopo dello studio.

Nel presente studio è stata adottata una matrice dei parametri a 21 elementi, i quali sono descritti di seguito nelle loro caratteristiche.

- Geologia e struttura
- Condizioni climatiche ed ambientali
- Precedente instabilità
- Resistenza del materiale roccioso
- Caratteristiche delle discontinuità
- Volume di Roccia Unitario
- Meccanismi di rottura
- Resistenza della massa rocciosa
- Caratteristiche del versante
- Sismicità
- Instabilità potenziale

Alcuni di questi parametri sono stati poi sviluppati suddividendoli in ulteriori sotto elementi:

- Geologia e struttura
 - Litologia
 - Faglie
- Condizioni climatiche ed ambientali
 - Precipitazioni
 - Azione del vento
- Resistenza del materiale roccioso
 - Resistenza della roccia intatta
 - Erosione

- Caratteristiche delle discontinuità
 - Numero delle famiglie di discontinuità
 - Orientazione delle discontinuità
 - Apertura delle discontinuità
 - Persistenza delle discontinuità
 - Spaziatura delle discontinuità
 - Proprietà meccaniche delle discontinuità
- Caratteristiche del versante
 - Orientazione della scarpata
 - Dimensioni della scarpata
 - Acclività della scarpata

Il significato di ciascun parametro è commentato di seguito.

Litologia. Le caratteristiche litologiche degli ammassi devono indicare omogeneità o disomogeneità della formazione, stratificazioni, massività ecc., che sono evidentemente fattori influenzanti il sistema.

Faglie. Le faglie sono, per entrambe le aree di studio, tra i fattori più importanti. Per quanto riguarda la Collina dei Camaldoli, così come descritto nel paragrafo di inquadramento geologico e geomorfologico dell'area, essa costituisce un "alto" morfostrutturale delimitato, a Sud ed a Ovest, da ripidi versanti connessi ai fenomeni di collasso vulcano-tettonico responsabili della formazione della caldera dell'Ignimbrite Campana (39.000 anni dal presente) e della caldera del Tufo Giallo Napoletano (12.000 anni dal presente). Di conseguenza in tale area il controllo strutturale è evidente.

Viceversa il rilievo calcareo - dolomitico del Monte Saretto rappresenta una monoclinale, caratterizzata da un'acclività degli strati di circa 30° verso il quadrante NE. Le faglie che interessano la struttura generalmente possono essere raggruppate principalmente in tre sistemi: uno di direzione appenninica (NW-SE) che comprende le grandi faglie perimetrali, un altro ortogonale a questo (antiappenninico), un terzo sistema con direzione all'incirca NS.

Precipitazioni. Per la Collina dei Camaldoli, l'assorbimento di acqua da parte di materiali come il tufo determina differenze nelle resistenze della roccia e, sebbene l'azione delle

precipitazioni potrebbe non essere la causa diretta dell'apertura di nuove fratture, potrebbe invece essere la causa di un progressivo allargamento di fratture preesistenti.

Entrambe le aree di studio ricadono in zone a volte interessate da precipitazioni intense, le quali condizionano il comportamento delle acque dilavanti e la loro capacità erosiva.

È evidente che la possibilità che l'acqua di precipitazione penetri nell'ammasso dipenderà dalla disposizione, dalla frequenza e dalla persistenza delle fratture presenti.

Azione del vento. In entrambi i casi di studio, non risulta un fattore determinante nell'ambito dell'intero sistema.

Instabilità precedente. La presenza di movimenti franosi in un'area è la dimostrazione che una combinazione di fattori rende ancora possibile ulteriori frane. Dalla conoscenza di alcuni fenomeni passati e dalle loro frequenze si può capire come questi fattori potrebbero influenzare l'instabilità futura di un versante.

Resistenza della roccia intatta. Questo parametro può contribuire a far conoscere la resistenza dell'intero ammasso roccioso.

Per la Collina dei Camaldoli, deve essere tenuto conto che l'alta anisotropia di caratteristiche di resistenza al taglio, trazione e compressione di alcune formazioni tufacee può localmente essere causa di instabilità, indipendentemente dai grandi sistemi di fratturazione dell'ammasso.

Per quanto riguarda il Monte Saretto, avendo a che fare con un massiccio calcareo, tale resistenza sarà elevata, inoltre risulterà piuttosto omogenea, quindi non caratteristica per l'intero ammasso roccioso.

Erosione. Anche in questo caso è doveroso fare una netta distinzione tra le due aree di studio. Per quanto riguarda il TGN, l'erosione potrebbe risultare un fattore molto influente, ma la difficoltà della sua valutazione ne fa un dato scarsamente applicabile al caso di studio. Viceversa, è nota la scarsa erodibilità delle rocce calcaree, ma tale parametro è ritenuto significativo anche nell'area di studio del Monte Saretto, perché influenza l'aspetto delle pareti delle discontinuità, ossia la loro maggiore o minore rugosità.

Numero delle famiglie di discontinuità. La conoscenza delle principali famiglie di discontinuità presenti in un ammasso dà la possibilità di conoscere i piani di orientazione

critica che favorirebbero i meccanismi di frana. L'esame è stato effettuato mediante proiezioni stereografiche polari di Schmidt dei giunti rilevati negli ammassi.

Orientazione delle discontinuità. Lo studio dettagliato delle orientazioni attraverso diagrammi polari può definire le geometrie delle zone di distacco dei blocchi. Per considerazioni relative ad entrambe le aree di studio si rimanda ai rispettivi paragrafi di inquadramento geostrutturale e geomeccanico.

Apertura delle discontinuità. È senza dubbio un fattore predisponente l'instabilità di un pendio. La resistenza al taglio lungo le superfici di una frattura, infatti, si annulla per discontinuità le cui pareti non sono a contatto tra loro e quanto più le superfici del giunto sono distanti, tanto maggiore è lo stato di *stress* a cui quell'ammasso risulta essere sottoposto. In tutti i casi esaminati, per entrambe le aree di studio, le discontinuità si presentano generalmente sempre asciutte e senza materiale di riempimento.

Persistenza delle discontinuità. Maggiore è la persistenza delle discontinuità (persistenza=lunghezza), maggiori sono le probabilità che grossi blocchi si formino e determinino un'instabilità di ampie proporzioni.

Spaziatura delle discontinuità. È un fattore che determina le dimensioni dei blocchi in frana nonché le dimensioni di un versante. È stato notato, infatti, che le porzioni di versante interessate dai crolli sono direttamente proporzionali al valore medio della spaziatura riscontrata.

Proprietà meccaniche delle discontinuità. È un fattore che consente di conoscere la modalità di produzione delle tensioni di taglio lungo i piani di frattura. Senza dubbio, gli elementi di maggiore importanza risultano essere la rugosità delle superfici di discontinuità e la resistenza del materiale lungo queste superfici misurata con il martello di Schmidt.

Volume di Roccia Unitario. Tale parametro è stato ottenuto a partire dai dati relativi alla persistenza ed alla spaziatura delle principali famiglie di discontinuità, ricavati dai rilievi geomeccanici realizzati in sito.

Meccanismi di rottura. Per entrambe le aree di studio si è proceduto all'osservazione delle proiezioni stereografiche polari, per riconoscere i meccanismi di rottura potenzialmente innescabili nelle diverse stazioni di misura. Le osservazioni qualitative sono state verificate con l'applicazione di un programma in linguaggio DOS di facile applicazione (RSLOPE -

Leung, 1991), il quale consente di individuare i meccanismi di rottura che potenzialmente si instaurerebbero sul versante in caso di instabilità.

Resistenza della massa rocciosa. Le proprietà della roccia intatta e delle discontinuità concorrono a definire le caratteristiche dell'intero ammasso. L'importanza di considerare l'indice RMR deriva dal fatto che questo indice racchiude in sé gli elementi principali di un ammasso roccioso.

Orientazione della scarpata. Utile per identificare le direzioni critiche. Per quanto riguarda gli ammassi tufacei, il sub-parallelismo tra giacitura dei giunti e direzione della scarpata è la principale causa di instabilità. Inoltre, per entrambe le aree di studio, l'esposizione della scarpata ai raggi del sole può favorire il deterioramento delle proprietà meccaniche degli ammassi e favorire i crolli.

Dimensione della scarpata. Essenziale per determinare la scala dei fenomeni di instabilità che si potrebbero verificare o che si sono verificati, in particolare deve essere tenuto conto del ruolo gravitazionale che le alte scarpate esercitano sui blocchi in caduta, che potrebbero raggiungere anche distanze ragguardevoli dalla zona di distacco [Calcaterra et al., 2004b].

Acclività delle scarpate. È stato riconosciuto che, a parità di altre di condizioni, i fronti caratterizzati da un elevato grado di acclività risultano potenzialmente più instabili di altri con valori di acclività più modesti.

Sismicità. Anche se tale agente non è ritenuto direttamente determinante, è necessario valutarne l'interazione con gli altri parametri, trovandoci in entrambi i casi in aree ritenute sismiche. In particolare, secondo la nuova classificazione ufficiale dell'anno 2002, entrambe le aree di studio sono classificate appartenenti alla categoria sismica: Media Sismicità.

Instabilità potenziale. Questo rappresenta l'obiettivo di questa prima fase dell'applicazione del RES; per tale motivo deve essere inserito nella matrice al fine di quantificare le influenze che tutti i parametri hanno su di esso. Si tratta, in pratica, di identificare il numero delle interazioni tra questo parametro e tutti gli altri. In un secondo momento, quando si passerà allo sviluppo semiquantitativo, il parametro sarà escluso.

La matrice delle interazioni codificata è riportata di seguito, i valori attribuiti alle diverse interazioni binarie descrivono l'influenza reciproca dei vari parametri tra loro. Il valore nullo indica i casi di interazione inesistente tra i due relativi termini.

litologia	3	0	0	3	3	0	0	1	3	1	2	3	2	3	2	0	2	3	0	2		33
0	presenza di faglie	0	0	0	3	4	3	2	3	3	3	4	3	3	2	4	3	3	3	4		50
0	0	Precipitazioni	0	3	3	0	0	2	0	0	2	4	2	3	0	0	0	0	0	3		22
0	0	0	Azione del vento	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1		4
0	0	0	0	Resistenza della roccia intatta	4	0	0	0	0	3	2	0	0	2	0	0	0	0	0	0		11
0	0	0	0	3	Erosione	0	0	3	0	0	3	1	1	2	0	0	0	1	0	2		16
0	0	0	0	0	3	Numero famiglie discontinuità	0	1	1	1	0	3	3	3	4	0	0	0	0	3		22
0	0	0	0	0	3	1	Orientazione delle discontinuità	1	1	1	0	2	4	4	4	0	0	0	0	4		25
0	0	0	0	0	4	1	1	Apertura delle discontinuità	2	2	2	3	4	4	3	0	0	0	0	3		29
0	0	0	0	0	1	0	0	1	Persistenza delle discontinuità	2	1	3	3	2	2	0	0	0	0	2		17
0	0	0	0	0	1	1	0	1	1	Spaziatura delle discontinuità	2	4	4	3	2	0	0	0	0	2		21
0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	Proprietà meccaniche discontinuità	3	2	3	2	0	0	0	0	2		13
0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0	RMR	2	4	3	0	0	0	0	4		19	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	V.R.U.	3	3	0	0	0	0	3		11
0	0	0	0	0	2	1	1	3	2	1	0	4	2	Precedente Instabilità	1	0	1	1	0	4		23
0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	0	3	2	2	Meccanismi di rottura	0	0	0	0	2		15
0	0	0	0	0	2	1	2	2	2	2	2	2	3	2	3	Orientazione scarpata	1	1	0	3		28
0	2	0	0	0	1	2	0	0	2	2	0	1	1	2	0	0	Dimensione fronte	0	0	2		15
0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	1	1	3	2	0	1	Acclività del versante	0	2		12
0	0	0	0	1	2	2	3	3	2	2	0	2	2	1	1	3	1	2	Sismicità	1		28
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Instabilità Potenziale		0
0	5	0	0	13	39	14	11	22	20	21	19	46	41	50	34	7	9	11	3	49		

3.5.2 INTERATTIVITÀ DEL SISTEMA

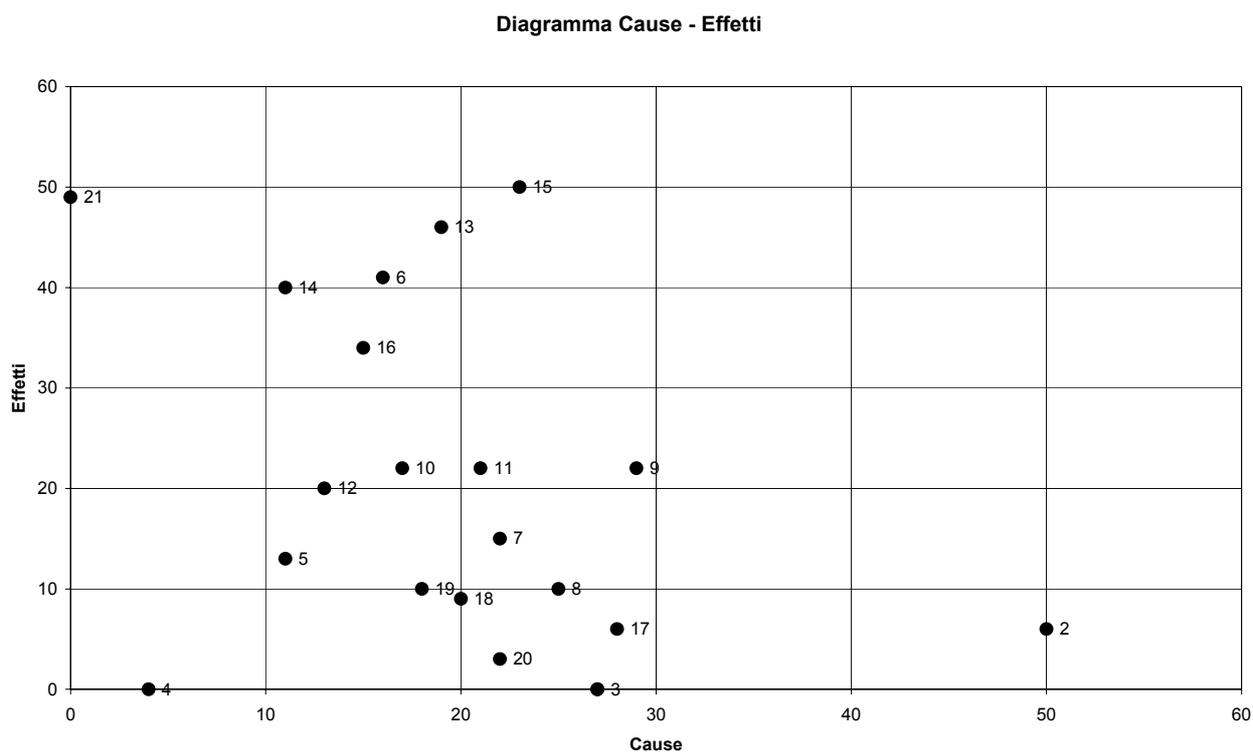
Per interattività si intende la somma dei valori di causa e di effetto associati ad ogni parametro; tale valore corrisponde, inoltre, al termine I_i utilizzato per il calcolo dell'indice di suscettibilità così come descritto nel paragrafo 3.5.4.1.

Dall'osservazione del diagramma cause - effetti di questo sistema (Fig. 3.47), si possono fare le seguenti considerazioni:

- Il parametro più interattivo è la precedente instabilità. Tutti i parametri, infatti, interagiscono in qualche modo con questo elemento, il che rimarca l'importanza della "storia" di un versante. I parametri meno interattivi sono, in ordine crescente di interattività: l'azione del vento, la dimensione e l'acclività del fronte. Questi, infatti, solo se considerati nel caso specifico di certe situazioni, possono avere un effetto determinante sul sistema, ma in un discorso generale evidentemente influiscono meno degli altri.
- I parametri più dominanti sono le faglie e la litologia; la loro azione è diretta sul sistema ed è poco o per nulla influenzata da esso. I parametri più subordinati risultano invece la resistenza della massa rocciosa, il Volume di Roccia Unitario e l'erosione.

Tutti i parametri con $E=0$ sono quelli la cui influenza sul sistema è totale, cioè agiscono senza subire alcun tipo di modifiche da ciò che li circonda, mentre quelli con $C=0$ (l'instabilità potenziale), sono i parametri la cui importanza è determinata solo dall'influenza che il sistema ha su di loro.

La maggior parte dei parametri non ha una grande dispersione nel diagramma ma si addensa attorno alla diagonale $C=E$, come ad esempio la persistenza delle discontinuità; questo significa che questi elementi influiscono sul sistema almeno nella misura in cui sono influenzati da esso.



1. Litologia	2. Presenza di faglie	3. Precipitazioni	4. Azione del Vento
5. Resistenza della Roccia Intatta	6. Erosione	7. Numero Discontinuità	8. Orientazione Discontinuità
9. Apertura Discontinuità	10. Persistenza Discontinuità	11. Spaziatura Discontinuità	12. Proprietà Meccaniche Discontinuità
13. RMR	14. VRU	15. Precedente Instabilità	16. Meccanismi di Rottura
17. Orientazione del Fronte	18. Dimensione del Fronte	19. Acclività del Fronte	20. Sismicità
21. Instabilità Potenziale			

Figura 3.47 Diagramma Cause - Effetti.

Osservando l'istogramma delle Intensità Interattive (Fig. 3.48), si nota che non emergono grossi scarti di interattività; di conseguenza, risulta abbastanza difficile stabilire quali sono gli elementi caratterizzanti. Ad esclusione dei parametri "azione del vento" e "precedente instabilità", che sono i parametri caratterizzati dai valori minimo e massimo di interattività, l'istogramma delle interattività si presenta piuttosto omogeneo; di conseguenza, solo attraverso una valutazione percentuale dell'influenza dei vari parametri si può operare una valutazione in merito a quelli che appaiono principali o secondari.

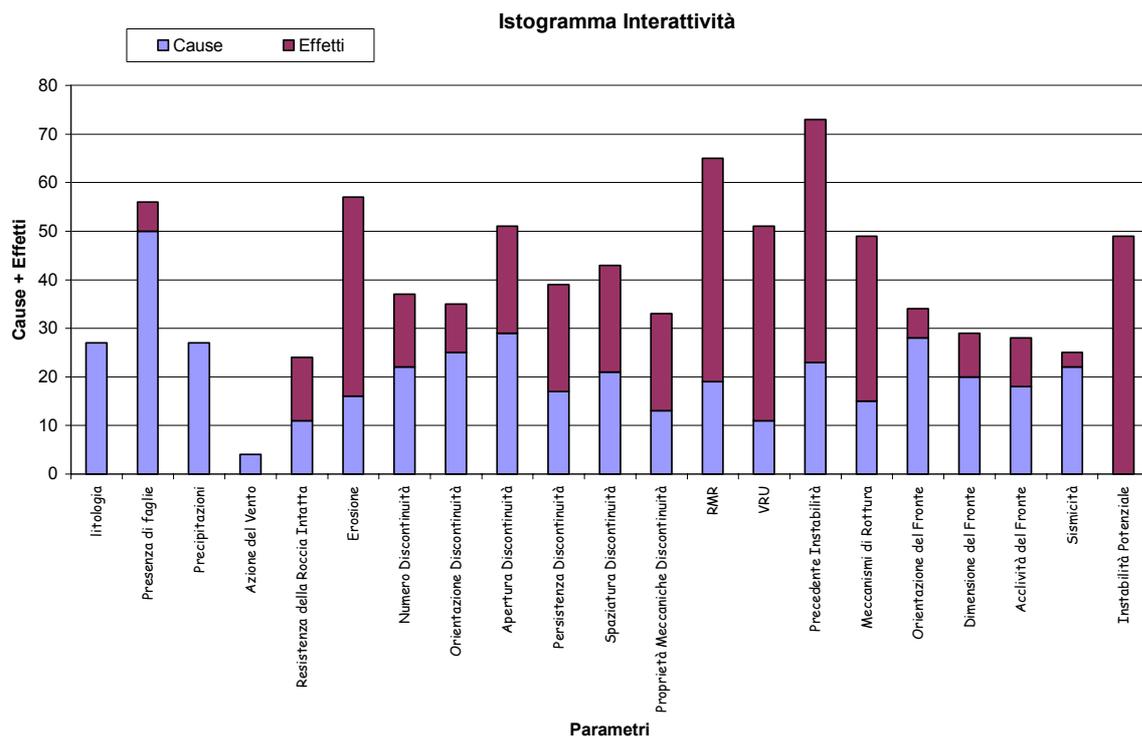


Figura 3.48 Istogramma delle Intensità Interattive.

Per l'applicazione del *Predictability Rating* sono stati calcolati i termini di interattività percentuale, semplicemente rapportando al termine di interattività totale dell'intera matrice quello di ogni singolo parametro; ordinando, quindi, in ordine decrescente i termini, sono stati sommati i valori calcolati fino ad ottenere una interattività percentuale dell'80 - 90% in accordo con quanto descritto nel paragrafo 3.5.4.1.

	<i>Parametri</i>	<i>Cause</i>	<i>Effetti</i>	<i>C + E</i>	<i>C + E %</i>
15	<i>Precedente Instabilità</i>	23	50	73	9.28
13	<i>RMR</i>	19	46	65	8.26
6	<i>Erosione</i>	16	41	57	7.24
2	<i>Presenza di faglie</i>	50	6	56	7.12
9	<i>Apertura Discontinuità</i>	29	22	51	6.48
14	<i>VRU</i>	11	40	51	6.48
16	<i>Meccanismi di Rottura</i>	15	34	49	6.23
11	<i>Spaziatura Discontinuità</i>	21	22	43	5.46
10	<i>Persistenza Discontinuità</i>	17	22	39	4.96
7	<i>Numero Discontinuità</i>	22	15	37	4.70
8	<i>Orientazione Discontinuità</i>	25	10	35	4.45
17	<i>Orientazione del Fronte</i>	28	6	34	4.32
12	<i>Proprietà Meccaniche Discontinuità</i>	13	20	33	4.19
18	<i>Dimensione del Fronte</i>	20	9	29	3.68
19	<i>Acclività del Fronte</i>	18	10	28	3.56
1	<i>litologia</i>	27	0	27	3.43
3	<i>Precipitazioni</i>	27	0	27	3.43
20	<i>Sismicità</i>	22	3	25	3.18
5	<i>Resistenza della Roccia Intatta</i>	11	13	24	3.05
4	<i>Azione del Vento</i>	4	0	4	0.51

Tabella 3.36 Valori Cause - Effetti e Interattività percentuali.

Il procedimento descritto, pertanto, ha portato all'esclusione di quei termini che hanno una bassa interattività percentuale associata. La sommatoria è stata interrotta nel momento in cui si è giunti al valore del 93%; questo ha comportato che i termini esclusi siano quelli a partire dal parametro sismicità, fino all'azione del vento (Tab. 3.36).

La potenziale instabilità, quindi, si valuterà implementando una classificazione semiquantitativa sui restanti termini.

3.5.3 SVILUPPO SEMIQUANTITATIVO

Lo sviluppo dell'obiettivo del presente studio è stato effettuato affrontando una doppia classificazione semiquantitativa. La prima ha riguardato la classificazione dei termini che costituiscono la matrice del RES per quantificare la differente importanza che essi hanno all'interno del sistema.

La matrice è stata codificata secondo una classificazione a cinque valori (0-4):

0. nessuna interazione
1. interazione debole
2. interazione media
3. interazione forte
4. interazione critica.

In questa prima parte dello studio, si è proceduto univocamente per entrambe le aree di studio. Infatti, questa prima classificazione è realizzata in maniera generale, prendendo in considerazione tutti i parametri che concorrono a determinare la potenziale instabilità di un versante roccioso, a prescindere dalla propria natura litologica e posizione geografica.

Lo schema basato su 5 valori è stato ripreso dallo studio di Migliore (2001) effettuato nell'area flegrea, mantenendolo inalterato anche per l'altro caso di studio.

Per quanto riguarda l'area di studio della Collina dei Camaldoli, si ha, ovviamente, un'elevata affinità con i versanti tufacei dell'area flegrea studiati nel lavoro di Migliore (2001).

Viceversa, nel caso del versante meridionale del Monte Saretto, la natura litologica e l'esposizione del versante risultano nettamente differenti rispetto al caso precedentemente considerato; ciò nonostante, dopo avere effettuato un'approfondita analisi parametrica, si è ritenuto opportuno mantenere inalterata la codifica della matrice, in modo da poter procedere parallelamente su entrambe le aree di studio, almeno in questa prima fase di lavoro. Lo scopo di tale approssimazione è quello di implementare un procedimento adattabile a siti di studio anche notevolmente differenti tra loro.

La seconda classificazione semiquantitativa, invece, riguarda la distribuzione dei valori associati ad ogni singolo parametro. Si tratta, in pratica, di dividere i valori associati al parametro secondo una classificazione, ad esempio a tre livelli, ed attribuire ad ogni classe

un valore numerico che esprima il peso che ha quel valore sull'instabilità generale del versante.

In particolare, in questo studio, si è scelta una classificazione a tre livelli, attribuendo i pesi: 0 per indicare bassa influenza, 1 per indicare media influenza e 2 per indicare alta influenza.

Questa seconda fase dello sviluppo semiquantitativo deve essere necessariamente svolta separatamente per le due aree di studio. Infatti, si valuta il peso di ogni singolo parametro relativamente allo specifico caso di studio.

3.5.4 IMPLEMENTAZIONE DEL METODO RES IN AMBIENTE GIS

3.5.4.1 IL MONTE SARETTO

Come precedentemente detto, questa fase di ricerca è stata svolta separatamente per le due aree di studio. In questo paragrafo esamineremo lo sviluppo semiquantitativo implementato in ambiente GIS per l'area di studio del Monte Saretto.

Grazie ai sistemi informativi geografici (GIS) (paragrafi 2.2.5 e 3.3) è stato possibile sviluppare le procedure necessarie che hanno consentito l'applicazione della metodologia proposta. Tramite *software* di impronta GIS (ArcGis - ESRI) sono stati utilizzati i dati digitali disponibili ed a questi sono stati aggiunti tutti i nuovi dati ottenuti nella fase di indagine di campagna.

Per prima cosa, è necessario spiegare brevemente perché alcuni parametri, seppur rientranti nella classifica di interattività descritta precedentemente, sono stati esclusi dallo sviluppo dello studio. I parametri esclusi sono: litologia ed erosione.

Per quanto riguarda il parametro "litologia", questo risulta essere ridondante all'interno del sistema: infatti gli ammassi rocciosi studiati, in questa area di studio, sono tutti costituiti da calcari. Per tale motivo non è significativo includere tale parametro nell'elaborazione dell'RMII.

Il parametro "erosione" è stato trascurato in quanto ritenuto di scarsa significatività, siccome sono state considerate rocce lapidee, quindi poco sensibili all'azione erosiva degli agenti atmosferici.

Lo sviluppo semiquantitativo ha, pertanto, coinvolto lo studio di tredici termini, che hanno permesso la valutazione dell'indice di suscettibilità all'innescò per frane da crollo del versante meridionale del Monte Saretto, oggetto dello studio.

Per lo sviluppo del modello sono stati adoperati i seguenti dati digitali georiferiti nel sistema di coordinate metriche Gauss-Boaga:

- il rilievo fotogrammetrico del versante meridionale del Monte Saretto, fornita dal Commissariato per l'Emergenza Idrogeologica nella Regione Campania (scala 1:1000);
- la Carta delle Coperture Piroclastiche del versante meridionale del Monte Saretto, fornita dal Commissariato per l'Emergenza Idrogeologica nella Regione Campania (scala 1:2000);

- la Carta Morfostrutturale del versante meridionale del Monte Saretto, elaborata dalla S.I.A. Geognostica s.r.l., in scala 1:2000);
- la Carta dell'Uso del Suolo del versante meridionale del Monte Saretto, fornita dal Commissariato per l'Emergenza Idrogeologica nella Regione Campania (scala 1:2000);
- la Carta dell'ubicazione dell'evento franoso avvenuto nell'Aprile del 2005, del versante meridionale del Monte Saretto, fornita dal Commissariato per l'Emergenza Idrogeologica nella Regione Campania;
- il modello digitale del terreno (DTM), ricavato dal rilievo fotogrammetrico del Monte Saretto.

Dal modello digitale del terreno, attraverso l'esecuzione di applicativi del software GIS utilizzato, sono state derivate le Carte delle acclività e della esposizione dei versanti.

Nell'ambito dell'area di studio i versanti sono stati individuati attraverso lo studio geostrutturale e geomeccanico eseguito dalla S.I.A. Geognostica s.r.l., relativo al lavoro per gli "Interventi di risanamento del Monte Saretto"; a partire da questo sono stati rielaborati e verificati i risultati ottenuti, al fine di ottenere dati di partenza omogenei sull'intera area di ricerca.

Successivamente è stata affrontata la fase di caratterizzazione dei versanti con l'inserimento dei dati ottenuti nella fase di indagini di campagna (v. par. 3.4.1). Questa operazione è stata effettuata posizionando sulla Carta geolitologica gli stendimenti eseguiti ed individuando sulle aree adiacenti gli affioramenti calcarei a cui è possibile assegnare caratteristiche geomeccaniche omogenee.

In particolare, dalla S.I.A. Geognostica s.r.l. sono state eseguite 18 stazioni geomeccaniche ed individuati 11 fronti con differenti caratteristiche geostrutturali. Al fine di poter applicare il RES all'intera area di studio, si è cercato di assegnare parametri geomeccanici significativi anche alle porzioni di versante caratterizzate dalla presenza di substrato affiorante, ma non esaminate dalla S.I.A., a causa della difficile accessibilità.

Sono quindi stati individuati altri 6 fronti; inoltre alcuni degli 11 fronti iniziali sono stati ridefiniti in termini di estensione anche in modo da racchiudere al loro interno porzioni di substrato affiorante che si supponga abbiano comportamento uniforme, data la loro distribuzione nello spazio; nella Tavola 3.7 sono indicati i fronti considerati nell'applicazione del RES per il Monte Saretto.

Al fine di caratterizzare dal punto di vista geomeccanico l'intera area di studio, sono stati individuati altri 7 fronti. Su questi ultimi, a causa della loro scarsa accessibilità, non è stato possibile effettuare stazioni di misura. Di conseguenza, su ciascun fronte, i parametri geomeccanici sono stati assegnati facendo la media tra i valori dei parametri delle stazioni di misura più vicine.

Di seguito si riportano schematicamente le associazioni svolte:

- fronte 12 – media tra le stazioni 1, 2 e 3;
- fronte 13 – media tra le stazioni 3 e 7;
- fronte 14 – media tra le stazioni 6, 7, 8 e 9;
- fronti 15, 16 e 17 – media tra tutte le stazioni di misura, dalla 1 alla 14.

L'individuazione delle 3 classi stabilite dalla classificazione semiquantitativa adottata è stata svolta sulla base della distribuzione che hanno mostrato i parametri della matrice.

In particolare, ai parametri sono stati attribuiti 3 diversi valori:

- 0 = neutrale;
- 1 = contribuente;
- 2 = determinante per l'instabilità;

più alti quanto più scadente è risultato il valore del parametro e quanto più influente è risultato il parametro ai fini della valutazione della suscettibilità.

La descrizione di tutti i parametri merita un'ulteriore chiarificazione.

Il termine "presenza di faglie" è stato valutato a partire dall'osservazione della Carta morfostrutturale ed i relativi pesi sono stati attribuiti come individuato nella Tabella 3.37.

	Classe	Peso
1 ^a	non presenti	0
2 ^a	presenza di 1 faglia	1
3 ^a	presenza di 2 (>) faglie	2

Tabella 3.37 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.
Presenza di faglie

Il termine “precedente instabilità” è tra gli elementi di maggior rilievo del sistema. Innanzitutto il verificarsi di una frana modifica la struttura del versante nell’area di distacco e in quella di accumulo; in secondo luogo si ha un peggioramento progressivo delle caratteristiche meccaniche nella zona di distacco a causa della maggiore esposizione delle rocce agli agenti atmosferici. Una considerazione in parte positiva può essere rivolta al fatto che localmente la frana ha l’effetto di modificare – riducendola in alcune zone, aumentandola in altre – l’acclività del versante. Per la valutazione del termine “precedente instabilità” si è fatto esclusivamente riferimento all’evento franoso avvenuto nell’Aprile 2005, non avendo a disposizione informazioni in merito ad altri crolli avvenuti nei versanti in studio.

A tal proposito, si è fatto riferimento alla classifica di Cruden & Varnes (1996), relativamente allo stato di attività:

frana inattiva: il fenomeno non può essere riattivato dalle proprie cause originali, e la scarpata si è stabilizzata, per cause naturali o artificiali;

frana quiescente: il fenomeno può essere riattivato dalle proprie cause naturali, ma non ci sono state riattivazioni nell’ultimo anno;

frana attiva: scarpata attualmente in movimento o che ne ha subiti nell’ultimo ciclo stagionale. Ai tre stati di attività è stato assegnato il peso indicato nella Tabella 3.38.

	Classe	Peso
1 ^a	frana inattiva	0
2 ^a	frana quiescente	1
3 ^a	frana attiva	2

Tabella 3.38 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

Al termine “apertura delle discontinuità” si è attribuito un peso tanto maggiore quanto maggiore è il valore di apertura. Aperture maggiori, infatti, comportano blocchi maggiormente separati gli uni dagli altri, il che a sua volta determina un più alto potenziale di instabilità.

I limiti individuati ed i pesi attribuiti sono indicati nella Tabella 3.39.

	Classe	Peso
1 ^a	< 0,5 mm	0
2 ^a	0,5 - 10 mm	1
3 ^a	> 10 mm	2

Tabella 3.39 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

Anche al termine “persistenza” (lunghezza della discontinuità) è stato attribuito un peso tanto maggiore quanto maggiore è il suo valore. Una lunghezza maggiore, infatti, comporta che le discontinuità presenti si intersechino tra loro con una maggiore probabilità di avere un alto numero di blocchi, ciò determina la riduzione della resistenza globale dell’ammasso roccioso.

I limiti individuati ed i pesi attribuiti sono indicati nella Tabella 3.40.

	Classe	Peso
1 ^a	0 - 1 m	0
2 ^a	1 - 3 m	1
3 ^a	3 - 10 m	2

Tabella 3.40 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

Per quanto riguarda il termine “spaziatura delle discontinuità”, invece, è stato dato un peso maggiore quanto minore era il valore del parametro. Questo perché a valori di spaziatura minori corrisponde un maggior numero di discontinuità quindi un ammasso globalmente più fratturato e generalmente più suscettibile al dissesto.

I limiti individuati ed i pesi attribuiti sono indicati nella Tabella 3.41.

	Classe	Peso
1 ^a	> 2 m	0
2 ^a	1 - 2 m	1
3 ^a	< 1 m	2

Tabella 3.42 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

Analogamente al caso precedente, anche al termine “resistenza delle discontinuità” (Fig. 3.49) si è attribuito un peso tanto maggiore quanto minore è il suo valore. Questo termine, valutato attraverso la resistenza a compressione della roccia lungo le discontinuità, può essere considerato proporzionale alle sollecitazioni che il blocco roccioso è in grado di sopportare. Per questo motivo ammassi con discontinuità meno resistenti saranno più suscettibili al dissesto.

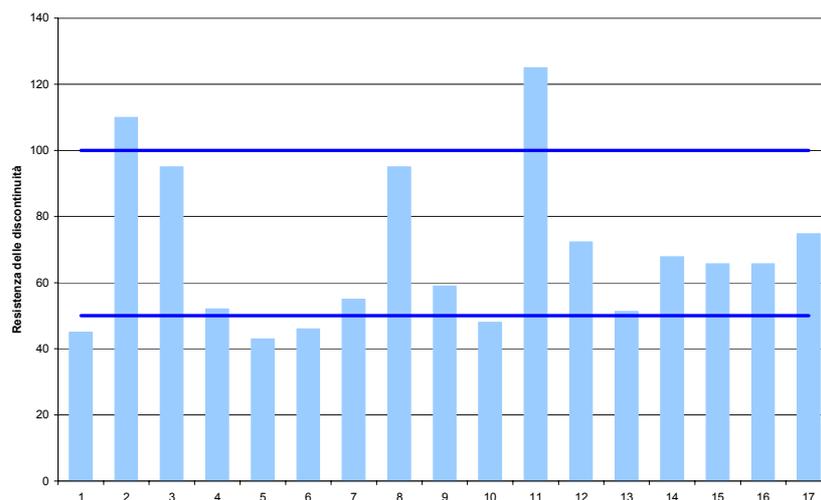


Figura 3.49 Distribuzione del parametro resistenza delle discontinuità ed individuazione delle classi.

I limiti individuati ed i pesi attribuiti sono indicati nella Tabella 3.44:

	Classe	Peso
1 ^a	> 100 MPa	0
2 ^a	50 - 100 MPa	1
3 ^a	< 50 MPa	2

Tabella 3.44 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

Al termine “numero di famiglie di discontinuità” si è attribuito un punteggio tanto maggiore quanto maggiori sono le famiglie individuate sul versante. Al crescere delle famiglie di discontinuità, infatti, aumenta lo stato globale di fratturazione dell’ammasso, aumenta il numero di blocchi che possono formarsi e diminuiscono le caratteristiche complessive di resistenza rendendo, perciò, l’ammasso roccioso più suscettibile al dissesto. I limiti individuati ed i pesi attribuiti sono indicati nella Tabella 3.45.

	Classe	Peso
1 ^a	< 2 famiglie	0
2 ^a	3 famiglie	1
3 ^a	> 3 famiglie	2

Tabella 3.45 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

Il termine “*Rock Mass Rating*” (Fig. 3.50), oltre ad essere tra i termini a maggiore interattività, è quello che verosimilmente descrive in maniera migliore le caratteristiche di resistenza di un ammasso roccioso. Anche per questo termine è stato attribuito un peso maggiore quanto più basso è il suo valore; bassi valori di RMR, infatti, stanno ad indicare un ammasso roccioso dalle caratteristiche più scadenti e, quindi, più soggetto al dissesto.

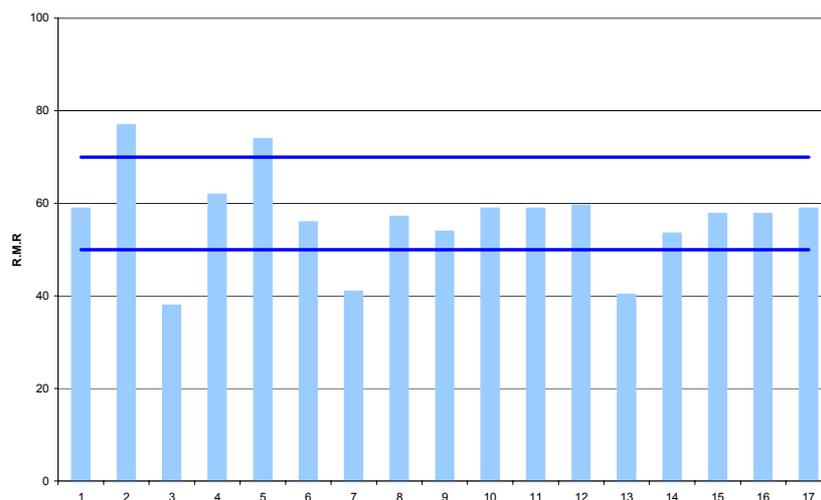


Figura 3.50 Distribuzione del parametro *Rock Mass Rating* ed individuazione delle classi.

I limiti individuati ed i pesi attribuiti sono indicati nella Tabella 3.46.

	Classe	Peso
1 ^a	R.M.R. > 70	0
2 ^a	R.M.R. 50 - 70	1
3 ^a	R.M.R. < 50	2

Tabella 3.46 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

Al termine Volume di Roccia Unitario è stato attribuito un peso maggiore quanto maggiore risulta il volume dei blocchi individuati. Infatti a parità di altre condizioni al contorno, la suscettibilità di un fronte sarà maggiore se è maggiore il volume dei blocchi potenzialmente instabili. I limiti individuati ed i pesi attribuiti sono indicati nella Tabella 3.47.

	Classe	Peso
1 ^a	V.R.U. = 0,5 m ³	0
2 ^a	V.R.U. 0,5 - 1 m ³	1
3 ^a	V.R.U. > 1 m ³	2

Tabella 3.47 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

Per il termine “meccanismi di rottura”, a partire dall’orientazione delle famiglie di discontinuità individuate su un fronte, sono stati considerati tutti i meccanismi potenzialmente innescabili: scivolamenti planari, rotture a cuneo o ribaltamenti. Maggiore è il numero di meccanismi riscontrati sulla scarpata, maggiore è il peso attribuito a questo parametro nella valutazione della suscettibilità all’innescamento.

I limiti individuati ed i pesi attribuiti sono indicati nella Tabella 3.48.

	Classe	Peso
1 ^a	1 meccanismo di rottura	0
2 ^a	2 meccanismi di rottura	1
3 ^a	3 meccanismi di rottura	2

Tabella 3.48 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

La classificazione dell'esposizione dei versanti ricavata dal DTM deriva dalla considerazione che l'esposizione continua di alcune scarpate ai raggi del sole può accelerare i cicli di essiccamento e, quindi, il decadimento delle proprietà meccaniche degli ammassi favorendo i crolli.

Questo dato è legato alla morfologia del territorio che, per sua natura, presenta una maggiore frequenza di versanti esposti ad ovest ed a sud. Si presume, quindi, che i versanti che abbiano una esposizione verso sud siano quelli più soggetti a ripetuti cicli di essiccamento seguiti dai versanti con esposizione verso ovest ed est; i versanti esposti verso nord, infine, saranno quelli meno soggetti a tale tipo di fenomeno.

La classificazione di questo parametro, dunque, si articola secondo lo schema riportato in Tabella 3.49.

Esposizione	Intervallo angolare	Peso
Nord	315° - 45°	0
Est	45° - 135	1
Ovest	225° - 315°	
Sud	135° - 225°	2

Tabella 3.49 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

La classificazione del termine "dimensioni della scarpata" si è basata su elaborazioni del modello digitale del terreno.

Attraverso il DTM, infatti, sono stati assegnati, alle aree di versante dell'area di studio, i valori di quota minima, massima e l'intervallo tra questi (i valori di quota si riferiscono al livello medio del mare) che è rappresentativo dell'altezza delle varie scarpate. L'attribuzione dei pesi (Tab. 3.50) è stata effettuata in base alla seguente considerazione: le scarpate più alte sono quelle che espongono agli agenti atmosferici maggiori superfici e sono pertanto, quelle che probabilmente hanno una maggiore possibilità di dar luogo a distacchi, a parità di altri fattori.

	Classe	Peso
1 ^a	< 25 m	0
2 ^a	25 - 50 m	1
3 ^a	> 50 m	2

Tabella 3.50 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

Anche la classificazione del termine “acclività della scarpata” si è basata su elaborazioni del modello digitale del terreno.

Dal DTM sono state riconosciute 3 differenti classi di acclività (Tab. 3.51), calcolate a partire dai valori di pendenza minima e massima rilevate nell’area di studio.

	Classe	Peso
1 ^a	0 - 45°	0
2 ^a	45° - 60°	1
3 ^a	> 60°	2

Tabella 3.51 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

3.5.4.1.1 Indice di suscettibilità all'innescò di frane da crollo

L'applicazione dell'algoritmo descritto nel paragrafo 2.2.3.4 è stata implementata nel GIS in modo da poter moltiplicare il peso della classe di ogni parametro esaminato per l'intensità interattiva associata. L'indice di instabilità *Rock Mass Instability Index (RMII)*, che si ottiene da questa nuova elaborazione dei dati disponibili, fornisce un'indicazione sul livello di potenziale instabilità delle scarpate. Quanto maggiore risulterà questo indice tanto più le scarpate saranno instabili. In tal modo si è ottenuta la distribuzione spaziale dell'indice di suscettibilità all'innescò di frane da crollo per l'intera area indagata.

Nella Tabella 3.52 si riportano i pesi ottenuti per ciascun parametro considerato nell'elaborazione del RMII.

Parametri	Pesi
<i>Precedente Instabilità</i>	9.28
<i>RMR</i>	8.26
<i>Presenza di faglie</i>	7.12
<i>Apertura Discontinuità</i>	6.48
<i>VRU</i>	6.48
<i>Meccanismi di Rottura</i>	6.23
<i>Spaziatura Discontinuità</i>	5.46
<i>Persistenza Discontinuità</i>	4.96
<i>Numero Discontinuità</i>	4.70
<i>Orientazione Discontinuità</i>	4.45
<i>Orientazione del Fronte</i>	4.32
<i>Proprietà Meccaniche Discontinuità</i>	4.19
<i>Dimensione del Fronte</i>	3.68
<i>Acclività del Fronte</i>	3.56

Tabella 3.52 Pesi utilizzati per il calcolo dell'RMII.

I valori di suscettibilità ottenuti, variabili da 45 a 119, sono stati classificati, per una maggiore leggibilità, in tre livelli individuando le aree a bassa, media ed alta suscettibilità (Tavola 3.7).

Da una visione generale dell'intero ammasso roccioso, risalta l'alta suscettibilità di 4 tra i fronti individuati (fronti n° 3, 7, 9 e 13). La maggior parte dei fronti è invece caratterizzata da una condizione di media stabilità (fronti 1, 2, 4, 6, 8, 12, 14, 15 e 16) ; infine i fronti risultati prevalentemente stabili sono quelli contrassegnati dai numeri 5, 10, 11 e 17.

3.5.4.2 LA COLLINA DEI CAMALDOLI

A causa della minore quantità di dati disponibili sull'area di studio della Collina dei Camaldoli, per la valutazione della suscettibilità all'innescò di frane da crollo dai versanti in Tufo Giallo Napoletano, si è fatto riferimento allo studio fatto durante una tesi di laurea svolta presso il Dipartimento di Ingegneria Geotecnica – Sezione di Geologia Applicata dell'Università di Napoli "Federico II" (Nocerino, 2005).

Di seguito si riportano i dati di partenza acquisiti e le elaborazioni svolte.

Anche in questo caso, tutti i dati disponibili sono stati raccolti all'interno di un progetto GIS, a partire dal quale è stato possibile sviluppare le procedure necessarie per l'applicazione della metodologia proposta.

Durante questa fase di lavoro, alcuni parametri sono stati esclusi dallo sviluppo dello studio, seppur rientranti nella classifica di interattività precedentemente descritta. I parametri esclusi sono: faglie, resistenza della roccia intatta, erosione e condizioni idrauliche.

Per quanto riguarda il parametro "resistenza della roccia intatta", questo risulta essere ridondante all'interno del sistema e si è preferito tenerne conto attraverso il parametro R.M.R. che descrive l'ammasso tufaceo in maniera dettagliata e nel quale, il parametro "resistenza della roccia intatta" è compreso.

I parametri "erosione" e "condizioni idrauliche", infine, sono stati trascurati perché difficilmente valutabili. L'erosione, per i versanti tufacei, è risultato un parametro ad alta interattività ma la sua valutazione (attraverso un tasso annuo) e distribuzione, all'interno dell'area di studio, richiederebbe prolungate ed accurate indagini di campagna. Anche il parametro "condizioni idrauliche", richiederebbe indagini di campagna che esulano dallo sviluppo di questo studio. Negli ammassi tufacei non esistono falde e la circolazione idrica, che si potrebbe verificare in occasione di importanti eventi meteorici, è regolata dallo stato di fratturazione dell'ammasso. Per stabilire l'aliquota di acqua che effettivamente circola nelle fratture, sarebbe necessario effettuare un bilancio idrogeologico che coinvolge, però, tantissimi parametri a loro volta di difficile interpretazione.

Lo sviluppo semiquantitativo ha, pertanto, coinvolto lo studio di soli dieci termini ma che hanno comunque permesso una buona valutazione dell'indice di suscettibilità dei versanti in TGN dell'area di studio.

Per lo sviluppo del modello sono stati adoperati i seguenti dati digitali georiferiti nel sistema di coordinate metriche UTM-WGS84:

- la Carta Geolitologica del Comune di Napoli, fornita dal Servizio Sicurezza Geologica e Sottosuolo del Comune di Napoli (cartografia Legge 9/83 scala 1:4000);
- la Carta delle Isopache (profondità di attestazione del tufo) del Comune di Napoli, fornita dal Servizio Sicurezza Geologica e Sottosuolo del Comune di Napoli (cartografia legge 9/83 scala 1:10000);
- la Carta dell'ubicazione delle frane recenti rilevate dal CUGRI (Centro Inter-Universitario per la previsione e prevenzione dei Grandi Rischi), aggiornata al 2001;
- la Carta dell'ubicazione delle frane storiche relative al periodo 1886-1996 (fonti giornalistiche locali e pubblicazioni scientifiche);
- l'ubicazione delle frane storiche relative al periodo 1868-1885 (fonti giornalistiche locali);
- il modello digitale del terreno (DTM) fornito dal laboratorio di Geomatica e Cartografia dell'Osservatorio Vesuviano, avente risoluzione di 5 m.

Dal modello digitale del terreno sono state derivate le Carte delle acclività e della esposizione dei versanti.

Nell'ambito dell'area di studio i versanti sono stati individuati attraverso una riclassificazione della Carta delle acclività in funzione dei valori di inclinazione in corrispondenza dei quali sono state censite le frane che hanno riguardato il Tufo Giallo Napoletano. In particolare è stato riscontrato che a partire dal valore di 25° si hanno frane miste, cioè che hanno interessato sia il tufo, sia le coltri piroclastiche su esso poggianti. A partire da 37° si iniziano a riscontrare le frane che hanno interessato esclusivamente il tufo. In funzione dei valori di acclività menzionati sui quali sono state riscontrate frane, si è deciso di escludere dall'individuazione dell'area di versante tutte le morfologie con acclività minore di 25° e di classificare le classi 25° - 37° e maggiori di 37° rispettivamente nei valori 1 e 2 in modo da conservare le informazioni sulle tipologie di materiale su cui avvengono le frane.

Successivamente è stata affrontata la fase di caratterizzazione dei versanti con l'inserimento dei nuovi dati ottenuti nella fase di indagini di campagna. Questa operazione è stata effettuata posizionando sulla Carta geolitologica gli stendimenti eseguiti ed individuando sulle aree adiacenti gli affioramenti tufacei a cui è possibile assegnare caratteristiche geomeccaniche omogenee. In particolare se nel banco individuato ricadeva un solo stendimento, all'intero banco sono stati attribuiti i dati di quel particolare stendimento; se nel banco ricadevano più stendimenti, sono stati attribuiti i valori medi dei dati registrati in quegli stendimenti; se nel banco non erano stati eseguiti stendimenti, ad esso sono stati attribuiti i valori medi di tutti gli stendimenti eseguiti.

Nell'ambito dell'area di studio sono state acquisite informazioni sulla litologia e sulla copertura del tufo per selezionare i versanti in cui il tufo è elemento affiorante o semiaffiorante.

La prima operazione è stata quella di isolare la classe di isopache il cui l'intervallo di copertura va da 0 a 5 m. La successiva operazione è stata quella di effettuare un *overlay* (*intersect*) con la Carta geolitologica. L'intersezione del risultato ottenuto *dall'overlay* con le aree di versante individuate con le sole classi di acclività ha permesso di individuare i soli versanti con affioramenti o "semi-affioramenti" tufacei.

L'individuazione delle tre classi stabilite dalla classificazione semiquantitativa adottata è stata svolta basandosi sulla distribuzione dei parametri all'interno della matrice delle interazioni. Nella classificazione adottata sono stati attribuiti valori più alti quanto più scadente è risultato il valore del parametro e quanto più influente, ai fini della valutazione della suscettibilità, risulta tale valore. Questa convenzione è stata adottata perché nello sviluppo dell'algoritmo di calcolo del modello, sarà attribuita una suscettibilità tanto più alta ai versanti, quanto maggiore sarà il valore numerico che gli competerà.

Di seguito si riportano tutti i parametri utilizzati nella valutazione della suscettibilità all'innescò di frane da crollo ed i pesi corrispondenti assegnati.

Al termine "apertura delle discontinuità" (Tab.3.53) si è attribuito un peso tanto maggiore quanto maggiore è il valore di apertura (vedi paragrafo 3.5.4.1).

	Classe	Peso
1 ^a	< 0,45 mm	0
2 ^a	0,45 - 1,05 mm	1
3 ^a	> 1,05 mm	2

Tabella 3.53 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

Anche al termine “persistenza” (lunghezza della discontinuità) (Tab. 3.54) è stato attribuito un peso tanto maggiore quanto maggiore è il suo valore (vedi paragrafo 3.5.4.1).

	Classe	Peso
1 ^a	0 - 7,55 m	0
2 ^a	7,55 - 12,80 m	1
3 ^a	> 12,80 m	2

Tabella 3.54 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

Per quanto riguarda il termine “spaziatura delle discontinuità” (Tab. 3.55), invece, è stato dato un peso maggiore quanto minore era il valore del parametro (vedi paragrafo 3.5.4.1).

	Classe	Peso
1 ^a	> 1,40 m	0
2 ^a	0,66 - 1,40 m	1
3 ^a	< 0,66 m	2

Tabella 3.55 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

Analogamente al caso precedente, anche al termine “resistenza delle discontinuità” (Tab.3.56), si è attribuito un peso tanto maggiore quanto minore è il suo valore (vedi paragrafo 3.5.4.1).

	Classe	Peso
1 ^a	> 1,36 MPa	0
2 ^a	0,60 - 1,36 MPa	1
3 ^a	< 0,60 MPa	2

Tabella 3.56 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

Il termine R.M.R. (Tab. 3.57), oltre ad essere tra i termini a maggiore interattività, è quello che verosimilmente descrive in maniera migliore le caratteristiche di resistenza di un ammasso roccioso (vedi paragrafo 3.5.4.1).

	Classe	Peso
1 ^a	> 21	0
2 ^a	9 - 21	1
3 ^a	< 9	2

Tabella 3.57 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

Per il termine “numero di famiglie di discontinuità” (Tab. 3.58), diversamente dal caso precedente, si è attribuito un punteggio tanto maggiore quanto maggiori sono le famiglie individuate sul versante (vedi paragrafo 3.5.4.1).

	Classe	Peso
1 ^a	< 2 famiglie	0
2 ^a	3 famiglie	1
3 ^a	> 3 famiglie	2

Tabella 3.58 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

Il termine “presenza di faglie” è stato valutato a partire dall’osservazione della Carta geomorfologica dell’area di studio, i relativi pesi sono stati attribuiti come individuato nella Tabella 3.59.

	Classe	Peso
1 ^a	non presenti	0
2 ^a	presenza di 1 faglia	1
3 ^a	presenza di 2 (>) faglie	2

Tabella 3.59 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

La valutazione della precedente instabilità è stata effettuata tramite un procedimento di *buffering* di tutte le frane che hanno riguardato il tufo. In particolare sono stati realizzati tre nuovi temi ciascuno dei quali individua i *buffer* relativi ad una particolare epoca; precisamente si è realizzato un tema con riferimento alle frane recenti, uno con riferimento alle frane storiche (periodo 1886-1996) ed in ultimo uno riferito alle frane storiche catalogate nel nuovo lavoro d’archivio (v. paragrafo 3.1) relative al periodo 1885-1868. L’operazione di *buffering* si è basata su considerazioni che riguardano: l’ubicazione e la potenziale distanza di invasione.

In pratica, è stato individuato, a partire dall’effettiva ubicazione delle frane, il versante dal quale probabilmente essa si è staccata considerando una distanza di invasione di 100 m. Il valore adottato è cautelativo in quanto, da uno studio effettuato sulla collina dei Camaldoli (Calcaterra et al., 2004), è stata calcolata una distanza dal punto di arresto a quello di distacco del blocco di 200-250 m. La frequenza con cui le frane si sono succedute nel tempo è stata valutata in base al numero di intersezioni che i versanti hanno con i *buffer* realizzati, valutando la frequenza di accadimento ed attribuendo il peso relativo secondo la seguente procedura: è stato attribuito peso 0 a tutti quei versanti che non sono mai stati interessati da frane o che hanno subito una frana in una sola delle tre epoche; è

stato attribuito peso 1 a tutti i versanti che hanno subito frane in due periodi; è stato, infine, attribuito peso 2 a tutti quei versanti che hanno subito frane in tutti i periodi individuati.

La classificazione dell'esposizione dei versanti ricavata dal DTM deriva dalla considerazione che l'esposizione continua di alcune scarpate ai raggi del sole può accelerare i cicli di essiccamento e, quindi, il decadimento delle proprietà meccaniche degli ammassi favorendo i crolli (vedi paragrafo 3.5.4.1).

Esposizione	Intervallo angolare	Peso
Nord	315° - 45°	0
Est	45° - 135°	1
Ovest	225° - 315°	
Sud	135° - 225°	2

Tabella 3.60 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

La classificazione del termine "dimensioni della scarpata" (Tab. 3.61) si è basata sul modello digitale del terreno (vedi paragrafo 3.5.4.1).

	Classe	Peso
1 ^a	< 50 m	0
2 ^a	50 - 100 m	1
3 ^a	> 100 m	2

Tabella 3.61 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

3.5.4.2.1 Indice di suscettibilità all'innesco di frane da crollo

Anche in questo caso, dopo aver implementato il calcolo dell'RMII in ambiente GIS, si è ottenuta la distribuzione spaziale dell'indice di suscettibilità all'innesco per frane da crollo sui versanti in tufo dell'area di studio, sono state riconosciute 3 classi di stabilità: bassa, media ed alta (Tavola 3.8).

Dall'osservazione della carta ottenuta ciò che si nota in primo luogo è l'alta predisposizione al dissesto di quasi tutte le scarpate in tufo affioranti sul versante incombente su Soccavo. Viceversa, per quanto riguarda i versanti incombenti su Pianura, si nota che le scarpate caratterizzate da altezze superiori a 300 m risultano classificate ad elevata suscettibilità, mentre quelle a quote inferiori sono classificate con suscettibilità all'innesco di fenomeni franosi tra bassa e media.

3.6 Modelli matematici per la previsione del moto di caduta dei blocchi

3.6.1 APPLICAZIONE DEL SOFTWARE ROTOMAP ALLE AREE DI STUDIO

Le principali fasi di studio necessarie per la corretta implementazione del codice di calcolo sono state:

1. ricostruzione geometrica del pendio;
2. rilevamento geologico-geomorfologico di dettaglio, per le aree campione, al fine della corretta individuazione delle aree omogenee dal punto di vista della parametrizzazione geomeccanica;
3. stima dei coefficienti di restituzione normale, tangenziale e di attrito e definizione dell'angolo limite;
4. determinazione della massa dei blocchi, compatibile con quelli effettivamente ritrovati sul terreno;
5. individuazione delle potenziali aree di innesco dei crolli;
6. calibrazione e validazione del modello con sperimentazione su casi di studio reali.

1. Ricostruzione geometrica del pendio

Il modello tridimensionale del pendio è stato ricostruito a partire dalle cartografie in formato digitale disponibili presso la Sezione di Geologia Applicata del Dipartimento di Ingegneria Geotecnica dell'Università di Napoli Federico II. In particolare: per l'area di studio di Monte Saretto è stato utilizzato il rilievo fotogrammetrico eseguito in scala 1:1000; per l'area di studio della Collina dei Camaldoli è stato utilizzato il rilievo topografico in scala 1:5000.

2. Rilevamento geologico-geomorfologico di dettaglio

In base ai dati disponibili da fonti bibliografiche e di archivio (Carte geolitologiche, geomorfologiche e dell'uso del suolo) ed ai dati raccolti durante la fase di rilievo geostrutturale e geomeccanico di entrambe le aree oggetto della ricerca, sono state individuate le zone da ritenersi omogenee dal punto di vista della parametrizzazione geomeccanica.

3. Stima dei coefficienti di restituzione normale, tangenziale e di attrito e definizione dell'angolo limite

I primi due valori sono stati ottenuti sia da precedenti lavori (Hoek, 1987; Paronuzzi, 1987; Hungr & Evans, 1988; Paronuzzi, 1989 a, b, c; Pfeiffer & Bowen, 1989; Giani, 1992; Scioldo, 2000; Focardi, 2002; Calcaterra et al., 2004) sia dall'esperienza diretta sul terreno, in base alle dimensioni reali dei blocchi. Lo stesso materiale, infatti, detrito o roccia in posto, può rispondere in modo elastico all'urto di blocchi di piccole dimensioni, o assorbire una parte consistente di energia per fratturazione e dislocazione del materiale, quindi con comportamento plastico nel caso di urto di blocchi di dimensioni maggiori. Il coefficiente di attrito di roto-scivolamento è stato opportunamente scelto in base non solo alle dimensioni dei massi, ma anche alla presenza delle asperità del terreno. Infine, l'angolo limite è il parametro più difficile da determinare, poiché viene utilizzato per individuare le condizioni in cui avviene il passaggio da roto-scivolamento a volo libero e viceversa: quindi non dipende solo dalla geometria del terreno, essendo calcolato nel piano verticale alla direzione del moto. I valori utilizzati sono esposti nelle Tabelle 3.62 e 3.63.

Litologia	Spessore	Rt	Rn	Coefficiente di attrito
Calcari ben stratificati e talora stratificati affioranti	substrato	0,9	0,4	0,4
Copertura piroclastica discontinua	0 - 0,5 m	0,85	0,35	0,7
Copertura piroclastica rimaneggiata	> 0,5 m	0,83	0,33	0,7
Area urbanizzata		0,9	0,4	0,7

Tabella 3.62 - Parametri geomeccanici utilizzati per l'applicazione di ROTOMAP, Monte Saretto.

Per il Monte Saretto, dalle analisi a posteriori delle massime distanze raggiunte, i parametri geomeccanici di restituzione all'impatto lungo il versante ottenuti bene si accordano con quelli indicati da Hoek (1987), secondo il quale Rn varia sostanzialmente nell'intervallo 0.3-0.4 ed Rt assume valori compresi tra 0.8 e 0.9.

Litologia	Rt	Rn	Coefficiente di attrito
Tufo affiorante	0.5	0.4	0.4
Copertura piroclastica	0.3	0.2	0.7
Area urbanizzata	0.9	0.4	0.7

Tabella 3.63 - Parametri geomeccanici utilizzati per l'applicazione di ROTOMAP, Collina dei Camaldoli.

Per la Collina dei Camaldoli, i parametri ottenuti dalle *back-analysis* dei crolli sono un po' inferiori rispetto a quelli riportati in letteratura; ciò è giustificato dall'influenza sul moto

dei blocchi delle effettive caratteristiche topografiche e geomorfologiche dell'area di studio.

4. Determinazione della massa dei blocchi, compatibile con quelli effettivamente ritrovati sul terreno.

Per la determinazione della massa dei blocchi sono stati considerati sia i blocchi rinvenuti sul terreno, sia le caratteristiche geomeccaniche delle potenziali aree di innesco; infatti, come riportato nel paragrafo 3.4.1, per ogni stazione geomeccanica eseguita è noto il Volume di Roccia Unitario dei blocchi potenzialmente instabili.

5. Individuazione delle potenziali aree di innesco crolli

Le linee di distacco da cui far partire i blocchi sono state scelte in base alle Carte della suscettibilità all'innesco di frane da crollo, implementate secondo quanto riportato nel capitolo 4. In particolare, sia sul versante meridionale del Monte Saretto, che sulla Collina dei Camaldoli, le simulazioni dei moti di caduta dei massi sono state sviluppate a partire dalle aree classificate con suscettibilità all'innesco compresa tra elevata e media; sono state invece escluse dalle simulazioni le aree classificate a bassa suscettibilità.

6. Calibrazione e validazione del modello con sperimentazione su casi di studio reali

La calibrazione del modello cinematico di modellazione delle traiettorie è stata effettuata sulla base di traiettorie note, risalenti a crolli avvenuti in epoche recenti. Per il Monte Saretto si è fatto riferimento ad un crollo verificatosi nell'aprile 2004, di cui si conoscono traiettoria e punti di rimbalzo; viceversa per la Collina dei Camaldoli, si è fatto riferimento ad un crollo avvenuto nel marzo 2005, per il quale sono stati georiferiti i punti di arresto di tutti i blocchi franati.

In entrambi i casi, la taratura del modello è stata iterata fino a far coincidere perfettamente le traiettorie reali con quelle simulate da ROTOMAP. Per ulteriore accuratezza, gli stessi fenomeni di crollo sono stati simulati anche con CRSP, v. paragrafo 3.6.2.

3.6.1.1. RISULTATI

In questo paragrafo si riportano i risultati ottenuti dalle simulazioni effettuate con il *software* ROTOMAP (Figg. 3.51 e 3.52; Tavole 3.9 e 3.10).

La modellazione delle massime propagazioni simulate con ROTOMAP dimostra che crolli litoidi delle scarpate superiori possono determinare l'arrivo di blocchi ad una distanza massima percorsa di:

Monte Saretto: 390 m;

Collina dei Camaldoli: 490 m (versante orientale).

Il risultato delle simulazioni tridimensionali è congruente con la posizione dei blocchi rinvenuti lungo i versanti in studio.

Il moto dei blocchi avviene sostanzialmente per rotolamento alternato ad episodi di rimbalzo sul pendio. I rimbalzi sono presenti anche durante le prime fasi del moto, ma sono decisamente più frequenti alla base del versante.

Le motivazioni dei diversi tipi di moto risiedono essenzialmente nella posizione delle principali rotture di pendenza dei versanti, con variazioni di pendenza che determinano l'innescò delle traiettorie aeree. Al contrario tratti di versante a pendenza costante favoriscono il rotolamento dei blocchi.

I dati di velocità traslazionale (V_t) dei blocchi possono essere analizzati facendo riferimento al parametro cinematico $V^2/2$, il quale è anche utilizzato per il calcolo dell'energia cinetica del blocco ($E_t = 1/2 (M \times V^2)$). Le velocità di discesa dei blocchi che si muovono per rotolamento alternato ai rimbalzi sono tutt'altro che costanti: i picchi di velocità si hanno alla conclusione delle proiezioni aeree maggiori, laddove si verificano anche le più significative perdite di energia.

Alcuni diagrammi caratteristici che descrivono le variazioni di velocità dei massi lungo il pendio sono presentati nella Figura 3.51.

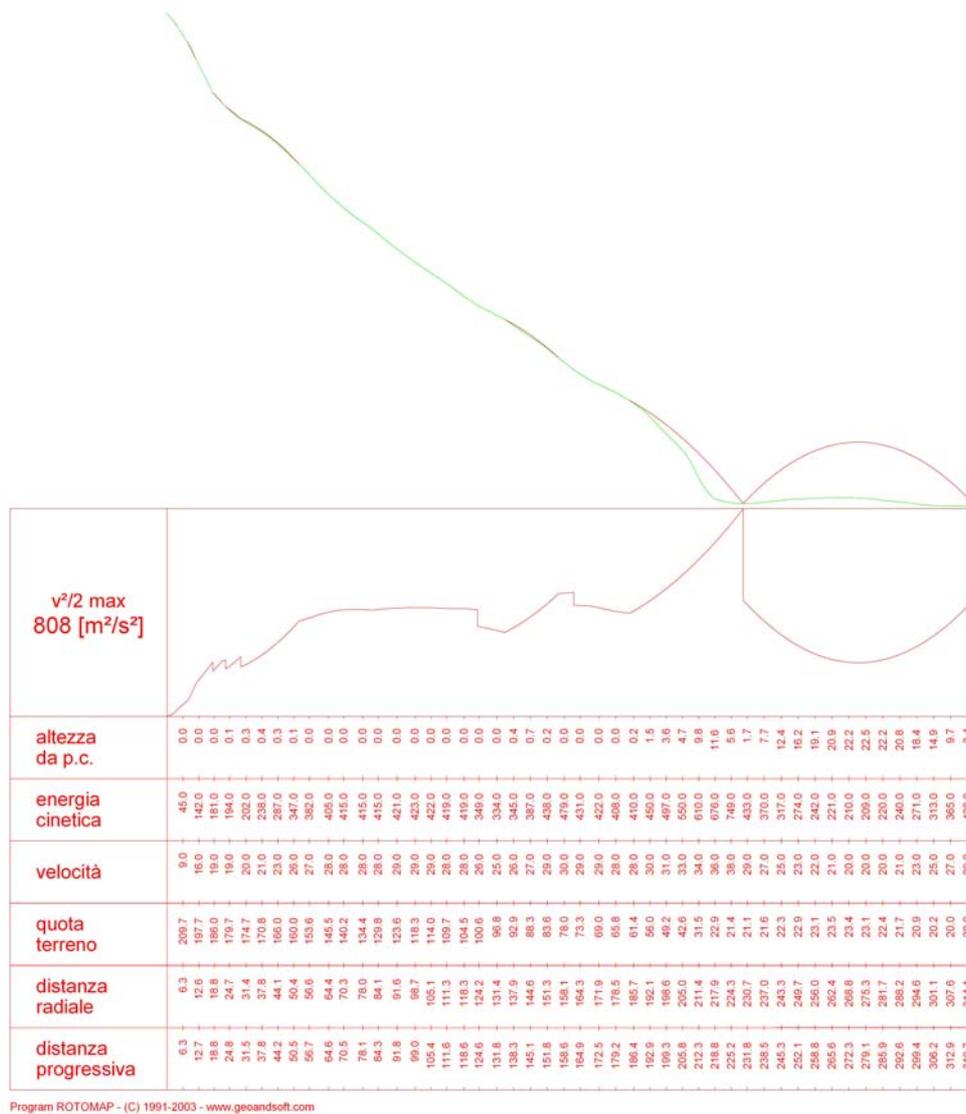
L'andamento delle traiettorie simulate sulla base topografica tridimensionale (Tavola 3.9) denota in maniera estremamente chiara l'influenza delle caratteristiche morfologiche dei versanti: esistono infatti situazioni locali di impluvio e di crinale che assumono la funzione di concentrare o di far divergere, rispettivamente, le traiettorie dei massi.

Dall'osservazione della Tavola 3.9 si notano nell'area di studio del Monte Saretto delle fasce longitudinali ad elevata densità di traiettorie, corrispondenti ad aree di impluvio

lungo il versante. La zona maggiormente esposta al rischio di invasione da parte dei blocchi in frana dalle scarpate carbonatiche è quella relativa al centro storico dell'abitato di Sarno.

Infatti, in altre zone dell'area di ricerca, numerosi blocchi si arrestano lungo il versante senza raggiungere il centro abitato; viceversa in corrispondenza del nucleo storico di Sarno i blocchi franati percorrono circa 150 m all'interno dell'area urbana.

E' importante tenere presente che si tratta in tutti i casi di massime propagazioni, cioè delle situazioni più sfavorevoli dal punto di vista geomeccanico: infatti non si tiene conto dell'effettiva presenza di ostacoli, che possono frenare il moto dei blocchi (es. manufatti ubicati "in prima fila", al piede del versante).



Program ROTOMAP - (C) 1991-2003 - www.geoandsoft.com

Figura 3.51 Diagramma delle caratteristiche fisiche e cinematiche di un masso in frana lungo una traiettoria.

Nella visione planimetrica della Tavola 3.9 si notano anche i massimi percorsi dei massi e le rispettive traiettorie di discesa.

Nella sezione di Fig. 3.51 è diagrammato anche l'andamento del parametro cinematico $V^2/2$, in funzione dei diversi tratti del pendio. Le velocità massime calcolate vengono raggiunte in tratti diversi del pendio, con valori abbastanza variabili.

Le altezze di volo delle traiettorie aeree dei rimbalzi, calcolate normalmente rispetto al pendio (H_n), sono comprese nell'intervallo 0-8 m, con una grande frequenza per le traiettorie più basse, tra 0 e 6 m. Le proiezioni aeree più elevate, con altezze comprese tra 6 e 8 m dal pendio avvengono nella parte inferiore del versante in corrispondenza del nucleo storico dell'abitato di Sarno e sono innescate dalla rottura di pendenza a valle.

Le velocità massime vengono raggiunte di norma alla base del versante, particolarmente nel settore precedentemente citato, relativo al nucleo storico di Sarno ($V^2/2 = 400-550 \text{ m}^2/\text{s}^2$), e nel settore più meridionale contraddistinto dalla presenza di un impluvio ($V^2/2 = 300-350 \text{ m}^2/\text{s}^2$).

Dall'esame dei dati cinematici complessivi risulta quindi che le massime velocità potenziali, a prescindere dai diversi settori del pendio, sono dell'ordine dei 30-33 m/s.

Anche nell'area di studio della Collina dei Camaldoli, dall'osservazione della Tavola 3.10 si nota la presenza di fasce longitudinali ad elevata densità di traiettorie, corrispondenti a numerose aree di impluvio lungo il versante. In questo caso, non emerge una grande variabilità nell'esposizione al rischio di invasione tra le aree a valle del versante orientale, (abitato di Soccavo) e quelle a valle del versante occidentale (abitato di Pianura). Infatti in entrambi i casi si notano un gran numero di traiettorie che raggiungono sia le abitazioni che le infrastrutture viarie a valle dei versanti. Circa il 30% delle traiettorie simulate si arrestano lungo i versanti, senza raggiungere gli elementi esposti a rischio.

E' importante tenere presente che anche in questo caso si tratta di massime propagazioni, cioè delle situazioni più sfavorevoli dal punto di vista geomeccanico.

Le velocità massime calcolate vengono raggiunte lungo il versante orientale della Collina dei Camaldoli, dove, nelle aree al piede del versante, le velocità massime sono di 37,5 m/s.

Le altezze di volo delle traiettorie aeree dei rimbalzi, calcolate normalmente rispetto al pendio (H_n), sono comprese nell'intervallo $0 \div 12$ m, con una grande frequenza per le traiettorie più basse, tra 0 e 10 m. Le proiezioni aeree più elevate, con altezze comprese tra 10 e 12 m dal pendio avvengono, anch'esse, lungo il versante orientale, nella parte inferiore del versante e sono innescate dalla rottura di pendenza a valle.

Anche in questo caso si riporta a titolo di esempio l'andamento delle grandezze fisiche e cinematiche di un blocco in frana lungo una delle traiettorie caratterizzate dall'elevata distanza raggiunta (Fig. 3.52).

3. livello di energia associato ai blocchi lungo gli scendimenti;
4. altezza massima di rimbalzo raggiunta lungo gli scendimenti.

Gli *output* derivanti dalle modellazioni di ROTOMAP saranno utilizzati nella successiva fase di lavoro, per implementare un modello previsionale totalmente integrato in ambiente GIS, per valutare la suscettibilità all'invasione di frane da crollo, basandosi nuovamente sulla metodologia RES (v. paragrafo 3.7).

3.6.2 APPLICAZIONE DEL SOFTWARE CRSP ALLE AREE DI STUDIO

I dati di *input* richiesti dal programma per l'elaborazione sono:

- il profilo della scarpata, il quale è disegnato da una serie di segmenti di retta ottenuti inserendo le coordinate cartesiane (x,y) degli estremi di ciascun segmento; sul Monte Saretto si è ipotizzata un'unica sezione di calcolo, coincidente con il crollo di aprile 2004; sulla Collina dei Camaldoli, sono state ipotizzate 2 sezioni di calcolo, entrambe coincidenti con le traiettorie del crollo di marzo 2005;
- stima dell'irregolarità della scarpata (rugosità), valutata in relazione al raggio della roccia, riportata per ciascuna cella;
- coefficienti di restituzione (Rt ed Rn) che determinano la riduzione di energia cinetica a seguito dell'impatto: scopo delle analisi di CRSP è proprio quello di valutare l'attendibilità dei coefficienti di restituzione scelti per le modellazioni dei fenomeni di caduta blocchi;
- la dimensione, la forma e la posizione di partenza delle rocce di cui è simulato il fenomeno di crollo; la forma dei blocchi è stata ipotizzata in tutti i casi sferica;
- la velocità iniziale lungo le direzioni x ed y ; tale parametro è stato fatto variare tra i valori di 0,3 m/s e 2 m/s. La scelta di questo intervallo è stata fatta osservando che, per valori inferiori al minimo citato, nessun blocco riusciva a raggiungere i punti di analisi, rendendo impossibile l'elaborazione dei risultati. Per velocità superiori al valore massimo tutti i blocchi superavano i punti di analisi, ipotesi non reale, essendo note le reali posizioni di rinvenimento dei blocchi, sia lungo il versante meridionale del Monte Saretto, che lungo i versanti della Collina dei Camaldoli.

Le *back analysis* implementate con CRSP hanno permesso di validare i parametri geomeccanici utilizzati nelle simulazioni di caduta dei blocchi; con i parametri definitivamente scelti, le traiettorie simulate dal software risultano perfettamente coincidenti con le traiettorie realmente verificatesi nei crolli dell'aprile 2004 sul versante meridionale del Monte Saretto e del marzo 2005 sul versante occidentale della Collina dei Camaldoli (v. Allegato 1).

3.7 MODELLO IN AMBIENTE GIS PER LA PREVISIONE DI FRANE DA CROLLO

In questo capitolo si espone il procedimento logico utilizzato per l'implementazione di un modello previsionale delle frane da crollo, totalmente integrato in ambiente GIS. La metodologia proposta si basa essenzialmente sull'applicazione del metodo R.E.S. (v. paragrafi 2.2.3 e 3.5), adattato allo scopo del presente studio. Obiettivo di tale metodologia è la restituzione di informazioni spazialmente distribuite (mappe) utili per la definizione delle condizioni di pericolosità e di rischio di caduta massi.

L'approccio sistemico alla meccanica ed ingegneria delle rocce, proposto da Hudson (1992) si basa sull'obiettivo prefissato, il quale permette l'utilizzo di tutte le informazioni collegate al problema in esame, plasmando il metodo sulle circostanze reali. Il metodo è generale, ma la caratterizzazione dell'ammasso roccioso in ciascuna località è indirizzata al particolare progetto che si vuole sviluppare, quindi il metodo non è standard, ma dipende dallo scopo per cui si vuole caratterizzare il versante roccioso (Hudson et al., 1991).

La metodologia propone una serie di passi da seguire che sono indipendenti dal tipo di problema e che comprendono: la scelta dei parametri rilevanti per il problema in esame, l'analisi delle interazioni binarie tra i parametri, la valutazione dell'importanza relativa tra le interazioni, l'assegnazione di codici a differenti classi di valori dei parametri, il calcolo finale di un "indice" dell'ammasso roccioso. La metodologia RES è stata utilizzata per diversi scopi specifici, come ad esempio quello di differenziare porzioni di versante con diverso grado di instabilità (Mazzoccola & Hudson, 1996; Migliore, 2001; Calcaterra et al., 2004a) o quello di definire un differente livello di pericolosità da crollo (Cancelli & Crosta, 1993 a, b, c).

3.7.1 FASI DI APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA

3.7.1.1 SCELTA DEI PARAMETRI RILEVANTI

Lo schema sequenziale da seguire per la selezione dei parametri parte dalla definizione del progetto e del tipo di ambiente in cui verrà sviluppato lo studio e termina con una lista dettagliata dei parametri legati alle condizioni del sito, corredata da una descrizione qualitativa e descrittiva.

La scelta dei parametri può essere dettata dall'esperienza esistente nel settore, dalla pratica e dalla normativa correntemente seguite, dall'applicazione dei principi di meccanica delle rocce e dalla conoscenza delle problematiche geologico-tecniche del sito in esame. In particolare, un aiuto per la scelta dei parametri può venire dall'analisi, su basi bibliografiche, dei tipi di parametri che sono stati più frequentemente utilizzati per affrontare problematiche analoghe a quella in questione. La metodologia impiegata consente sia lo studio di ampie aree, con l'utilizzo di parametri validi in senso generale, sia l'analisi dettagliata di piccole aree, tramite parametri di valenza locale. In questa ricerca, per affrontare l'analisi dei crolli, si è cercato di dare al modello un significato generale, in modo da consentirne l'applicazione ad aree di studio con caratteristiche differenti. Un primo esempio della versatilità della metodologia proposta, è dato in questo capitolo, in cui la stessa è applicata ad entrambe le aree di lavoro considerate nello studio: il versante meridionale del Monte Saretto e la Collina dei Camaldoli.

La caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso roccioso, esposta nel capitolo 4, mirata alla valutazione della suscettibilità all'innesco di fenomeni di crollo nelle aree di ricerca, costituisce una fase preparatoria indispensabile per l'applicazione del metodo di seguito descritto. Tale fase iniziale dello studio permette di valutare il grado di instabilità delle pareti rocciose, in modo da scegliere opportunamente le aree da cui far partire le simulazioni degli eventi di crollo, modellate con i *software* ROTOMAP e CRSP (v. paragrafo 3.7).

Di conseguenza, tutti i parametri ricadenti tra le cause predisponenti i fenomeni di caduta blocchi, già presi in considerazione per la valutazione della suscettibilità all'innesco, non saranno riconsiderati in questa successiva fase di lavoro; solo nelle conclusioni finali si integreranno i risultati ottenuti in entrambe le fasi di studio, così da ottenere una carta

complessiva della suscettibilità all'innescò, al transito ed all'invasione di frane da crollo, su entrambe le aree di ricerca scelte.

In definitiva sono stati scelti 10 parametri che controllano il processo di caduta di blocchi rocciosi in frana:

1. Topografia/geometria del versante;
2. Moto dei blocchi;
3. Traiettorie del crollo;
4. Massima distanza raggiunta – frequenza dei punti di arresto;
5. Velocità;
6. Materiale lungo il versante;
7. Rugosità della superficie di impatto;
8. Vegetazione;
9. Altezza di caduta libera;
10. "Crollo di progetto".

La scelta dei parametri elencati è stata fatta sia sulla base delle considerazioni su esposte, che sulla base dei dati a disposizione.

Topografia/geometria del versante

Per entrambe le aree di studio, a partire dai rilievi topografici, è stata elaborata la Carta delle acclività ed osservata la presenza di impluvi o crinali che condizionano il moto di caduta dei blocchi lungo il versante.

Il versante meridionale del Monte Saretto è stato suddiviso in base alle seguenti classi di acclività:

- 0 - 21 gradi;
- 21 - 42 gradi;
- 42 - 63 gradi;
- 63 - 85 gradi;

Viceversa per la Collina dei Camaldoli, le classi di acclività utilizzate sono:

- 0 - 30 gradi;
- 30 - 45 gradi;
- 45 - 60 gradi;
- 60 - 86 gradi;

Tale differenza tra le aree di studio è stata dettata dalle differenze morfologiche proprie di ciascuna area.

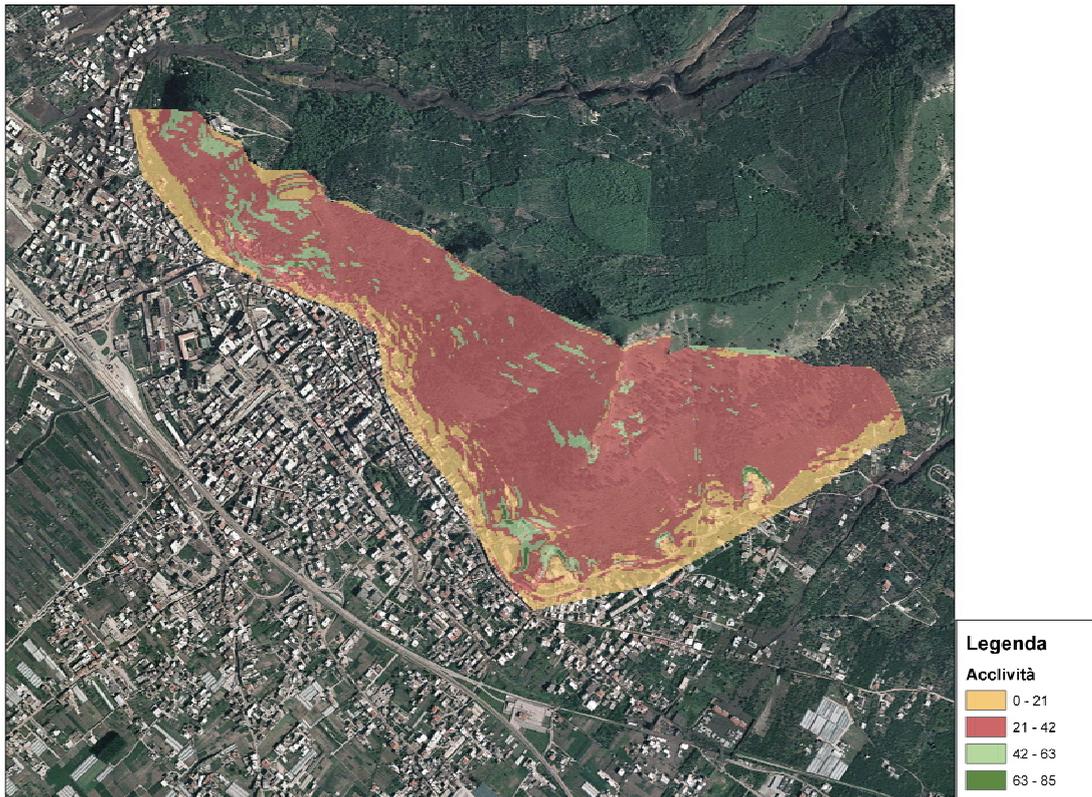


Figura 3.53. Carta dell'acclività del Monte Saretto.

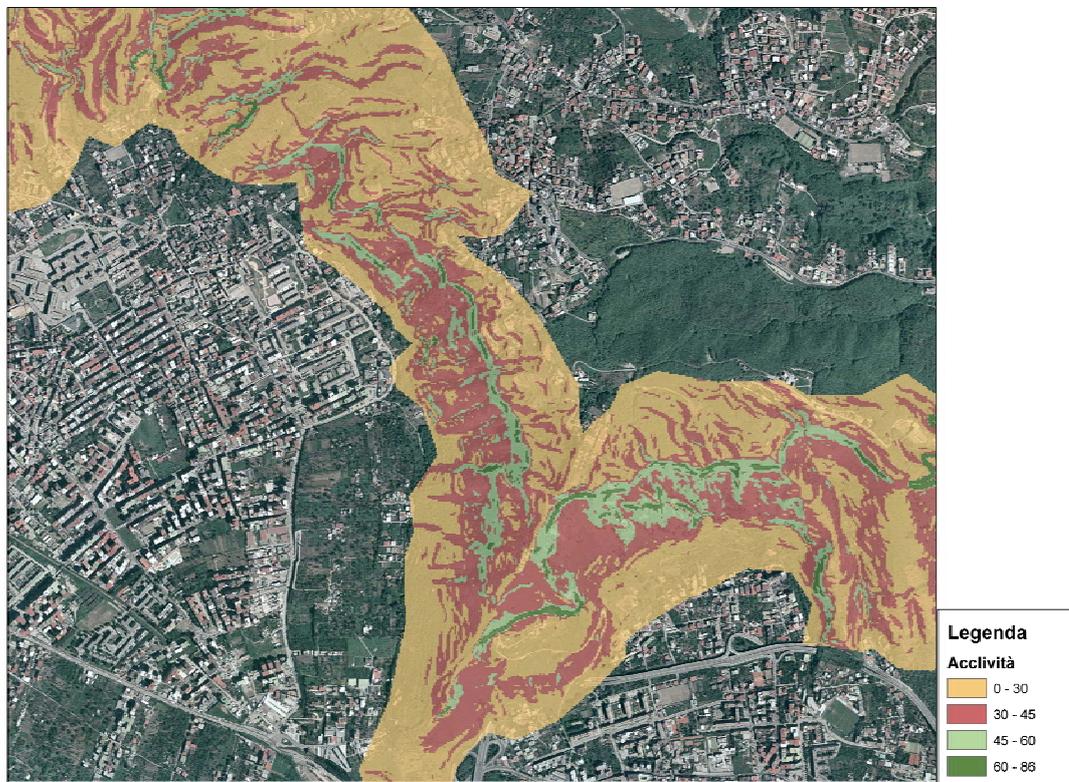


Figura 3.54. Carta dell'acclività della Collina dei Camaldoli

Moto dei blocchi

In base alle simulazioni dei crolli eseguite con il *software* tridimensionale ROTOMAP (v. paragrafo 3.6.1) il moto dei blocchi è stato distinto tra: percorsi in roto-scivolamento e percorsi in volo.

Traiettorie dei crolli

Come il parametro precedente, anche le traiettorie percorse dai blocchi sono state ricavate dalle elaborazioni svolte con ROTOMAP. Grazie all'approccio di tipo statistico del modello di simulazione adoperato, le traiettorie ottenute sono quelle con maggiore probabilità di accadimento, in caso di distacco di un blocco dalle pareti rocciose.

Massima distanza raggiunta - frequenza dei punti di arresto

Il tipo di problema affrontato è molto complesso, in quanto il comportamento reale dei blocchi dipende da una infinità di dettagli, sia a livello geometrico che geomeccanico. Ne deriva che l'unica soluzione possibile per valutare correttamente le distanze massime percorse dai blocchi consista nell'utilizzo di un approccio di tipo statistico. Quindi, non sono determinati i punti di arrivo dei blocchi, ma le aree di probabilità all'interno delle quali i blocchi si fermeranno.

Velocità

In ciascun punto delle traiettorie percorse dai massi rocciosi è possibile conoscere il valore assunto dalla velocità e dall'energia cinetica proprie del blocco. È evidente l'importanza di tale parametro per la valutazione della suscettibilità a cui è esposta un'area rispetto a fenomeni di crollo, soprattutto in un'ulteriore fase di lavoro finalizzata alla scelta di interventi di mitigazione del rischio per l'area stessa.

Materiale lungo il versante

Per la determinazione del materiale presente lungo il versante si è fatto riferimento alle Carte geomorfologica e delle coperture disponibili per entrambe le aree studio. La differenza di materiale incontrato durante il moto di caduta da un blocco ne condiziona non solo la traiettoria percorsa, ma anche il tipo di moto.

Per la Collina dei Camaldoli, a partire dalla carta geo-litologica, sono state distinte le seguenti classi di materiale presente lungo il versante (v. par. 3.2.1):

- Tufo Giallo Napoletano;
- Tufi Biancastri, Tufo di Soccavo e Ignimbrite Campana;
- Piroclastiti flegree post - TGN;
- Depositi antropici, detritici e di fondo valle;

Rugosità della superficie di impatto

Tale parametro condiziona il passaggio del moto di caduta del blocco da rotoscivolamento a caduta libera; il coefficiente di rugosità è condizionato prevalentemente dal rapporto tra le dimensioni del masso in crollo e le asperità presenti sulla superficie del versante. La determinazione di tale parametro lungo tutta l'estensione delle aree di studio è stata fatta utilizzando un applicativo del *software* ArcGis.

Vegetazione

Il parametro vegetazione è stato ottenuto dalle Carte dell'uso del suolo di entrambe le aree di studio e dall'osservazione delle ortofoto; in particolare si è fatta distinzione tra la presenza lungo il versante di vegetazione costituita da erba bassa ed arbusti, oppure di vegetazione ad alto fusto. Infatti tra i due casi varia notevolmente l'influenza sulle traiettorie seguite dai blocchi.

Altezza di caduta libera

Come nel caso della velocità, anche l'altezza di rimbalzo rispetto al versante può essere ottenuta in ciascun punto delle traiettorie, grazie alle elaborazioni di ROTOMAP. L'importanza di tale parametro è soprattutto risentita in fase di progettazione di eventuali interventi di mitigazione del rischio da invasione di frane da crollo.

“Crollo di progetto”

Così come nella precedente applicazione del RES il parametro “instabilità potenziale” rappresentava l'obiettivo del modello, in questo caso l'obiettivo prefissato è la valutazione del “crollo di progetto” e l'influenza reciproca tra tale parametro ed il resto del sistema.

Alcuni dei parametri considerati (moto e traiettorie dei blocchi; materiale costituente il versante, rugosità della superficie di impatto e vegetazione) anche se simili o strettamente

interdipendenti sono stati considerati separatamente a causa della più facile determinazione di alcuni rispetto ad altri.

3.7.1.2 LA MATRICE DELLE INTERAZIONI E LA SUA CODIFICAZIONE

I parametri sopra discussi sono importanti sia singolarmente sia perché interagiscono reciprocamente, poiché la variazione di uno dei fattori può causare variazioni negli altri. Le interazioni binarie tra i parametri sono valutate più agevolmente utilizzando una disposizione matriciale (Hudson, 1989; Hudson & Harrison, 1990) dove i parametri sono elencati lungo la diagonale e le interazioni nelle altre caselle. Con questo tipo di approccio, il problema è analizzato in maniera complessiva ed in parallelo in tutti i suoi aspetti. Come meglio spiegato nel capitolo 2, ciascuna riga della matrice delle interazioni, passando attraverso un parametro, descrive l'influenza del parametro sull'intero sistema ("causa"); viceversa, ciascuna colonna descrive l'influenza del sistema sul parametro ("effetto") (Tabella 3.64). Le interazioni devono essere lette in senso orario, poiché la matrice può essere asimmetrica. Alcuni parametri avranno maggiore effetto sul sistema ed altri in misura minore. Per quantificare queste differenti influenze è necessario impostare un metodo di codificazione. In questa fase di studio si è scelta una codificazione semiquantitativa nella quale l'importanza di un'interazione viene espressa con un codice 0 quando è ininfluente e con codici crescenti per diversi livelli di rilevanza, fino ad un massimo di 3 che indica un'interazione critica (Tabella 3.65). I codici sono assegnati considerando solo le interazioni binarie, cercando di depurare l'effetto della concatenazione di influenze di più di due parametri. Inoltre i codici sono stabiliti per confronto tenendo presente quali sono le interazioni più efficaci in questo contesto. Dalla codifica della matrice, per ciascun parametro possono essere calcolati la causa C (somma di tutti i valori numerici nella riga passante per il parametro in questione) e l'effetto E (somma di tutti i valori della colonna).

La somma di causa + effetto per ogni parametro, permette di valutare l'interattività del parametro. La somma C + E rappresenta l'interattività del parametro e mantiene un suo significato in quanto più il sistema è interattivo più è potenzialmente instabile, poiché una piccola variazione di un parametro può causare significative variazioni nel comportamento del sistema (Figure 3.55 e 3.56) .

Geometria del versante	L'andamento topografico del versante influenza notevolmente il Moto dei blocchi in caduta	L'andamento topografico del versante influenza notevolmente le traiettorie del crollo	L'andamento topografico del versante condiziona la massima distanza raggiunta dai blocchi	L'andamento topografico del versante interagisce sulle caratteristiche cinematiche dei blocchi	L'andamento topografico del versante e il materiale presente lungo di esso sono parametri fortemente interagenti tra loro	La topografia del versante influisce sulla rugosità della superficie di impatto	Debole interazione tra topografia del versante e presenza di vegetazione	La altezze di rimbalzo raggiunte dai blocchi sono fortemente influenzate dall'andamento topografico del versante	L'andamento topografico del versante influenza notevolmente il crollo di progetto
Nessuna interazione	Moto dei blocchi	Moto e traiettorie dei blocchi in frana sono strettamente interagenti reciprocamente	Il moto dei blocchi influisce sulla distanza raggiunta dal crollo	Moto e velocità dei blocchi sono fortemente interagenti	Il moto dei blocchi può intervenire sul materiale presente lungo il versante	Il moto di blocchi può contribuire allo smussamento delle asperità del versante	Il moto dei blocchi può intervenire sulla presenza di vegetazione lungo il versante	il moto dei blocchi incide sull'altezza di rimbalzo raggiunta dagli stessi	Il moto dei blocchi interagisce notevolmente sul crollo di progetto
Nessuna interazione	Moto e traiettorie dei blocchi in frana sono strettamente interagenti reciprocamente	Traiettoria del crollo	Le traiettorie dei crolli determinano le massime distanze raggiunte	Le traiettorie dei crolli interagiscono fortemente con la velocità dei blocchi	Le traiettorie dei crolli condizionano il tipo di materiale presente lungo il versante	La traiettoria del crollo può contribuire allo smussamento delle asperità del versante	La traiettoria del crollo può condizionare la presenza di vegetazione lungo il versante	Traiettorie di caduta e altezze di rimbalzo sono fortemente interagenti	La traiettoria dei crolli interagisce notevolmente sul crollo di progetto
Nessuna interazione	La massima distanza raggiunta interagisce con il moto dei blocchi in frana	La massima distanza raggiunta interagisce con le traiettorie dei crolli	Massima distanza raggiunta	La massima distanza raggiunta dal crollo è fortemente condizionata dalla velocità di moto del blocco	La massima distanza raggiunta può condizionare il materiale presente lungo il versante	La massima distanza raggiunta può condizionare l'andamento delle asperità lungo il versante	La massima distanza raggiunta può condizionare la presenza di vegetazione lungo il versante	Nessuna interazione	La massima distanza raggiunta interagisce notevolmente sul crollo di progetto
Nessuna interazione	La velocità condiziona il moto dei blocchi	La velocità condiziona le traiettorie dei crolli	La velocità condiziona notevolmente la massima distanza raggiunta dai crolli	Velocità	Bassa interazione	Nessuna interazione	La velocità di caduta dei crolli può condizionare la presenza di vegetazione lungo il versante	La velocità condiziona l'altezza di caduta libera dei blocchi	La velocità di caduta interagisce notevolmente sul crollo di progetto
L'andamento topografico del versante e il materiale presente lungo di esso sono parametri fortemente interagenti tra loro	Il materiale presente lungo il versante condiziona fortemente il moto dei blocchi in frana	Il materiale presente lungo il versante condiziona fortemente le traiettorie dei crolli	Il materiale presente lungo il versante condiziona fortemente la massima distanza raggiunta	Il materiale presente lungo il versante condiziona fortemente le velocità raggiunte dai blocchi	Materiale lungo il versante	Il materiale presente lungo il versante determina la presenza di asperità sulla superficie di impatto	Bassa interazione	Nessuna interazione	Il materiale lungo il versante interagisce notevolmente sul crollo di progetto
Andamento topografico e presenza di asperità lungo il versante sono parametri interagenti	Superfici molto accidentate favoriscono il moto a rimbalzi	La presenza di asperità lungo il versante condiziona le traiettorie dei crolli	La presenza di asperità lungo il versante condiziona le massime distanze raggiunte	La presenza di asperità lungo il versante condiziona l'andamento della velocità	Nessuna interazione	Rugosità superficie di impatto	Nessuna interazione	La presenza di asperità lungo il versante condiziona l'altezza di caduta libera dei blocchi	La presenza di asperità lungo il versante interagisce notevolmente sul crollo di progetto
Nessuna interazione	La presenza di vegetazione influisce sul tipo di moto assunto dal blocco in frana	La presenza di vegetazione influisce sulle traiettorie dei crolli	La presenza di vegetazione condiziona le massime distanze raggiunte	La presenza di vegetazione condiziona l'andamento della velocità	Materiale lungo il versante e presenza di vegetazione sono parametri mediamente interagenti	La vegetazione lungo il versante condiziona la presenza di asperità sulla superficie di impatto	Vegetazione	Nessuna interazione	La presenza di vegetazione influisce sul crollo di progetto
Nessuna interazione	L'altezza di caduta libera e il moto dei blocchi sono parametri strettamente interagenti	Traiettorie di caduta e altezze di rimbalzo sono fortemente interagenti	L'altezza di caduta libera e la massima distanza raggiunta sono parametri strettamente interagenti	L'altezza di caduta libera condiziona la velocità di moto dei blocchi	L'altezza di caduta libera può condizionare il materiale presente lungo il versante	L'altezza di caduta libera può condizionare la presenza di asperità lungo il versante	Nessuna interazione	Altezza di caduta libera	L'altezza di caduta libera interagisce notevolmente sul crollo di progetto
Nessuna interazione	Nessuna interazione	Nessuna interazione	Nessuna interazione	Nessuna interazione	Nessuna interazione	Nessuna interazione	Nessuna interazione	Nessuna interazione	Crollo di progetto

Tabella 3.65 Matrice delle interazioni – qualitativa.

Geometria del versante	3	3	3	3	2	1	1	3	3	22
0	Moto dei blocchi	3	2	3	2	1	1	1	3	16
0	3	Traiettoria del crollo	3	3	1	1	1	3	3	18
0	2	2	Massima distanza raggiunta	3	2	2	1	0	3	15
0	2	3	3	Velocità	1	0	2	2	3	16
3	3	3	3	3	Materiale lungo il versante	3	1	0	3	22
2	2	3	2	2	0	Rugosità superficie di impatto	0	1	3	15
0	2	2	3	2	2	1	Vegetazione	0	2	14
0	1	2	3	2	1	1	0	Altezza di caduta libera	3	13
0	0	0	0	0	0	0	0	0	Crollo di progetto	0
5	18	21	22	21	11	10	7	10	26	

Tabella 3.66 Matrice delle interazioni codificata.

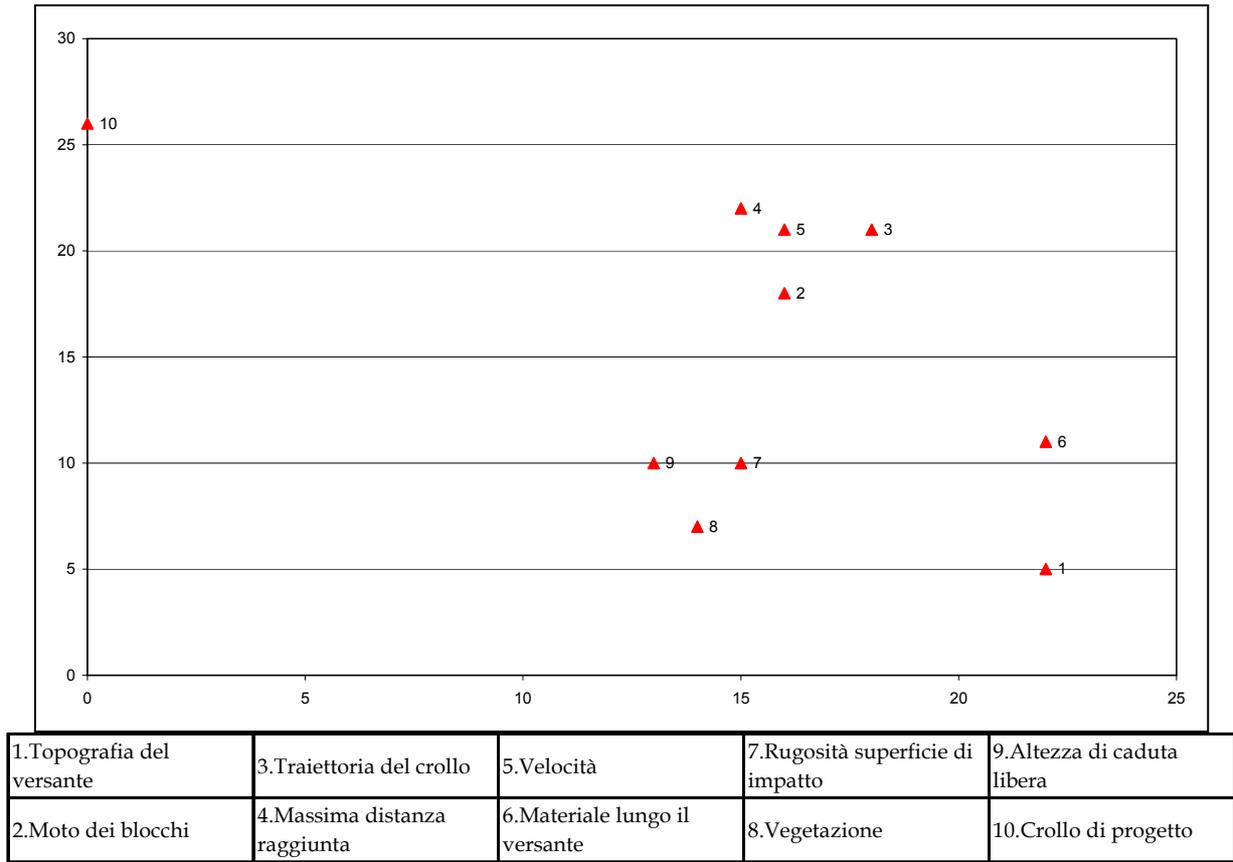


Figura 3.55 Diagramma Cause - Effetti.

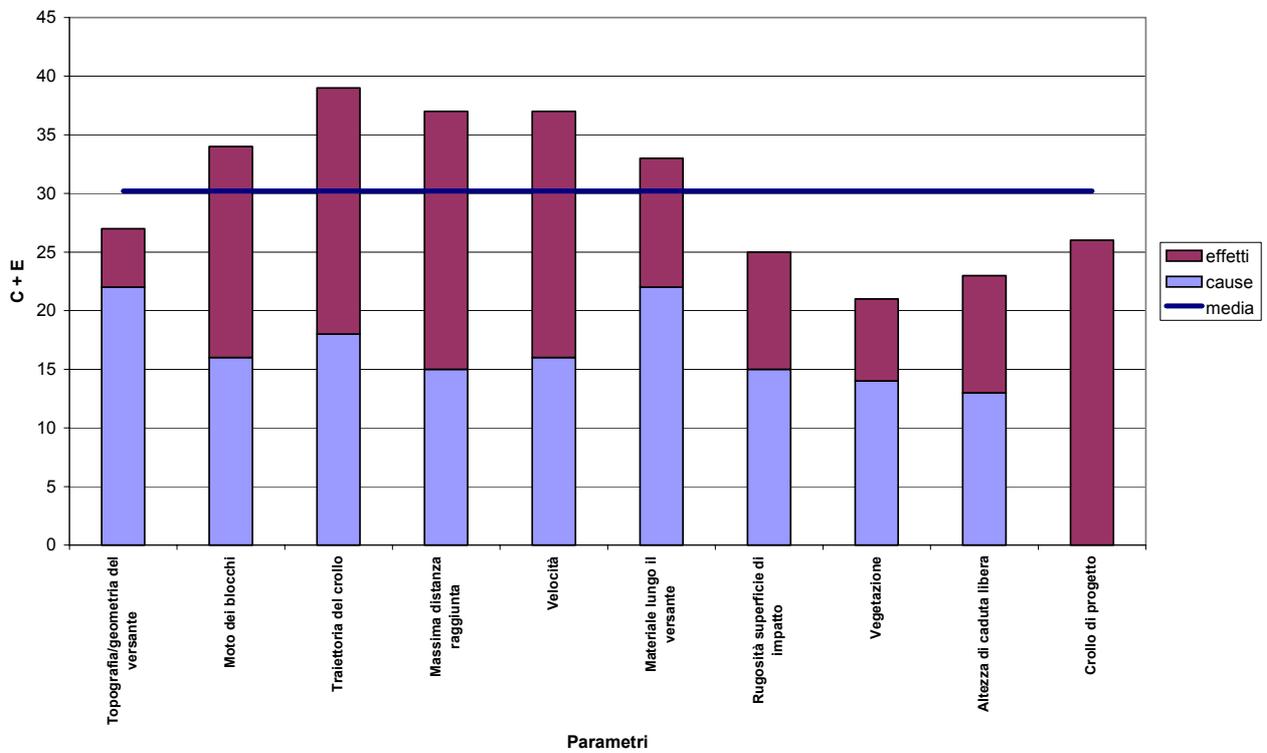


Figura 3.56 Istogramma delle intensità interattive.

Tra i parametri non risultano elevati scarti di interattività, come si può facilmente notare dall'osservazione delle Figure 3.55 e 3.56. I parametri dominanti rispetto al resto del sistema sono la geometria del versante e il materiale presente lungo la superficie di impatto. Viceversa i parametri maggiormente subordinati al sistema sono il "crollo di progetto" e l'altezza di caduta libera dei blocchi.

Il parametro caratterizzato dal più elevato valore di interattività è la traiettoria seguita dai blocchi durante i fenomeni di crollo; tale parametro non solo è influenzato dal sistema esterno, ma ne condiziona anche molti suoi elementi. Il parametro meno interattivo nei confronti del sistema esterno è la vegetazione; comunque gli scarti di interattività sono talmente ridotti da far ritenere che nella fase successiva di studio debbano essere presi in considerazione tutti gli elementi fin qui analizzati (Tabella 3.67).

<i>Parametri</i>	<i>Cause</i>	<i>Effetti</i>	<i>C + E</i>	<i>C + E %</i>
<i>Traiettoria del crollo</i>	18	21	39	14.13
<i>Massima distanza raggiunta</i>	15	22	37	13.41
<i>Velocità</i>	16	21	37	13.41
<i>Moto dei blocchi</i>	16	18	34	12.32
<i>Materiale lungo il versante</i>	22	11	33	11.96
<i>Topografia/geometria del versante</i>	22	5	27	9.78
<i>Rugosità superficie di impatto</i>	15	10	25	9.06
<i>Altezza di caduta libera</i>	13	10	23	8.33
<i>Vegetazione</i>	14	7	21	7.61
<i>Crollo di progetto</i>	0	26	26	

Tabella 3.67 Valori Cause - Effetti e Interattività percentuali.

3.7.1.3 PESO DEI PARAMETRI NELLA DETERMINAZIONE DELL'INDICE DI SUSCETTIBILITÀ ALL'INVASIONE DI FRANE DA CROLLO

Una volta terminata la fase di codifica della matrice, definita quindi l'importanza relativa dei parametri, deve essere preso in considerazione l'effettivo valore numerico di ciascun parametro nella determinazione dell'indice di suscettibilità all'invasione di frane da crollo nelle aree di studio. Alcuni dei parametri scelti sono descritti esclusivamente in maniera qualitativa, altri quantitativamente e con differenti unità di misura; di conseguenza non è possibile utilizzare dei valori effettivi dei parametri per calcolare l'indice di instabilità, ma si è ritenuto più opportuno assegnare dei codici numerici a differenti classi riconosciute con diversi criteri per ciascun parametro.

Di seguito si riportano le classi di valori scelte per ciascun parametro nelle due diverse aree di studio; si sottolinea che a ciascun parametro corrisponde una Carta tematica implementata in ambiente GIS, quindi ciascun parametro risulta "spalmato" sull'intera area di studio.

MONTE SARETTO

Geometria del versante

Sono stati assegnati diversi pesi alle aree del versante caratterizzate da differenti classi di acclività, come riportato in Tabella 3.68.

	Classe	Peso
1 ^a	0° - 21°	0
2 ^a	21° - 42°	1
3 ^a	42° - 63°	2
4 ^a	63° - 85°	3

Tabella 3.68 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

Moto dei blocchi

Le diverse tipologie di moto assunte dai blocchi durante i fenomeni di crollo sono state riconosciute grazie all'utilizzo del *software* ROTOMAP (Tab. 3.69).

	Classe	Peso
1 ^a	percorsi in roto-scivolamento	1
2 ^a	percorsi in volo	2

Tabella 3.69 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

Traiettoria del crollo

Il parametro relativo alle traiettorie percorse dai blocchi durante i fenomeni di crollo è stato classificato facendo riferimento alle aree di innesco dei diversi fenomeni di crollo simulati con ROTOMAP. In particolare, si è dato un peso differente e via via crescente a secondo che le traiettorie partano da aree classificate a bassa, media o elevata suscettibilità all'innesco di fenomeni di crollo, come riportato in Tabella 3.70 (secondo quanto riportato nel paragrafo 3.6.1).

	Classe	Peso
1 ^a	innesco - bassa suscettibilità	1
2 ^a	innesco - media suscettibilità	2
3 ^a	innesco - elevata suscettibilità	3

Tabella 3.70 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

Massima distanza raggiunta - frequenza dei punti di arresto

Con l'ausilio degli *output* ottenuti con le applicazioni di ROTOMAP, sono state ottenute 4 differenti classi di valori, corrispondenti ad aree a diversa probabilità di arresto dei blocchi in frana (Tab. 3.71).

	Classe	Peso
1 ^a	20 - 60 (*10 ⁶ /m ²)	0
2 ^a	60 - 100 (*10 ⁶ /m ²)	1
3 ^a	100 - 140 (*10 ⁶ /m ²)	2
4 ^a	140 - 180 (*10 ⁶ /m ²)	3

Tabella 3.71 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

Energia specifica massima (Velocità)

Come il parametro precedente, anche la velocità dei blocchi lungo le traiettorie è stata ottenuta dalle simulazioni fatte con Rotomap, le diverse classi di energia specifica riconosciute sono riportate nella Tabella 3.72.

	Classe	Peso
1 ^a	50 - 175 (J/Kg)	0
2 ^a	175 - 300 (J/Kg)	1
3 ^a	300 - 425 (J/Kg)	2
4 ^a	425 - 550 (J/Kg)	3

Tabella 3.72 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

Materiale lungo il versante

Per il versante meridionale del Monte Saretto sono state distinte le classi di coperture riportate nella Tabella 3.73 (v. paragrafo 3.1.1). Ovviamente è stato assegnato un peso maggiore alle aree caratterizzate da un minore spessore della copertura piroclastica, fino ad arrivare al peso massimo in corrispondenza delle aree con substrato affiorante:

	Classe	Peso
1 ^a	Copertura piroclastica rimaneggiata 2 - 5 m;	0
2 ^a	Copertura piroclastica rimaneggiata 0,5 - 2 m;	1
3 ^a	Copertura piroclastica rimaneggiata 0 - 0,5 m;	2
4 ^a	Calcarei ben stratificati e talora stratificati affioranti.	3

Tabella 3.73 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

Rugosità della superficie di impatto

La presenza di asperità lungo il versante è stata valutata con l'utilizzo di un applicativo del *software* ArcGis, grazie al quale è stato possibile determinare le aree del versante in cui sono presenti "scalini", "salti di pendenza" o "avvallamenti".

Vegetazione

La presenza di vegetazione di alto fusto lungo il versante condiziona le traiettorie di caduta dei blocchi e può anche determinarne l'arresto; di conseguenza è stato assegnato un peso minore in questo caso rispetto alla presenza di vegetazione costituita da erba bassa ed arbusti (Tab. 3.74).

	Classe	Peso
1 ^a	Vegetazione ad alto fusto	1
2 ^a	Vegetazione costituita da erba bassa ed arbusti	2

Tabella 3.74 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

Altezza di caduta libera

Un ulteriore *output* del *software* ROTOMAP è dato dall'altezza di rimbalzo rispetto al versante, in ciascun punto delle traiettorie percorse dai blocchi, le classi delle altezze di caduta libera sono riportate nella Tabella 3.75.

	Classe	Peso
1 ^a	< 2 m	0
2 ^a	2 - 5 m	1
3 ^a	5 - 8 m	2
4 ^a	> 8 m	3

Tabella 3.75 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

COLLINA DEI CAMALDOLI

Geometria del versante

Le diverse classi di acclività in cui è stata suddivisa l'area di studio sono citate nella Tabella 3.76.

	Classe	Peso
1 ^a	0° - 30°	0
2 ^a	30° - 45°	1
3 ^a	45° - 60°	2
4 ^a	60° - 86°	3

Tabella 3.76 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

Moto dei blocchi

Le diverse tipologie di moto assunte dai blocchi durante i fenomeni di crollo sono state riconosciute grazie all'utilizzo del *software* ROTOMAP (Tabella 3.77).

	Classe	Peso
1 ^a	percorsi in roto-scivolamento	1
2 ^a	percorsi in volo	2

Tabella 3.77 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

Traiettoria del crollo

Il parametro relativo alle traiettorie percorse dai blocchi durante i fenomeni di crollo è stato classificato facendo riferimento alle aree di innesco dei diversi fenomeni di crollo simulati con Rotomap, così come riportato nella Tabella 3.78.

	Classe	Peso
1 ^a	innesco - bassa suscettibilità	1
2 ^a	innesco - media suscettibilità	2
3 ^a	innesco - elevata suscettibilità	3

Tabella 3.78 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

Massima distanza raggiunta - frequenza dei punti di arresto

Con l'ausilio degli *output* ottenuti con le applicazioni di ROTOMAP, sono state ottenute 4 differenti classi di valori, corrispondenti ad aree a diversa probabilità di arresto dei blocchi in frana (Tabella 3.79).

	Classe	Peso
1 ^a	20 - 48 (*10 ⁶ /m ²)	0
2 ^a	48 - 85 (*10 ⁶ /m ²)	1
3 ^a	85 - 123 (*10 ⁶ /m ²)	2
4 ^a	123 - 160 (*10 ⁶ /m ²)	3

Tabella 3.79 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

Energia specifica massima (Velocità)

Come il parametro precedente, anche la velocità dei blocchi lungo le traiettorie è stata ottenuta dalle simulazioni fatte con ROTOMAP, le classi di energia specifica riconosciute sono riportate in Tabella 3.80.

	Classe	Peso
1 ^a	50 - 250 (J/Kg)	0
2 ^a	250 - 400 (J/Kg)	1
3 ^a	400 - 550 (J/Kg)	2
4 ^a	550 - 700 (J/Kg)	3

Tabella 3.80 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

Materiale lungo il versante

Per la collina dei Camaldoli sono state distinte le classi di coperture riportate nella Tabella 3.78 (v. paragrafo 3.1.1). ovviamente è stato assegnato un peso maggiore alle aree caratterizzate da un minore spessore della copertura piroclastica, fino alla sua totale assenza nel caso di substrato affiorante.

	Classe	Peso
1 ^a	Depositi antropici, detritici e di fondo valle	0
2 ^a	Piroclastiti flegree post TGN	1
3 ^a	Tufo Biancastra, Tufo di Soccavo e Ignimbrite Campana	2
4 ^a	Tufo Giallo Napoletano	3

Tabella 3.81 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

Rugosità della superficie di impatto

La presenza di asperità lungo il versante è stata valutata con l'utilizzo di un applicativo del *software* ArcGis, grazie al quale è stato possibile determinare le aree del versante in cui sono presenti "scalini", "salti di pendenza" o "avvallamenti".

Vegetazione

La presenza di vegetazione lungo il versante è stata considerata allo stesso modo eseguito per il versante meridionale del Monte Saretto (Tabelle 3.74).

Altezza di caduta libera

Un ulteriore *output* del *software* ROTOMAP è dato dall'altezza di rimbalzo rispetto al versante, in ciascun punto delle traiettorie percorse dai blocchi, le classi riconosciute sono riportate nella Tabella 3.82.

	Classe	Peso
1 ^a	< 4 m	0
2 ^a	4 - 8 m	1
3 ^a	8 - 11 m	2
4 ^a	> 11 m	3

Tabella 3.82 Intervallo numerico delle classi individuate ed attribuzione dei relativi pesi.

3.7.2 INDICE DI SUSCETTIBILITÀ AL TRANSITO ED ALL'INVASIONE DI FRANE DA CROLLO

In definitiva, la valutazione della suscettibilità indotta dalla caduta massi è completata attraverso la sovrapposizione delle Carte tematiche precedentemente elencate, ciascuna moltiplicata per il relativo peso ottenuto dalle elaborazioni fin qui svolte (Tab. 3.67).

La metodologia proposta, avvalendosi dell'utilizzo di un programma di simulazioni tridimensionale, consente di ottenere risultati anche in aree molto estese e diversificate.

Il risultato conseguito è la distribuzione spaziale dell'indice di suscettibilità sull'intera area di studio. Dalla combinazione dei parametri si è ottenuta la determinazioni di 4 differenti classi di suscettibilità (Tavole 3.11 e 3.12):

- Bassa suscettibilità al transito ed all'invasione di frane da crollo;
- Media suscettibilità al transito ed all'invasione di frane da crollo;
- Elevata suscettibilità al transito ed all'invasione di frane da crollo;
- Molto Elevata suscettibilità al transito ed all'invasione di frane da crollo.

Ulteriore fase di studio sarà la combinazione dei due indici di suscettibilità ottenuti durante questo studio: l'Indice di Suscettibilità all'innesco con l'Indice di Suscettibilità all'invasione e transito.

3.8 UTILIZZO DI TECNICHE LASER SCANNING TERRESTRI PER L'ANALISI GEOMECCANICA DI AMMASSI ROCCIOSI

La metodologia proposta permette di individuare, a partire da un rilievo laser scanner e dai dati da esso deducibili, le superfici di discontinuità primarie e secondarie cinematicamente attivabili in versanti rocciosi e dunque potenzialmente responsabili di distacchi di blocchi (vedi paragrafo 2.2.2.2).

Le analisi cinematiche alla base della metodologia proposta, sono state effettuate applicando il cosiddetto Test di Matheson (Matheson, 1983). Tale metodo risulta infatti utile per fornire un'indicazione qualitativa della stabilità di uno o più piani di discontinuità in funzione del loro orientamento reciproco rispetto al versante.

3.8.1 METODOLOGIA

L'obiettivo di questa fase della ricerca è quello di valutare nuovi metodi per l'analisi e la gestione di frane da crollo, con l'ausilio delle tecnologie GIS. In particolare sono state sviluppate diverse fasi di analisi, concepite per essere riproducibili in un'ampia casistica di aree anche dalle caratteristiche geologiche e morfologiche differenti.

Si ricorda che i particolari sulla scansione e sul sito rilevati sono riportati nel paragrafo 2.2.2.2.

A partire dal DEM (modello digitale del terreno) ottenuto dal rilievo laser scanner, sarà sperimentata una metodologia per la realizzazione semiautomatica di analisi cinematiche, volte a determinare la stabilità di cunei e porzioni di roccia: ovvero si verificherà se la giacitura delle discontinuità riconosciute tramite l'analisi del DEM, rispetto all'orientamento del versante, può indurre condizioni di instabilità per le tipologie di rottura di tipo planare o a cuneo (non sono presi in considerazione i ribaltamenti).

Primo passaggio necessario per le elaborazioni da eseguire è la georeferenziazione del rilievo eseguito con tecnologia *laser scannino*. Il sistema di riferimento scelto è il Gauss-Boaga, rispetto al quale, per il versante in studio, è facilmente individuabile la direzione del nord, necessaria per una corretta determinazione dei parametri geo-strutturali dell'ammasso.

In base al modello interpolato dal rilievo Laserscan sono state determinate le famiglie di giunti e si è cercato di determinare anche la giacitura dei vari giunti visibili. La

restituzione dei piani rappresentativi dei giunti in 3D viene fatta tridimensionalmente dalla nuvola di punti, tramite la selezione dei punti battuti sul giunto e su questi punti si calcola il piano caratterizzato da minore errore quadratico, di tale piano si valuta quindi la giacitura rispetto al nord.

Una volta riconosciute le principali famiglie di discontinuità presenti sulla parete di cava oggetto dello studio, nonché determinate per ciascuna famiglia i valori di immersione e inclinazione, è possibile applicare il modello dedicato all'individuazione dei cinematismi potenzialmente attivabili.

Il modello utilizzato si basa sulla valutazione, per tutte le giaciture riconosciute, delle condizioni strutturali necessarie per lo sviluppo dei seguenti meccanismi di rottura: scivolamento planare o rottura a cuneo.

Secondo quanto descritto nel paragrafo precedente, le condizioni da verificare sono le seguenti:

- cinematismi di instabilità lungo superfici planari:
 - 1) l'immersione della superficie di potenziale scivolamento deve essere di circa $\pm 20^\circ$ rispetto all'immersione del pendio;
 - 2) l'inclinazione della discontinuità deve essere minore dell'inclinazione del pendio o la potenziale superficie di scivolamento deve affiorare sul pendio;
 - 3) l'inclinazione della discontinuità deve essere maggiore dell'angolo di attrito della superficie della discontinuità stessa.
- cinematismi di rottura a cuneo:
 - 4) la direzione della linea d'intersezione deve approssimare la direzione del versante;
 - 5) l'inclinazione della linea d'intersezione deve essere minore dell'inclinazione del versante;
 - 6) l'inclinazione della linea di intersezione deve essere maggiore del valore dell'angolo di attrito della superficie di discontinuità.

Il metodo così esplicitato (figura 3.57) permette di individuare le esatte porzioni del versante (in accordo con la risoluzione del DEM) ove le discontinuità, considerate presenti in ugual modo su tutta la parete, possa dare origine a rottura (Piacentini & Strada, 2006).

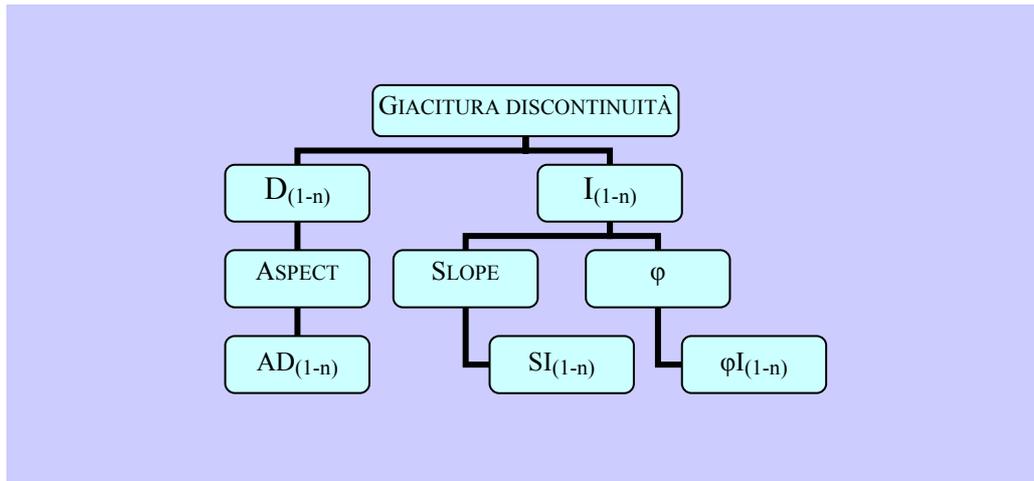


Figura 3.57 Schema della metodologia applicata.

D = immersione della discontinuità o dell'intersezione tra due discontinuità;
 I = inclinazione delle discontinuità o dell'intersezione tra due discontinuità;
 φ = angolo di attrito interno;
 AD, SI, φI = carte derivate dal confronto tra le condizioni reali e quelle necessarie per la rottura.

Nella carta AD sono evidenziate tutti i sistemi di discontinuità per cui il valore dell'angolo di immersione verifica le condizioni 1 e 4; nella carta SI sono evidenziate tutti i sistemi di discontinuità per cui il valore dell'inclinazione verifica le condizioni 2 e 5; nella carta φI sono evidenziate tutte le discontinuità per le quali il valore dell'inclinazione verifica le condizioni 3 e 6.

La carta definitiva dei cinematismi potenzialmente innescabili è data dall'intersezione delle 3 carte elaborate:

$$AD \cap SI \cap \varphi I$$

CAPITOLO 4. CONCLUSIONI

L'interesse verso lo sviluppo di una metodologia finalizzata alla valutazione della stabilità di versanti rocciosi ha preso spunto dalla gravità dei fenomeni franosi che periodicamente colpiscono numerose zone della Campania; gravità che deriva non solo dalle precarie condizioni di stabilità naturale di numerosi versanti, ma anche dalla densità della popolazione, degli insediamenti e delle infrastrutture.

In particolare, lo scopo della presente tesi è stato lo sviluppo di una metodologia di facile utilizzo ed interfacciabile con gli strumenti di analisi territoriale (GIS) che permettesse l'elaborazione di mappe speditive di pericolosità relativa di tali fenomeni, poi sviluppabili per approfondimenti successivi.

La metodologia proposta ha previsto una prima fase di lavoro dedicata al rilevamento di dati di campagna relativi alle aree oggetto di studio finalizzata alla qualificazione geomeccanica degli ammassi rocciosi oggetti dello studio ed all'individuazione dei principali cinematismi che li caratterizzano.

La fase di rilevamento dei dati sul territorio è stata fortemente influenzata dalla scarsa accessibilità dei fronti rocciosi in esame, soprattutto per quanto riguarda l'area di studio della Collina dei Camaldoli. Tuttavia, i dati registrati, integrati in un unico *database* con le informazioni sulle frane, sulla litologia e sulla morfologia, hanno consentito di sviluppare il modello in maniera soddisfacente.

I dati acquisiti durante i rilievi geostrutturali hanno altresì consentito di riconoscere le potenziali aree di innesco dei crolli ed i possibili cinematismi attivabili.

A partire dal rilevamento geologico-geomorfologico di dettaglio sono state individuate le aree omogenee dal punto di vista della caratterizzazione geomeccanica all'interno delle quali sono stati definiti i parametri necessari per l'applicazione di ROTOMAP, un modello in grado di simulare i fenomeni di crollo al fine di calcolare energie, traiettorie, altezze di volo e punti di arresto dei singoli blocchi.

Alla fase di rilevamento è seguita la stima dei coefficienti di restituzione normale, tangenziale e degli angoli di attrito, che ha richiesto un impegnativo lavoro di analisi e di confronto incrociato in ambiente GIS dei *database* della banca dati geologica e territoriale disponibili.

Durante questa fase di ricerca è stato sviluppato un sistema informativo geografico per entrambe le aree di studio, all'interno del quale sono stati raccolti tutti i dati digitali disponibili ed a questi sono stati aggiunti tutti i nuovi dati ottenuti dalle indagini di campagna.

Si fa presente che per le aree di studio sono stati utilizzati due differenti sistemi di coordinate: UTM con datum WGS84 (*World Geodetic System '84*) per la Collina dei Camaldoli e Gauss - Boaga per il Monte Saretto. Ciò è stato dettato dal formato dei dati disponibili.

A partire dalle Carte tematiche disponibili, le altre Carte necessarie per lo sviluppo della metodologia proposta sono state ricavate da elaborazioni eseguite con l'applicativo ArcGis dell'ESRI.

In particolare, per la determinazione dell'indice di suscettibilità all'innescò, al transito ed all'invasione di fenomeni di crollo, è stato elaborato il modello digitale del terreno (DTM), generato tramite un passaggio per il TIN, in modo da poter verificare la presenza di errori macroscopici quali curve di livello con quote errate.

Per il Monte Saretto il DTM è stato generato dal rilievo fotogrammetrico in scala 1:1000, fornito dal Commissariato di Governo per l'Emergenza Idrogeologica della Regione Campania. Per la Collina dei Camaldoli il DTM con risoluzione 5 m è stato fornito dal laboratorio di Geomatica e Cartografia dell'Osservatorio Vesuviano.

L'uso dell'applicativo ArcGis dell'ESRI ha consentito di creare le altre carte tematiche essenziali allo sviluppo della metodologia:

- Carta delle acclività;
- Carta dell'esposizione dei versanti;
- Carta della rugosità della superficie di impatto; utile per individuare eventuali asperità incontrate dai blocchi lungo il versante durante le proprie traiettorie di caduta.

Tali carte, insieme a tutte le informazioni recuperate durante le campagne di rilievo e georiferite sulla base topografica di riferimento, hanno costituito la base dati di riferimento, utilizzata nella prima implementazione del metodo proposto, relativa alla valutazione dell'indice della suscettibilità all'innescò di frane da crollo.

L'impegno speso in questa sede per verificare la congruenza e l'integrità delle informazioni contenute nei *database*, fa sì che risulti speditivo l'eventuale aggiornamento dei dati disponibili, nonché l'integrazione degli stessi con ulteriori informazioni acquisite.

Come esplicitato nei paragrafi 3.5.4.1 e 3.5.4.2 dalla sovrapposizione dei diversi *layers* si è ottenuta la Carta della suscettibilità all'innescò di frane da crollo, individuando sulle aree campione zone caratterizzate da tre diversi gradi di suscettibilità: alta, media e bassa.

Nelle aree che sono risultate ad alta suscettibilità al dissesto è possibile affermare che l'ammasso roccioso può essere investito da dinamiche ambientali che indeboliscono rapidamente le caratteristiche di resistenza del versante. L'alta suscettibilità di queste aree è spesso associata all'alta velocità di perdita di resistenza che produce fenomeni improvvisi e per questo molto pericolosi.

Nelle aree a media suscettibilità, possiamo ritenere che i parametri del sistema, pur agendo ed interessando l'ammasso roccioso, non producono con la stessa velocità le perdite di resistenza portando il versante al dissesto frequentemente. Questo non significa che su questi versanti non possano verificarsi dissesti, anzi, proprio su questi versanti si deve intervenire, magari con delle procedure di semplice monitoraggio, che scongiurino il verificarsi di episodi accidentali che possano far accelerare i processi di indebolimento dell'ammasso e portare il versante al dissesto globale.

In tutte le aree a bassa suscettibilità, invece, possiamo ritenere che le dinamiche ambientali ed i termini presi in considerazione dal sistema non producano effetti né tanto rapidi né tanto gravosi per l'ammasso roccioso da provocare frane in tempi brevi.

La validazione del modello utilizzato è stata fatta confrontando le Carte così ottenute con analoghe Carte precedentemente prodotte e fruibili presso il Dipartimento di Ingegneria Geotecnica - Sezione di Geologia Applicata.

Per l'area di studio della Collina dei Camaldoli, la verifica è stata fatta sul confronto con la Carta della pericolosità da frana redatta dall'Autorità di Bacino Nord-Occidentale della Campania; viceversa per il Monte Saretto, la Carta della suscettibilità all'innescò di frane da crollo ottenuta in questa sede è stata comparata con quella prodotta dalla S.I.A. Geognostica s.r.l., durante la campagna di rilievi geomeccanica propedeutica per il progetto degli "Interventi di risanamento del Monte Saretto" nel territorio comunale di Sarno (SA).

In entrambi i casi si è notata una buona congruenza tra le Carte confrontate. Di conseguenza la metodologia sviluppata può ritenersi soddisfacente ed applicabile ad aree di studio caratterizzate da proprietà litologiche e morfologiche differenti.

Terminata la valutazione dell'indice di suscettibilità all'innescò di frane da crollo, si è affrontata la successiva fase di ricerca, consistente nella modellazione cinematica delle traiettorie di caduta dei blocchi.

In questa fase di lavoro, i dati ottenuti nei precedenti *step*, associati ad altri parametri di base, sono stati utilizzati per il funzionamento di un applicativo (ROTOMAP) in grado di simulare i fenomeni di crollo con origine nelle aree omogenee precedentemente identificate; e sono state inoltre calcolate le energie e le traiettorie dei singoli blocchi, al fine di ottenere una mappatura delle aree a diversa suscettibilità al transito ed all'invasione dei blocchi.

L'Indice di suscettibilità all'innescò di frane da crollo è stato valutato dalla combinazione dei seguenti parametri:

1. Litologia
2. Faglie
3. Precipitazioni
4. Instabilità precedente
5. Numero delle famiglie di discontinuità
6. Orientazione delle discontinuità
7. Apertura delle discontinuità
8. Persistenza delle discontinuità
9. Spaziatura delle discontinuità
10. Proprietà meccaniche delle discontinuità
11. Volume di Roccia Unitario
12. Meccanismi di rottura
13. Resistenza della massa rocciosa
14. Orientazione della scarpata
15. Dimensioni della scarpata
16. Acclività delle scarpate

L'Indice di suscettibilità al transito ed all'invasione dei blocchi è stato valutato dalla combinazione dei seguenti parametri:

1. Moto dei blocchi
2. Traiettorie dei crolli
3. Massima distanza raggiunta – frequenza dei punti di arresto
4. Velocità
5. Materiale lungo il versante
6. Rugosità della superficie di impatto
7. Vegetazione
8. Altezza di caduta libera

Ad eccezione dei parametri 5 e 6, gli altri sono stati ottenuti come *output* dall'applicazione di Rotomap. Al fine di poter integrare tra loro i diversi parametri, i dati ottenuti in formato vettoriale sono stati “spalmati” sul territorio e trasformati in formato *raster*; quindi il risultato finale è stato una Carta della suscettibilità, con informazioni distribuite sull'intera area di ricerca.

Dall'osservazione delle Carte di suscettibilità ottenute (Tavole 3.11 e 3.12) si possono trarre le seguenti conclusioni per le due differenti aree di studio:

- nell'area di studio del Monte Saretto, in congruenza con quanto già osservato nella fase di rilievo geostrutturale, la zona del centro abitato maggiormente esposta al transito ed all'invasione di blocchi in frana è quella corrispondente al nucleo storico del comune di Sarno, la quale è classificata con suscettibilità da media a molto elevata. La restante area del territorio comunale risulta per lo più caratterizzata da bassa suscettibilità al transito ed all'invasione, ad eccezione di una fascia che si estende per circa 600 metri parallelamente al versante in esame ed è caratterizzata da suscettibilità media;
- nell'area di studio della Collina dei Camaldoli risalta immediatamente la condizione nettamente sfavorevole del versante orientale, incombente su Soccavo, rispetto a quello occidentale, incombente su Pianura. Infatti nel primo caso il versante risulta quasi interamente classificato con suscettibilità tra elevata e molto elevata e l'abitato di Soccavo è qualificato da media suscettibilità al transito ed all'invasione; viceversa nel secondo caso buona parte del versante è caratterizzato da un grado di suscettibilità medio, con poche aree a suscettibilità elevata e molto elevata; il centro abitato di Pianura risulta con suscettibilità da bassa a media.

Nelle Figure 4.1 e 4.2 è riportato lo schema logico della metodologia proposta.

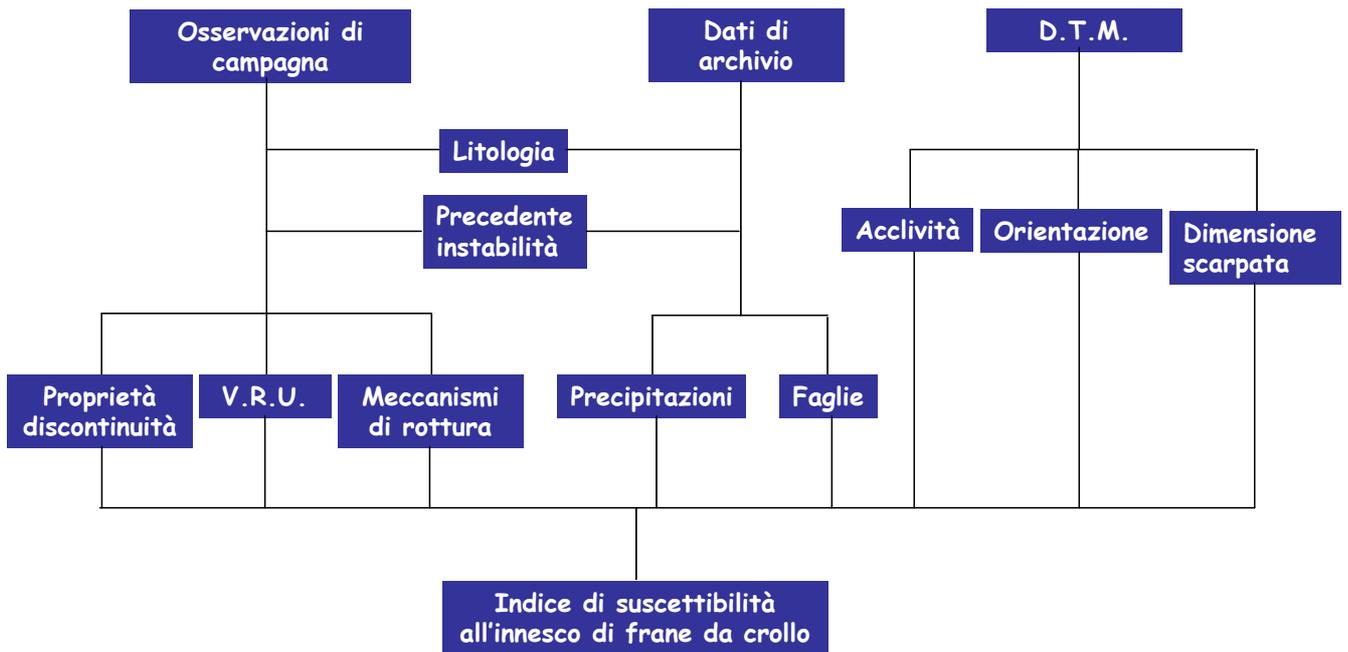


Figura 4.1 Schema logico della metodologia proposta per la valutazione dell'Indice di Suscettibilità all'innesco di frane da crollo.

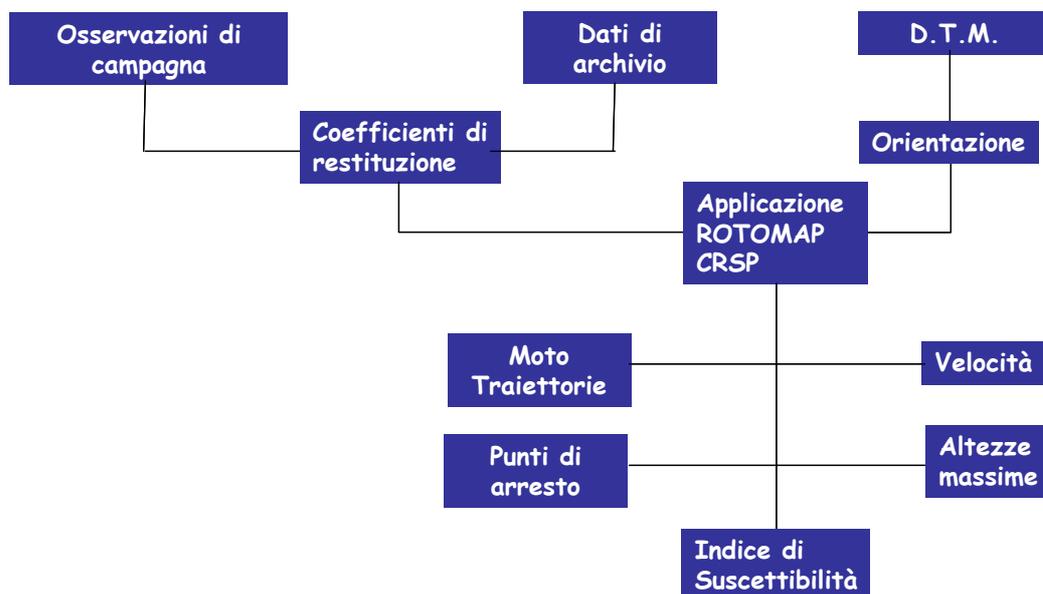


Figura 4.2 Schema logico della metodologia utilizzata per la valutazione dell'Indice di Suscettibilità al transito ed all'invasione de frane da crollo.

La natura della metodologia utilizzata consente di poter integrare in ogni momento i dati di partenza, aggiungendo al *database* informazioni nuovamente acquisite e modificando facilmente quelle già archiviate, in modo da mantenere costantemente aggiornata la banca dati.

Inoltre, utilizzando un modello su base matriciale, è possibile aggiungere alla matrice delle interazioni (par. 3.7.1.2) nuovi parametri che si ritengono necessari allo sviluppo del modello, l'integrazione di un nuovo parametro nella matrice sarà fatto in maniera speditiva, a conferma della notevole elasticità della metodologia proposta.

I possibili futuri sviluppi del presente studio riguardano la combinazione dei due indici elaborati, al fine di ottenere un'unica Carta in cui sia rappresentata la suscettibilità di frane da crollo in tutti i suoi aspetti: Innesco - Transito ed Invasione.

In questa sede si mostra una prima immediata elaborazione ottenuta dalla somma dei due indici precedentemente calcolati (Tavole 4.1 e 4.2).

Le aree campione risultano classificate con quattro diversi classi di suscettibilità: bassa, media, elevata e molto elevata.

In accordo con le elaborazioni svolte negli step precedenti, per quanto riguarda il Monte Saretto, l'area del centro abitato caratterizzata da più elevata suscettibilità è quella coincidente con il centro storico di Sarno; ugualmente per la Collina dei Camaldoli, il versante orientale, di conseguenza l'abitato di Soccavo, risultano maggiormente esposti all'innesco, al transito ed all'invasione di frane in roccia.

ALLEGATO 1 (SIMULAZIONI CON IL SOFTWARE CRSP)

1. Crollo di Aprile 2004 – Monte Saretto

Parametri di ingresso

Units of Measure: Metric
 Total Number of Cells: 14
 Analysis Point 1 X-Coordinate: 235
 Analysis Point 2 X-Coordinate:
 Analysis Point 3 X-Coordinate:
 Initial Y-Top Starting Zone Coordinate: 224
 Initial Y-Base Starting Zone Coordinate: 222

Cell No.	S.R.	Tang. C.	Norm. C.	Begin X	Begin Y	End X	End Y
1	.7	.85	.35	0	233	5.6	225
2	.7	.85	.35	5.6	225	13	214.5
3	.7	.83	.33	13	214.5	50	187
4	.7	.83	.33	50	187	101	152
5	.7	.83	.33	101	152	123.4	138
6	.7	.85	.35	123.4	138	150.5	120.3
7	.4	.9	.4	150.5	120.3	156.5	116
8	.7	.85	.35	156.5	116	169.5	108.7
9	.7	.85	.33	169.5	108.7	182.5	102.3
10	.7	.85	.35	182.5	102.3	195.5	95
11	.7	.85	.35	195.5	95	208	87
12	.7	.85	.35	208	87	221.6	80.3
13	.7	.85	.35	221.6	80.3	239	74
14	.7	.83	.33	239	74	256	64

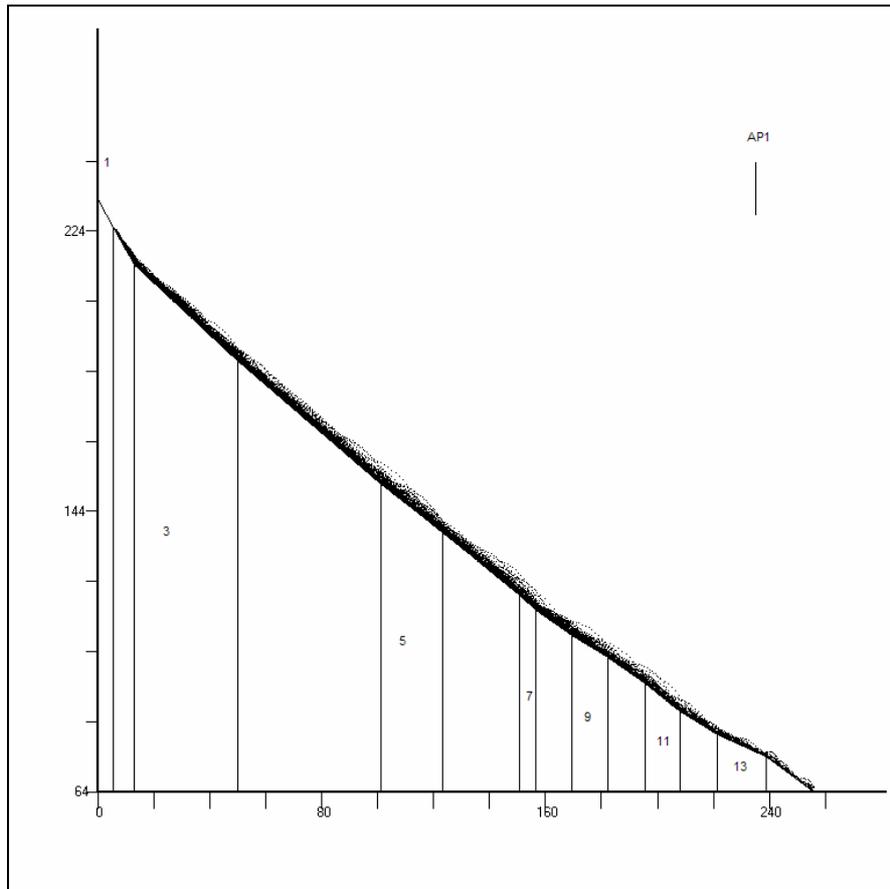
CRSP Simulation Specifications: Used with

Total Number of Rocks Simulated: 100
 Starting Velocity in X-Direction: 1 m/sec
 Starting Velocity in Y-Direction: 1 m/sec
 Starting Cell Number: 1
 Ending Cell Number: 14
 Rock Density: 2600 kg/m³
 Rock Shape: Spherical
 Diameter: 1 m

Output

Analysis Point 1: X = 235, Y = 75
 Total Rocks Passing Analysis Point: 16

Cumulative Probability	Velocity (m/sec)	Energy (J)	Bounce Ht. (m)
50%	6,9	53598	0,12
75%	9,31	91299	6,82
90%	11,47	125209	12,86
95%	12,78	145567	16,48
98%	14,24	168416	20,54



Velocity (m/sec)	Bounce Height (m)	Kinetic Energy (J)
Maximum: 15.11	Maximum: 1.58	Maximum:
216595		
Average: 6.9	Average: .39	Average: 53598
Minimum: 2.67	G. Mean: .12	Std. Dev.: 55837
Std. Dev.: 3.57	Std. Dev.: 9.93	

CRSP Data Collected at End of Each Cell -
 Velocity Units: m/sec Bounce Height Units: m

Cell #	Max. Vel.	Avg. Vel.	S.D. Vel.	Max. Bounce Ht.	Avg. Bounce Ht.
1	No rocks past end of cell				
2	13	9	1.78	3	1
3	18	10	3.26	4	1
4	20	11	4.3	6	1
5	20	10	4.32	4	1
6	18	11	3.8	6	1
7	21	13	3.89	5	1
8	25	10	4.33	4	1
9	19	9	4.39	4	0
10	20	8	4.07	5	1
11	21	9	4.14	4	0
12	15	8	3.26	2	0
13	16	6	3.73	1	0
14	10	8	2.4	1	0

CRSP Rocks Stopped Data -

X Interval	Rocks Stopped
0 To 10 m	0
10 To 20 m	5
20 To 30 m	2
30 To 40 m	2
40 To 50 m	1
50 To 60 m	1
60 To 70 m	0
70 To 80 m	3
80 To 90 m	0
90 To 100 m	2
100 To 110 m	2
110 To 120 m	3
120 To 130 m	3
130 To 140 m	1
140 To 150 m	1
150 To 160 m	1
160 To 170 m	0
170 To 180 m	10
180 To 190 m	10
190 To 200 m	4
200 To 210 m	8
210 To 220 m	6
220 To 230 m	14
230 To 240 m	11
240 To 250 m	0
250 To 256 m	0

2. Crollo di Marzo 2005 – Collina dei Camaldoli

Parametri di ingresso

Units of Measure: Metric
Total Number of Cells: 5
Analysis Point 1 X-Coordinate: 170
Analysis Point 2 X-Coordinate: 0
Analysis Point 3 X-Coordinate: 0
Initial Y-Top Starting Zone Coordinate: 290
Initial Y-Base Starting Zone Coordinate: 174

Cell Data

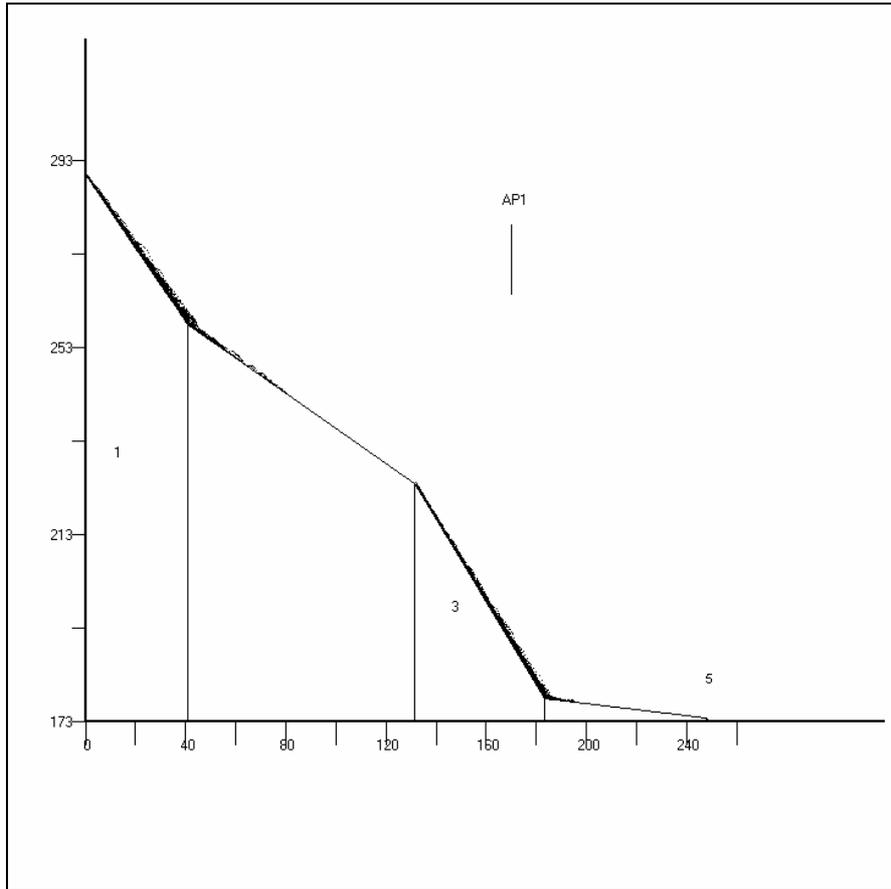
Cell No.	S.R.	Tang. C.	Norm. C.	Begin X	Begin Y	End X	End Y
1	.7	.5	.5	0	290	40.85	258
2	.7	.3	.2	40.85	258	131.48	224
3	.7	.3	.2	131.48	224	183.48	178
4	.7	.3	.2	183.48	178	248	174
5	.7	.3	.2	248	174	249	173

Total Number of Rocks Simulated: 200
Starting Velocity in X-Direction: 2 m/sec
Starting Velocity in Y-Direction: -0.3 m/sec
Starting Cell Number: 1
Ending Cell Number: 5
Rock Density: 1500 kg/m³
Rock Shape: Spherical
Diameter: 1 m

Output

Analysis Point 1: X = 170, Y = 190
Total Rocks Passing Analysis Point: 48

Cumulative Probability	Velocity (m/sec)	Energy (J)	Bounce Ht. (m)
50%	6.63	23356	0.32
75%	8.09	32931	3.94
90%	9.41	41544	7.2
95%	10.2	46714	9.15
98%	11.09	52517	11.34



Velocity (m/sec)	Bounce Height (m)	Kinetic Energy (J)
Maximum: 12.25	Maximum: 1.86	Maximum: 66825
Average: 6.63	Average: .63	Average: 23356
Minimum: 2.32	G. Mean: .32	Std. Dev.: 14181
Std. Dev.: 2.17	Std. Dev.: 5.36	

Cell #	Max. Vel.	Avg. Vel.	S.D. Vel.	Max. Bounce Ht.	Avg. Bounce Ht.
1	15	8	3.35	3	1
2	No rocks	past end of cell			
3	13	7	2.49	3	0
4	No rocks	past end of cell			
5	No rocks	past end of cell			

CRSP Rocks Stopped Data -

X Interval	Rocks Stopped
0 To 10 m	65
10 To 20 m	1
20 To 30 m	1
30 To 40 m	3
40 To 50 m	29
50 To 60 m	16
60 To 70 m	5
70 To 80 m	0
80 To 90 m	0
90 To 100 m	0

100	To	110	m	0
110	To	120	m	0
120	To	130	m	0
130	To	140	m	2
140	To	150	m	3
150	To	160	m	4
160	To	170	m	3
170	To	180	m	3
180	To	190	m	61
190	To	200	m	4
200	To	210	m	0
210	To	220	m	0
220	To	230	m	0
230	To	240	m	0
240	To	249	m	0

ALLEGATO 2 (CARTOGRAFIA)

Elenco Tavole

Tavola 3.1 Carta geolitologica del versante meridionale del Monte Saretto

Tavola 3.2 Carta degli spessori della coltre piroclastica sul versante meridionale del Monte Saretto

Tavola 3.3 Carta geomorfologica del versante meridionale del Monte Saretto

Tavola 3.4 Carta geologica della Collina dei Camaldoli

Tavola 3.5 Carta geomorfologica della Collina dei Camaldoli

Tavola 3.6 Carta del rilievo fotogrammetrico del versante meridionale del Monte Saretto

Tavola 3.7 Carta dell'indice di suscettibilità all'innesco di frane da crollo - Monte Saretto

Tavola 3.8 Carta dell'indice di suscettibilità all'innesco di frane da crollo - Collina dei Camaldoli

Tavola 3.9 Risultati dell'applicazione del Rotomap - Monte Saretto

Tavola 3.10 Risultati dell'applicazione del Rotomap - Collina dei Camaldoli

Tavola 3.11 Carta della suscettibilità al transito e all'invasione di frane da crollo - Monte Saretto

Tavola 3.12 Carta della suscettibilità al transito e all'invasione di frane da crollo - Collina dei Camaldoli

Tavola 4.1 Carta della suscettibilità all'innesco, al transito e all'invasione di frane da crollo - Monte Saretto

Tavola 4.2 Carta della suscettibilità all'innesco, al transito e all'invasione di frane da crollo - Collina dei Camaldoli

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- ARPA Piemonte (2004). Progetto IFFI – Inventario Fenomeni Franosi in Italia, l'esperienza in Piemonte. Centro Regionale per le Ricerche Geologiche e Territoriali.
- Artuso G., Monteverde R. (2004). Relazione geologica preliminare del versante meridionale del Monte Saretto (Sarno) – Commissariato di Governo per l'Emergenza Idrogeologica in Campania – Relazione inedita.
- Azzoni A., de Freitas M.H. (1995). Experimentally gained parameters, decisive for rockfall analysis. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 28 (2), pp. 111-124.
- Azzoni A., La Barbera G. & Mazzà G. (1991). Studio con modello matematico e con sperimentazione in sito del problema di caduta massi. *Bollettino Associazione Mineraria Subalpina*, Torino 28 (4), pp. 547-573.
- Baillifard, F., Jaboyedoff, M. & Sartori, M. (2003). Rockfall hazard mapping along a mountainous road in Switzerland using an empirical approach. *Natural Hazards and Earth System Sciences*. Vol 3, pp. 435-442.
- Barberi F., Capezza M., Innocenti F. Luongo G., Santacroce R. (1989). The problem of volcanic unrest: the Phlegraean Fields case history. In: Boriani A., Bonafede M., Piccardo G.B., Vai G.B. (eds.): *The Lithosphere in Italy: Advances in Earth Science Research*. Atti Conv. Lincei, 80, pp. 387 - 405, Roma.
- Barton, N.R., Choubey, V. (1977). The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mech.* 10(1-2), pp. 1-54.
- Bellucci Sessa E., Calcaterra D., Del Giudice G, Farina L., Ramondini M., Vilardo G. (2006). Verso un Sistema Informativo Geografico Integrato per la valutazione della suscettibilità al dissesto del territorio di Napoli. *Questioni di Ingegneria Geotecnica, Scritti in onore di Arturo Pellegrino*, vol. 1, 209-231, Hevelius Edizioni, Benevento.
- Beneduce, P., D'Elia, G., Guida, M. (1988). Morfodinamica dei versanti dell'area flegrea. (Campania): erosione in massa ed erosione lineare. *Mem. Soc. Geol. It.* 41, pp. 949-961. (in Italian)
- Bertalanffy v.L. (1971). *Teoria Generale die Sistemi: fondamenti sviluppo e applicazioni* (trad. it. Bellone, E.). Milano, ILLI.
- Bieniawski, Z.T. (1973). Engineering classification of jointed rock masses. *Trans S. Afr. Inst. Civ. Engrs* 15, pp. 335-344.
- Bieniawski, Z.T. (1976). Rock mass classification in rock engineering. In *Exploration for rock*
- Bieniawski, Z.T. (1979). The geomechanics classification in rock engineering applications. *Proc. 4th. Congr. Int. Soc. Rock Mech.*, Montreux 2, pp. 41-48.
- Bieniawski Z.T. (1989). *Engineering rock mass classification*, J. Wiley & Sons, New York.

Bitelli G., Dubbini M., Zanutta A. (2004). Terrestrial Laser Scanning and Digital Photogrammetry Techniques to Monitoring Landslide Bodies, in Altan (ed.) Proceedings of XX ISPRS Congress, 12-13 July 2004, Istanbul, Turkey, IAPRS vol. XXXXV, part B5, pp. 246-251.

Bonardi G., D'Argenio B., Perrone V. (1988). Carta geologica dell'Appennino meridionale, Mem. Soc. Geol. It 41, 1341

Broili L. (1973). In situ tests for the study of rockfall. *Geologia Applicata e Idrogeologia* 8 (1), pp. 105-111.

Budetta P., de Riso R. (1992). Studio delle condizioni di stabilità di alcuni versanti in roccia dell'Appennino Campano. *Geol. Appl.*, Napoli.

Cai J. G., Zhao J., Hudson J. A. (1998). Computerization of Rock Engineering Systems Using Neural Networks with an Expert System - *Rock Mech. Rock Engng.* 31 (3), pp. 135-152

Calcaterra D., de Luca Tupputi Schinosa F., Fenelli G.B. (2004a). Rockfall hazard assessment at Mt. San Costanzo (Sorrento Peninsula, Italy) Proc. 9th Intern. Symp. on Landslides, Rio de Janeiro, pp. 265-271, Taylor & Francis Group, London.

Calcaterra D., de Luca Tupputi Schinosa F., Palma B. (2004b). Rockfall stability assesment at western slope of the Camaldoli Hill (Naples, Italy). *Landslide: Evaluation and Stabilization*, Lacerda, Ehrlich, Fontoura & Sayão (eds). Taylor & Francis Group, London, ISBN.

Calcaterra, D., de Riso, R., Nave, A., Sgambati, D. (2002). The role of historical information in landslide hazard assessment of urban areas: the case of Naples (Italy). In J. Rybář, J. Stemberk, P. Wagner (eds.), Proc. 1st Eur. Conf. on Landslides, Prague, 24-26 June 2002, pp. 129-135, Lisse: Balkema.

Calcaterra, D., Guarino, P.M. (1999). Dinamica morfologica e fenomeni franosi recenti nei versanti Napoletani (settore occidentale). *Geol. Tecnica ed Ambientale* 2/99: 11-17. (in Italian)

Calcaterra D., Orsi. G., (2002). Studio di compatibilità idrogeologica "Interventi di sistemazione idrogeologica della collina dei Camaldoli, versante di Pianura". Relazione inedita.

Calcaterra D., Coppin D., de Vita S., Di Vito M. A., Orsi G., Palma B., Parise M. (2007), Slope processes in weathered volcanoclastic deposits within the city of Naples: The Camaldoli Hill case. *Geomorphology*.

Cancelli A., Crosta G. (1993a). Hazard and risk assessment in rockfall prone areas. Risk and reliability in ground engineering - London, Thomas Telford.

Cancelli A., Crosta G. (1993b). Rockfall hazard and risk mapping - Seventh International Conference and Field Workshop on Landslides in Czech and Slovak Republics, Balkema.

Cancelli A., Crosta G. (1993c). Rockfall hazard in Italy: assessment, mitigation and control - Environment management, geo-water and engineering aspects, Wollongong, Balkema, key lecture.

Capannini G., Nussbaum J., Orlandini S. (2003). Ortoimmagine digitale e scansione laser: un'acquisizione combinata dei dati per una rapida ed esaustiva descrizione di un manufatto - Disponibile sul sito Internet www.microgeo.it

Caruso G., Salese M.R., Del Giudice G. & Rasulo G. (2002). Operational method for the analysis of urban drainage systems. International Conference on Sewer Operation and Maintenance (SOM 2002), Bradford, UK.

Chiesurin E., Fenti V., (2002). Proposta di un nuovo metodo per la classificazione del pericolo da caduta massi. *Geologia Tecnica & Ambientale* - ottobre-dicembre 2002

Cice M., Marino E., Romano M., (2005). Rilievo geostrutturale del Monte Saretto - Commissariato di Governo per l'Emergenza Idrogeologica in Campania - Relazione inedita.

Civetta L., Del Gaudio C., De Vita S., Di Vito M.A., Orsi G., Petrazzuoli S.M., Ricciardi G. & Ricco C. (1997). Short term deformational processes in the Campi Flegrei caldera. *Gr. Naz. Geof. Terra Solida*, 14° Conv.

Crosta G. e Locatelli C. (1999). Approccio alla valutazione del rischio da frane per crollo. *Studi Geografici e Geologici in onore di Severin Belloni*. Ombrelli. Genova, Glauco Brigati: pp. 259 - 286.

Cruden, D.M. (1997). Estimating the risks from landslides using historical data. In *Landslide risk assessment*. Edited by D.M. Cruden and R. Fell. A.A. Balkema, Rotterdam, The Netherlands, pp. 177-184.

Cruden D.M. & Varnes D.J. (1996). Landslides Types and Processes. In "Special Report 247: Landslides Investigation and Mitigation" (A.K. Turner and R.L. Schuster Eds). TRB Transp. Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 36-75.

Deere, D.U. (1963). Rock quality designation (RQD) after 20 years. U.S. Army Corps Engineers Contract Report GL-89-1. Vicksburg, MS: Waterways Experimental Station.

Dematteis A., Kalamaras G. & Eusebio A. (2001). A system approach for evaluating springs drawdown due for tunneling. AITES-ITA World Tunnel Congress: "Progress in tunneling after 2000", Milano.

de Riso R. (1992). Le frane in roccia della Penisola Sorrentina. In A. Vallario - Frane e territorio, pp. 351-365, Liguori ed., Napoli.

Di Crescenzo G. & Santo A., (2001). Studio geologico e geomorfologico-strutturale della colline di Posillipo e dei Camaldoli, versante Soccavo. Relazione inedita, Convenzione C.U.G.Ri., Comune di Napoli.

- Di Girolamo P., Ghiara M.R., Lirer L., Munno R., Rolandi G., Stanzione D. (1984). Vulcanologia e Petrologia dei Campi Flegrei. *Boll. Soc. Geol.* 103, pp. 349-413.
- Di Vito, M.A., Isaia, R., Orsi, G., Southon, J., de Vita, S., D'Antonio, M., Pappalardo, L. & Piochi, M. (1999). Volcanism and deformation since 12,000 years at the Campi Flegrei caldera (Italy). *J. Volcanol. Geoth. Res.* 91: pp. 221-246.
- Farina L. (2004). Un approccio sistemico allo studio dalla suscettibilità al dissesto idrogeologico del comune di Napoli. Tesi di laurea. Facoltà di Ingegneria, Università "Federico II", Napoli.
- Focardi P., Iotti A., (2002). Confronto di metodi di calcolo per la determinazione del percorso di blocchi a seguito di frane di crollo, *Geologia Tecnica e Ambientale*.
- Francioso R. & Schiattarella M. (2002). Un nuovo metodo grafico per la valutazione dei potenziali distacchi in versanti rocciosi – *Periodico dell'Ordine dei Geologi della Basilicata*.
- Giani G.P. (1992). Caduta di massi. Analisi del moto e opere di protezione. Napoli: Helvelius Edizioni.
- Giardino M., Giordan D, Ambrogio S. (2004). G.I.S. technologies for data collection, management and visualization of large slope instabilities: two applications in the Western Italian Alps. Part of Special Issue "Geo-databases for Natural Hazards and Risk Assessment".
- Habib P. (1977). Note sur le rebondissement des blocs rocheux. In *Rockfall dynamics and protective works effectiveness*, ISMES boll. 90, pp. 123 – 125.
- Hoek E. (1987). Rockfall- A program in BASIC for the analysis of rockfalls from slope. Unpublished notes, Golder Associates/University of Toronto.
- Hoek E., Bray J.W. (1981). *Rock Slope Engineering* – Inst. of Mining & Metallurgy, London.
- Hoek E & Brown E.T. (1988). The Hoek-Brown failure criterion - a 1988 update. *Proc. 15th*
- Hudson, J. A. (1989): *Rock mechanics principles in engineering practice*, Butterworths, 72 pp., London.
- Hudson, J. A., Harrison, J. P. A. (1990): A new approach to studying complete rock engineering problems. *Q. J. Engng. Geol.* 25, 93-105.
- Hudson, J. A. (1991): Atlas of rock engineering mechanism: underground excavations. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr.* 28, pp. 523-526.
- Hudson J.A. (1992). *Rock Engineering Systems: Theory and Practice*. New York, Ellis Horwood.
- Hungr O., Evans S.G. (1988). Engineering evaluation of fragmental rockfall hazards, V Symp. on Landslides, Losanna.

- Hungr O. & Evans S.G. (1988). Notes on dynamic analysis of flowslides. *Landslides, Proc. 5th. Int Symp., Lausanne, Balkema, Rotterdam*, pp. 685-690.
- ISRM (1978). Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr.*, 15, pp. 319 – 368.
- Jaboyedoff M. and Labiouse V. (2003). Preliminary assessment of rockfall hazard based on GIS data. *ISRM 2003–Technology roadmap for rock mechanics, South African Institute of Mining and Metallurgy, Vol. 1*, pp. 575-578.
- Jiao Y. & Hudson J.A. (1995). The fully-coupled model for rock engineering systems. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science & Geomechanical Abstracts* 32(5): pp. 491-512.
- Jones C.L., Higgins J.D. & Andrew R.D. (2000). Colorado Rockfall Simulation Program Version 4.0. Colorado Department of Transportation, Colorado Geological Survey, March 2000, pp. 127.
- Leung C.F. (1991). Rock Slope Stability Program. Department of Civil Engineering National University of Singapore.
- Lirer L., Luongo G., Scandone R. (1987). On the Volcanological Evolution of Campi Flegrei. *EOS, Trans. Am. Geophys. Union*, 68, pp. 226-234.
- Lirer, L., Munno R. (1975). Il Tufo Giallo Napoletano (Campi Flegrei), *Periodico di Mineralogia*, 44, pp. 103-118.
- Mallen L., Bonansea E., Pispico R., Forlati F., Integrazione di strumenti GIS e modelli probabilistici e matematici per la previsione dei fenomeni di crollo - ARPA Piemonte - Settore Studi e Ricerche Geologiche, in collaborazione con CSI Piemonte - Area Prevenzione Rischi Naturali e il Politecnico di Torino - Dipartimento di Ingegneria Strutturale.
- Matheson G.D. (1983). The collection and use of field discontinuity data in rock slope design - *Quarterly Journal of Engineering geology*, 22.
- Mazzoccola D.F. (1992). A comprehensive method of rock mass characterization for indicating slope instability - Dep. of Mineral Resources Engineering, Univ. London.
- Mazzoccola D., Hudson J. A. (1996). A comprehensive method of rock mass characterization for indicating natural slope instability, *The Quarterly Journal of Engineering Geology*, 29, pp. 37 – 56.
- Mazzoccola D., Sciesa E. (2000). Implementation and comparison of different methods for rockfall hazard assessment in the Italian Alps, *Proceedings of the 8th International Symposium on Landslides Cardiff, 26-30 giugno 2000, Balkema*, 2, pp. 1035-1040.

- Migliore C. (2001). Instabilità e discontinuità negli ammassi di Tufo Giallo Napoletano. Tesi di laurea. Facoltà di scienze matematiche fisiche e naturali, Università "Federico II", Napoli.
- Nathanail C.P., Earle D.A. & Hudson J.A. (1992). A stability hazard indicator system for slope failure in heterogeneous strata. ISRM International Symposium EUROCK '92: "Rock Characterization", Chester, U.K., Thomas Telford Ltd.
- Nocerino D. (2005). Applicazione di una metodologia sistemica per la valutazione della suscettibilità al dissesto dei versanti in Tufo Giallo del Comune di Napoli. Tesi di laurea. Facoltà di Ingegneria, Università "Federico II", Napoli.
- Orsi G., De Vita S. & Di Vito M. (1996). The restless, resurgent Campi Flegrei nested caldera (Italy): constraints on its evolution and configuration. *J. Volcanolog. Geotherm. Res.*
- Orsi, G., Di Vito, M. & Isaia, R. (eds.) (1998). Volcanic hazards and risk in the Parthenopean megacity. Field excursion guidebook. Int. meet. on Cities on Volcanoes, Rome-Naples 28 June-4 July.
- Parise M., Calcaterra D., de Luca Tuppiti Schinosa F., Palma B. (2004). Rockfall stability assessment at the western slope of Camaldoli Hill (Naples, Italy). *Proc. 9th Intern. Symp. on Landslides, Rio de Janeiro*, pp. 257-263, Taylor & Francis Group, London.
- Paronuzzi P. (1987). Modelli di calcolo per l'analisi della propagazione di blocchi rocciosi in frana. *Rivista Italiana di Geotecnica*, anno XXI, n°4, ottobre-dicembre 1987, 145-165.
- Paronuzzi P. (1989a): Studio geomeccanico dei rimbalzi di blocchi mobilizzati da un crollo litoide: la frana di Lavone (Brescia). *Atti del Congr. Int. Di GeoIngegneria, Politecnico di Torino*, 28-30 settembre 1989, Torino, vol. 2, 861-868.
- Paronuzzi P. (1989b): Probabilistic approach for design optimization of rockfall protective barriers. *Quarterly Journal of Engineering Geology*, London, 22,175-183.
- Paronuzzi P. (1989c): Criteri di progettazione dei rilevati paramassi. *Geologia Tecnica* 1/89,23-41.
- Paronuzzi P., Blasi L., Cautilli F., Tassoni E. (1996). La falesia delle Acque Dolci di Monte Argentario: modellazione cinematica di caduta massi e progettazione delle opere di difesa. *Quarry & Construction*, n. 2, Febbraio 1996, pp. 79-94.
- Paronuzzi P., Coccolo A. (1995). Crollo di progetto e affidabilità delle barriere paramassi. *Difesa del Suolo GEAM*, 86, 1995, pp. 147-154.
- Pfeiffer T. & Bowen T. (1989a). Colorado Rockfall Simulation Programm. Colorado School of Mines- US Department of Transportation Federal Highway Administration, Final Report.
- Pfeiffer T. & Bowen T. (1989b). Computer Simulation of Rockfalls. *Association of engineering Geologist Bulletin*, vol. XXVI, n° 1, pp 117-126.

Piacentini D., Strada C. (2006). L'analisi di stabilità di pareti rocciose in ambiente GIS: un caso studio in Comune di Cortaccia (Bolzano).

RIEGL Laser Measurement Systems GmbH (2004). Technical data at www.riegl.com.

Ritchie A.M. (1963). Evaluation of Rockfall and its Control. Highway Research Board, Highway Research Record, National Academy of Sciences- National Research Council. Washington, DC, Vol. 17, pp. 13-28.

Rittmann A. (1950). Sintesi geologica dei Campi Flegrei. Boll. Soc. Geol. It.

Rosi M., Sbrana A. (eds.) (1987). Phlegrean Fields. Quad. de "La Ricerca Scientifica", C.N.R., Prog. Fin. Geodin., 114 (9), 175 pp.

Scioldo G (1991). Rotomap:analisi statistica del rotolamento dei massi - Guida informatica ambientale, Patron, pp. 81-84, Milano.

Scioldo G. (2000). ISOMAP & ROTOMAP, Ricostruzione e restituzione grafica superfici & analisi caduta blocchi . Geo&Soft, Torino.

Spang R.M. & Rautenstrauch R.W. (1988). Empirical and mathematical approaches to rockfall protection and their practical application. Landslides, Proc. 5 th. Int. Symp. on Landslides , Lausanne, Balkema, Rotterdam, pp. 1237-1243.

Temel T. & Maru A. (2002). A conceptual framework for studying likeages in an Agriculture - Health - Environment system. The Hauge, Netherlands, International Service for National Agricultural Research.

Teza G., Galgaro A., Genevois R., Rocca M., Squarzoni C. (2004). Integrazione di dati da laser scanner e metodi tradizionali per la misura delle deformazioni della frana di Perarolo di Cadore (BL).

Varnes D.J. (1978). Slope Movement Types and Processes. In "Special Report 176: Landslides Analysis and Control" (R.L. Schuster and R.J. Krizek Eds). TRB Transp. Research Board, National Research Council, Washington, D.C., pp. 11-33.

Wu S.S. (1984). Rockfall evaluation by computer simulation, Transportation Research Board, n. 1031.