



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

FACOLTÀ DI SCIENZE MM. FF. NN.

Dipartimento di Geoscienze

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN  
GEOLOGIA E GEOLOGIA TECNICA

**Fenomeni di crollo della parete orientale del  
Mt. Prada tra San Lorenzo in Banale e  
Molveno (Trentino): analisi, valutazione e  
mitigazione della pericolosità.**

**Rock-fall phenomena on the Mt. Prada  
eastern slope between San Lorenzo in  
Banale and Molveno (Trentino):  
hazard analysis, evaluation and mitigation.**

*Relatore: Prof. Rinaldo Genevois*

*Correlatori: Dott. Geol. Lorenzo Cadrobbi*

*Dott. Geol. Claudio Valle*

*Laureando: Silvano Adami*

ANNO ACCADEMICO 2012 / 2013



## **Riassunto**

Parte della strada statale 421 tra San Lorenzo in Banale e Molveno (TN) è caratterizzata da pericolo da caduta massi dalla prospiciente parete rocciosa.

La pericolosità da caduta massi è studiata da vari decenni e il metodo di analisi si è sviluppato fino a considerare modelli numerici tridimensionali associati ad analisi statistica.

La presente tesi tratta la mitigazione di tale pericolo mediante lo studio bi-tridimensionale delle condizioni per le quali possono avvenire fenomeni gravitativi e sulle modalità per arginarlo. Per individuare le zone di innesco, di transito e di arresto dei fenomeni gravitativi è stato fatto uso di tecnologie avanzate come il LiDAR, il Laser Scanner Terrestre, i software SLIDE 6.0, ArcGSI 10.1, Rockyfor3D e Statistica. L'uso di essi, associato al rilievo geomorfologico – strutturale e geomeccanico tradizionale, permette di ottenere dei risultati soddisfacenti riguardo la possibilità di mitigazione del grado di pericolosità da caduta massi sull'asse stradale, pur mantenendone il grado massimo.

## **Abstract**

Part of the 421 highway between S. Lorenzo in Banale and Molveno is characterized by rockfall hazard from the monte Prada eastern rock slope.

The rock fall hazard is studied from some decades and its analysis method developed until consider three-dimensional numerical models associate to statistical analysis.

This thesis deals with the conditions under which gravitative phenomena can occur and the approaches to mitigate it. To identify the gravitational phenomena parameters , different kinds of advanced technologies have been used, like the LiDAR, the Terrestrial Laser Scanner and the softwares SLIDE 6.0, ArcGIS 10.1, Rockyfor3D and Statistica. Their use, together with both the geomorphological-structural and the geomechanical survey, allows to obtain satisfying results about hazard mitigation on the road surface, still maintaining its maximum degree.

## **Keywords**

Rockfall hazard, stability analysis, geomechanics, numerical simulation, Brenta Group

## **Ringraziamenti**

Ringrazio il prof R. Genevois quale relatore della tesi.

Ringrazio il dott. L. Cadrobbi quale correlatore e tutor del tirocinio ed il dott. C. Valle quale correlatore e per l'aiuto nella fase di rilievo, considerazioni geomeccaniche e di analisi di stabilità. Assieme ad essi anche il dott. S. Paternoster ed il dott. M. Nobile, dello studio associato Geologia Applicata, per avermi dato la possibilità di entrare nel mondo del lavoro ed imparare molte cose, senza escludere i colleghi per essere stati sempre disponibili ad ogni richiesta di aiuto. In particolare il dott. A. Bergamo per l'aiuto nella fase di rilievo ed elaborazione delle simulazione numeriche.

Ringrazio il professor D. Zampieri per le considerazioni relative all'inquadramento tettonico - strutturale.

Ringrazio il dott. Ing. A. Gaspari della Gaspari-Krueger Surveying & Engineering per le considerazioni relative al laser scanner.

Ringrazio il dott. S. Cocco, quale dirigente del Servizio Geologico di Trento, per avermi messo a disposizione il materiale fotografico e "interferometrico" e il dott. R. Campana del Servizio Geologico di Trento per le considerazioni relative alla carta della pericolosità.

Ringrazio il dott. R. Valentinotti del Servizio Bacini Montani per le considerazioni relative al PGUAP.

Ringrazio i miei compagni di corso con i quali ho affrontato e superato tante difficoltà nel percorso universitario, in particolare il dott. T. Padovan ed amici che mi hanno sostenuto.

Ringrazio la mia famiglia per avermi aiutato anche in fase di rilievo ed essermi stato vicino.

# Indice

1. Quadro normativo.....	p. 4
1.1 Normativa e raccomandazioni di riferimento..	p. 4
1.2 Vincoli di carattere geologico, idrogeologico, sismico e ambientale.....	p. 5
1.2.1 PGUAP.....	p. 5
1.2.2 Carta di sintesi.....	p. 11
1.2.3 Carta delle risorse idriche.....	p. 13
2. Inquadramento geologico – strutturale.....	p. 15
2.1 Inquadramento geografico.....	p. 15
2.2 Inquadramento strutturale.....	p. 17
2.2.1 Assetto generale.....	p. 17
2.2.2 Gruppo del Brenta sud – orientale.....	p. 22
2.2.3 Sismicità.....	p. 26
2.3 Assetto geologico.....	p. 29
2.3.1 Geologia della valle di Molveno nei pressi del monte Prada.....	p. 29
3. Geomorfologia.....	p. 36
3.1 Aspetti generali morfostrutturali regionali.....	p. 36
3.2 Aspetti geodinamici locali.....	p. 37
3.2.1 Classificazione dei movimenti franosi.....	p. 37
3.2.2 Fattori che influenzano le frane.....	p. 39
3.2.3 Modelli di rottura.....	p. 40
3.3 Geomorfologia della valle di Molveno nei pressi del monte Prad .....	p. 40
3.3.1 Idrologia.....	p. 46
3.3.2 Idrogeologia.....	p. 47
4. Rilievo geomorfologico - geologico - strutturale.....	p. 51

4.1	Introduzione.....	p.51
4.2	Analisi geomorfologica.....	p.51.
4.2.1	Remote sensing.....	p. 51
4.2.1.1	LiDAR.....	p. 51
4.2.1.2	SAR e foto aeree.....	p. 51
4.2.2	Geomorfologia dell'area di studio.....	p. 56
4.3	Analisi geologica – strutturale.....	p. 56
4.3.1	Geologia.....	p. 68
4.3.2	Analisi Laser Scanner Terrestre.....	p. 70
4.3.2.1	Cenni teorici.....	p. 70
4.3.2.2	Caratteristiche dell'analisi effettuata con il Laser Scanner Terrestre.....	p. 72
4.3.2.3	Risultati.....	p. 74
4.3.3	Analisi meso – strutturale.....	p. 76
5.	Rilievo geomeccanico.....	p. 85
5.1	Introduzione.....	p. 85
5.1.1	Cenni teorici sulla geomeccanica.....	p. 85
5.1.1.1	Caratterizzazione dell'ammasso roccioso....	p. 86
5.1.1.2	Caratterizzazione delle discontinuità.....	p. 90
5.1.1.3	Classificazione dell'ammasso roccioso.....	p. 91
5.1.1.4	Rilevamento di campagna.....	p. 95
5.2	Rilievo geomeccanico con il laser scanner.....	p. 95
5.3	Rilievo geomeccanico di campagna.....	p. 100
6.	Analisi di stabilità.....	p. 106
6.1	Introduzione.....	p. 106
6.1.1	Aspetti geometrici della parete per l'instabilità...	p. 107
6.2	Cenni teorici sull'analisi di stabilità dei versanti.....	p. 111
6.2.1	Metodi all'equilibrio limite globale.....	p. 111
6.2.2	Definizione dell'azione sismica di progetto.....	p. 116

6.3	Modellazione di stabilità con il software SLIDE 6.0..	p. 118
6.3.1	Cenni teorici del software SLIDE.....	p. 118
6.3.2	Applicazione del software SLIDE ad alcuni casi..	p. 120
6.4	Osservazioni.....	p. 135
7.	Analisi e mitigazione della pericolosità da caduta massi .....	p. 136
7.1	Introduzione.....	p. 136
7.1.1	Cenni teorici del rischio da crolli.....	p. 137
7.2	Valutazione del grado di pericolosità iniziale.....	p. 138
7.2.1	Cenni teorici del software Rockyfor3D.....	p. 138
7.2.2	Opere di protezione per la caduta massi.....	p. 148
7.2.3	Simulazione di caduta massi nella condizione iniziale.....	p. 153
7.2.3.1	Caratteristiche dei file di input e output.....	p. 153
7.2.3.2	Applicazione del software.....	p. 157
7.2.3.3	Analisi statistica dei risultati.....	p. 160
7.3	Valutazione della pericolosità finale.....	p. 163
7.3.1	Applicazione del software con le opere di protezione.....	p. 163
7.3.2	Analisi statistica dei risultati.....	p. 165
7.4	Mitigazione della pericolosità da caduta massi.....	p. 166
8.	Conclusioni.....	p. 172
	Bibliografia.....	p. 175
	Appendice.....	p. 188





# Introduzione

Il presente lavoro è stato realizzato nel corso della prima parte del tirocinio effettuato presso lo Studio Associato - Geologia Applicata di Mezzocorona (Trento). Il lavoro, commissionato dal Servizio Strade e Infrastrutture della Provincia Autonoma di Trento allo Studio Associato, consisteva nella valutazione del rischio da caduta massi gravante sulla strada statale N.421 dei Laghi di Molveno e Tenno dal km 27.200 al km 28.000 e nella correlata verifica della sostenibilità di interventi atti alla mitigazione del livello di rischio determinato. La tesi entra nel merito del primo dei due argomenti.

Il tratto di strada compreso tra l'abitato di San Lorenzo in Banale e la località Nembia si snoda ai piedi della parete est del monte Prada, seguendo le rientranze morfologiche che offre l'andamento naturale del versante. La prossimità della sede stradale all'estesa parete che si sviluppa in altezza per più di 500 metri ha comportato una esposizione diretta alle traiettorie di crollo che saltuariamente hanno interessato l'arteria viabile che costituisce una importante via di collegamento N-S, per il traffico locale, della Val Giudicarie con la parte nord-occidentale del Trentino.

Tale condizione ha spinto gli Enti gestori della rete viabilistica, ANAS prima e Servizio Strade della PAT poi, ad adottare tecniche di intervento adatte alla mitigazione del grado di rischio verificato. Ad una rapida occhiata del versante sono infatti subito individuabili le barriere paramassi succedutesi nel corso dei decenni e recentemente sostituite, per il tratto più meridionale della tratta stradale d'interesse, da una galleria naturale; La porzione settentrionale è rimasta invece invariabilmente scoperta e lo scopo dello studio al quale ho collaborato è stato appunto quello di verificare la reale condizione di rischio e la possibilità di una sua reale mitigazione.

Il presente lavoro entra quindi nel merito dei fattori predisponenti e scatenanti la condizione di rischio, nella sua variabilità areale e nella sua quantificazione. In ultimo vengono definite le migliori metodologie di intervento.

Di seguito vengono sommariamente descritti i capitoli di tale lavoro.

Nel capitolo 1 viene presentato il quadro normativo cui sono soggetti gli studi geotecnici relativi alle opere infrastrutturali della Provincia Autonoma di Trento. In particolare il PGUAP (Piano Generale di Utilizzo delle Acque Pubbliche), recepito dal PUP (Piano Urbanistico Provinciale), fornisce i criteri di definizione normativa e classificativa del rischio cui è soggetta, in questo caso, la strada statale 421, assegnando e incrociando correlati ratings relativi alla magnitudo della pericolosità da crolli (bassa, moderata, elevata) e alla destinazione d'uso dei suoli (strade di importanza primaria, secondaria, ferrovie, ecc.)

Venendo agli aspetti specifici e al fine di comprendere i fattori determinanti il grado di franosità del versante roccioso è necessario un inquadramento degli geologici - geomorfologici - e strutturali (macro e meso) dell'area. Ricadendo l'area in esame nel più ampio ambito geologico-strutturale della Val Giudicarie oggetto di molteplici studi e ricerche da parte di A.A. (vedi riferimenti bibliografici) è stato possibile attingere agli autorevoli contributi multidisciplinari che hanno permesso un buon inquadramento principalmente sotto il profilo strutturale.

Altro contributo insostituibile per quanto concerne la referenziazione di tutte le osservazioni effettuate in loco ed in remoto, nonché irrinunciabile supporto per la fase di modellazione delle traiettorie di crollo è la disponibilità di un rilievo digitale della superficie topografica acquisito con tecnica laser-scanner e noto con l'acronimo "LIDAR" (Ligth Detection And Ranging).

Il laser scanner terrestre, ha facilitato l'individuazione di morfostrutture poste in prossimità del ciglio della parete, ha fornito quindi rilievi topografici ottimali per le successive simulazioni numeriche fornendo infine elementi di stima quantitativa dei volumi rocciosi unitari nei diversi ambiti d'ammasso osservati.

La fase di rilievo di campagna ha permesso poi di visualizzare le situazioni di criticità in corrispondenza di faglie, di zone molto fratturate e di fornire indicazioni utili delle simulazioni numeriche, in particolare:

il tipo di suolo, il grado di rugosità del pendio, la dimensione dei blocchi e le aree potenzialmente soggette a crolli.

Sempre grazie al modello digitale della superficie sono stati assegnati puntualmente all'ammasso roccioso correlati valori di qualità dal punto di vista geomeccanico,

Dall'analisi delle singole situazioni geostrutturali individuate sono state estratte situazioni di criticità-tipo analizzate nelle caratteristiche di stabilità, secondo il criterio dell'equilibrio limite mediante l'impiego del software SLIDE 6.0.

Nel testo vengono riportati due esempi, dalle dimensioni molto differenti. L'obiettivo di tale analisi è di stimare quanto la situazione realmente riscontrata può approssimarsi ad una condizione di criticità geodinamica per scivolamento planare piuttosto che cuneiforme o altro. A tale scopo vengono assegnate le proprietà geomeccaniche al modello geometrico, sulla base delle osservazioni in loco riferite agli standards prescelti, per ricavare il correlabile valore del fattore di sicurezza. In seguito vengono fatti variare i valori dei parametri in gioco per ricavare la condizione geomeccanica per la quale si ha il collasso; il confronto/distanza tra le due assunzioni permette di valutare qualitativamente la prossimità alla condizione pre-collasso.

L'applicazione al modello di una sollecitazione sismica orizzontale, il cui valore è riferito e calcolato secondo i criteri della normativa vigente completa l'approccio analitico.

L'ultimo argomento trattato è riferito all'analisi tridimensionale e statistica della geometria delle traiettorie e dell'energia dei massi afferenti le traiettorie simulate a partire da zone della parete dette "sorgenti", effettuata mediante l'utilizzo del software Rockyfor3D.

L'analisi incrociata dei risultati di tale studio permetterà di stimare il grado di pericolosità da caduta massi cui sono soggetti i tratti stradali esaminati, ottenendo così indicazioni sull'efficacia del grado di mitigazione atteso.

# Capitolo 1 Quadro normativo

## 1.1 Normativa e raccomandazioni di riferimento

La normativa esistente ed alla quale si è fatto riferimento è la seguente.

### Nazionale:

- Il D.M.14 gennaio 2008 –Testo Unico – Nuove Norme tecniche per le costruzioni.
- Circolare 2 Febbraio 2009, n° 617 – Istruzioni per l’applicazione delle “Nuove norme tecniche per le costruzioni” di cui al D.M. 14/01/2008.
- D.M. 14 settembre 2005 capitolo 7 “ *Norme per le opere interagenti con i terreni e con le rocce, per gli interventi nei terreni e la sicurezza dei pendii*”.
- DECRETO 21 OTTOBRE 2003 della Presidenza del Consiglio dei Ministri – Dipartimento Protezione Civile.
- UNI ENV 1997-1 – Eurocodice 7 “*Progettazione Geotecnica*”.
- UNI 11211- 4.Gennaio 2012. Opere di difesa dalla caduta massi- Parte 4: Progetto definitivo ed esecutivo.
- D.M. LL,PP. 11.03.88 “*Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l’esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione*”.

- Norma CNR-UNI 10006.

### Provinciale:

- D.P.R. 15 febbraio 2006, Piano Generale di Utilizzazione delle Acque Pubbliche e s.m.i.;
- L.P. nr. 5 27/05/2008 “approvazione del nuovo piano urbanistico provinciale.

- PRIMA DIRETTIVA PER L'APPLICAZIONE DEL DECRETO DEL MINISTRO DELLE INFRASTRUTTURE E DEI TRASPORTI 14 GENNAIO 2008 IN MATERIA DI NUOVE NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI – P.A.TN. Dip. Protez. Civile e tutela del territorio e Dip. LL.PP., trasporti e reti;

## **1.2 Vincoli di carattere geologico, idrogeologico, sismico e ambientale**

Nella Provincia Autonoma di Trento, in base alla L.P. nr. 5 27/05/2008 vengono posti dei vincoli di carattere geologico, idrogeologico, sismico e ambientale indicati Piano Generale di Utilizzazione delle Acque Pubbliche (P.G.U.A.P.), Carta di Sintesi Geologica e Carta delle risorse idriche.

### **1.2.1 PGUAP**

Il piano generale per l'utilizzazione delle acque pubbliche determina le direttive, gli indirizzi e i vincoli ai quali devono conformarsi i piani e i programmi provinciali riguardo alla tutela dal rischio idrogeologico e alle misure di prevenzione per le aree a rischio.

Costituiscono aree a rischio idrogeologico le porzioni di territorio nelle quali sono presenti persone e/o beni esposti agli effetti dannosi o distruttivi di esondazioni, frane o valanghe. Le aree a rischio sono suddivise in quattro classi di gravosità crescente (R1, R2, R3 ed R4) in funzione del livello di pericolosità dell'evento, della possibilità di perdita di vite umane e del valore dei beni presenti.

Nelle aree a rischio idrogeologico molto elevato – contrassegnate **R4** nella cartografia del piano – sono consentiti esclusivamente:

- a) gli interventi di sistemazione volti alla riduzione o all'eliminazione del rischio, approvati dagli organi competenti in base alla legislazione provinciale sulla base di uno specifico studio che analizzi le condizioni di rischio precedenti e successive alla realizzazione dell'opera;
- b) gli interventi di demolizione, di manutenzione ordinaria e straordinaria, di restauro, di risanamento conservativo e di mitigazione della vulnerabilità degli edifici e delle infrastrutture.

Tali interventi sono consentiti a condizione che non aggravino la vulnerabilità dei luoghi rispetto al rischio esistente e che non precludano la possibilità di ridurre o eliminare il rischio stesso. Essi non devono inoltre comportare variazione di superficie e di volume, nonché cambi di destinazione d'uso peggiorativi ai fini del rischio.

Nelle aree a rischio molto elevato la realizzazione di nuove infrastrutture pubbliche o la modifica di quelle esistenti sono consentite, purché:

- a) non risultino delocalizzabili;
- b) non concorrano ad incrementare il carico insediativo esposto a rischio;
- c) non pregiudichino gli interventi di riduzione o eliminazione del rischio e risultino coerenti con la pianificazione degli interventi di protezione civile;
- d) il relativo progetto includa le opere di messa in sicurezza per la riduzione del rischio, sia corredato da apposito studio di compatibilità e risultati approvato dagli organi competenti in base alla legislazione provinciale.

Nelle aree a rischio idrogeologico elevato – contrassegnate **R3** nella cartografia di piano –, oltre agli interventi consentiti nelle aree a rischio idrogeologico molto elevato, sono consentite esclusivamente:

- a) le opere di infrastrutturazione del territorio, di bonifica e di sistemazione del terreno a fini agricoli, i cui progetti siano

corredati da appositi studi di compatibilità e risultino approvati dagli organi competenti in base alla legislazione provinciale nelle materie idraulica e geologica;

La definizione degli interventi ammissibili nelle aree a rischio idrogeologico medio, contrassegnate R2, e moderato, contrassegnate R1, è demandata ai piani regolatori generali dei comuni, che vi provvedono mediante approfondimenti a scala locale riferiti anche alle possibili alternative di localizzazione delle previsioni urbanistiche nel loro insieme.

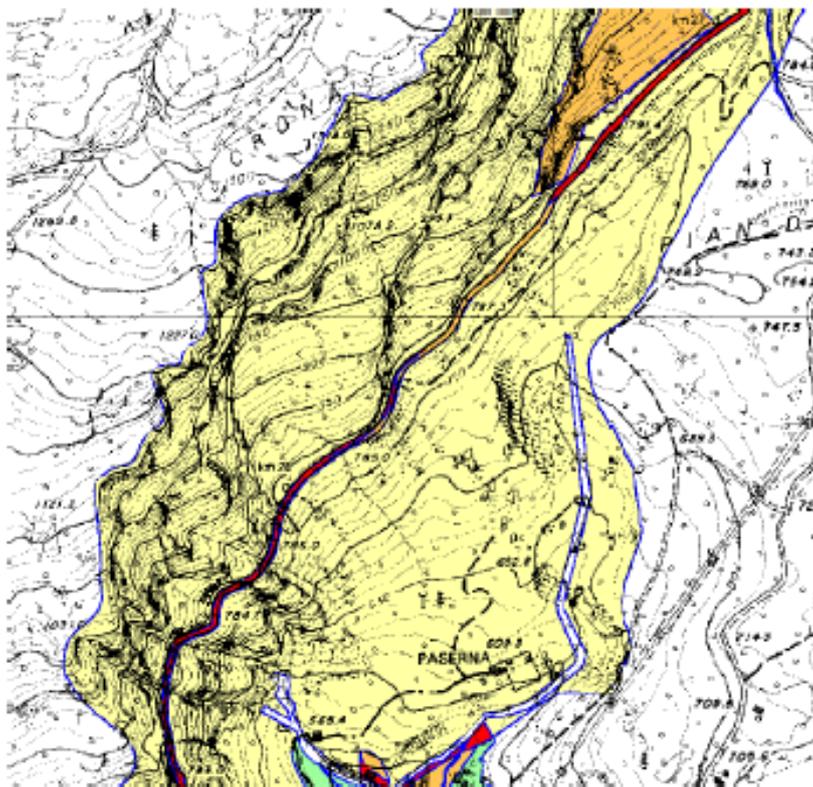




Figura 1- Estratto della carta del rischio idrogeologico della provincia di Trento con la relativa legenda ([www.urbanistica.provincia.tn.it](http://www.urbanistica.provincia.tn.it)).

Detta carta della pericolosità distingue innanzitutto i tre tipi principali di pericolo idrogeologico (alluvione, frana e valanga), differenziando poi all'interno di essi le classi di pericolosità (elevata, moderata e bassa). La tipologia frana comprende tutte le dinamiche di dissesto che usualmente ad essa si associano (crolli, ribaltamenti, scivolamenti e scorrimenti, ecc.), nonché i fenomeni di trasporto solido sui conoidi di deiezione (debris-flow).

L'individuazione delle classi di pericolosità e dei valori ad esse associati è stata fatta secondo lo schema riprodotto in Tabella 1. Va al riguardo precisato che nelle situazioni in cui non era disponibile un preciso riferimento alla probabilità di accadimento dell'evento, e quindi al suo tempo di ritorno, si è provveduto ad una stima speditiva della stessa sulla base delle altre informazioni disponibili nelle fonti utilizzate e sopra descritte. Nel caso delle valanghe, dove questo tipo di valutazione risulta estremamente complesso, sono stati rappresentati solo eventi storicamente certi e documentati, assegnando a tutti la classe di pericolosità "elevata".

Tipologia di pericolo	Classi di pericolosità	Valori di pericolosità	Fonte dei dati
Alluvione	Aree ad elevata pericolosità di esondazione	1	Aree di esondazione con tempo di ritorno di 30 anni perimetrate dall'Autorità di Bacino del Fiume Adige [b)\c].
	Aree a moderata pericolosità di esondazione	0,8	Aree di esondazione con tempo di ritorno di 100 anni perimetrate dall'Autorità di Bacino del Fiume Adige [b)\c].
	Aree a bassa pericolosità di esondazione	0,4	Aree passibili di esondazione della carta di sintesi geologica [a]) integrate dalle aree di esondazione con tempo di ritorno di 200 anni perimetrate dall'Autorità di Bacino del Fiume Adige [b)\c].
Frana	Aree ad elevata pericolosità geologica	1	Aree ottenute sottraendo le aree di esondazione [b)\c]) dalle aree ad elevata pericolosità geologica, idrologica della carta di sintesi geologica [a]).
	Aree a moderata pericolosità geologica	0,8	Aree critiche recuperabili della carta di sintesi geologica [a]).
	Aree a bassa pericolosità geologica	0,4	Aree con penalità gravi o medie della carta di sintesi geologica [a]).
Valanga	Aree ad elevata pericolosità valanghiva	1	Aree ad elevata pericolosità valanghiva [b]).

Tabella 1 – Classi di pericolosità idrogeologica e relativi valori ([www.urbanistica.provincia.tn.it](http://www.urbanistica.provincia.tn.it)).

La carta del rischio scaturisce, come già precisato, dalla sovrapposizione della carta del pericolo idrogeologico con quella del valore dell'uso del suolo. La scala dei valori relativi del rischio è stata suddivisa in cinque classi secondo quanto previsto dal DPCM 29.09.98 (R1, R2, R3 e R4).

Il rischio idrogeologico, ovvero quello derivante da fenomeni di esondazione, frana o valanga, è definito dalla seguente relazione:

$$R = P \cdot V \cdot v$$

dove:

R: Rischio idrogeologico relativo ad una determinata area;

P: Pericolosità dell'evento calamitoso che può interessare l'area stessa;

V: Valore degli elementi presenti nell'area (persone, beni materiali e patrimonio ambientale);

v: vulnerabilità degli stessi elementi (funzione della loro esposizione all'evento calamitoso)

<b>Classi di uso del suolo</b>	<b>Descrizione</b>
Aree residenziali	Aree a prevalente uso residenziale attualmente presenti o di futura realizzazione in base agli strumenti urbanistici in vigore. Questa classe deriva da più tematismi del SIAT e precisamente dalle aree insediative (codice 14), dai centri storici (codice 2), dal tematismo derivato usosp (uso del suolo) e dal tematismo di base ammins (centri abitati).
Aree produttive	Industrie, centri commerciali e centri artigianali attualmente presenti o di futura realizzazione in base agli strumenti urbanistici in vigore. Questa classe rappresenta le aree produttive (codice 10, 12 e 13) del tematismo derivato usosp (uso del suolo) dell'Urbanistica e Tutela del Paesaggio.
Aree agricole	Aree agricole delimitate in base agli strumenti urbanistici in vigore. Questa classe rappresenta le aree agricole (codice 6 e 8) del tematismo derivato usosp (uso del suolo) dell'Urbanistica e Tutela del Paesaggio.
Aree ricreative	Questa classe rappresenta aree sia interne che esterne ai centri abitati nelle quali si svolgono attività ludico-ricreative che comportano una presenza significativa di persone.
Aree a bosco, pascolo e prateria alpina	Aree boschive, a prescindere dalla tipologia del bosco, e pascoli. Questa classe deriva dalla fusione delle aree a bosco (codice 9) e di quelle a pascolo (codice 1) del tematismo derivato usosp (uso del suolo) con il tematismo pascoli_99 (codice COLT = 3 = pascolo) del Servizio Foreste.
Improduttivo	Prevalentemente aree montane al di sopra dei 2000 m di quota. Questa classe deriva dalla fusione delle aree improduttive (codice 4) del tematismo derivato usosp (uso del suolo) con il tematismo pascoli_99 (codice COLT = 4 = improduttivo) del Servizio Foreste.
Aree sciabili	Non si tratta solamente delle aree occupate dalle piste da sci, ma bensì dalle "aree sciabili" intese come aree che ospitano le piste, gli impianti di risalita, le infrastrutture connesse all'attività sciistica. Questa classe rappresenta parte del tematismo fornito dell'Urbanistica e Tutela del Paesaggio (codice AS_TI 1 e 2).
Campeggi	Aree destinate a campeggio sia estivo che invernale con tende, camper o roulotte. Questa classe rappresenta il tematismo Campeggi del Servizio Geologico.
Strade di importanza primaria	Autostrade e strade di rilevanza nazionale. Questa classe rappresenta le strade principali (codice STR_TI 1 e 2) del tematismo viapri (viabilità primaria) del SIAT.
Strade di importanza secondaria	Strade di rilevanza provinciale e comunale. Questa classe rappresenta le strade principali (codice STR_TI 3 e 4) del tematismo viapri (viabilità primaria) del SIAT.

Tabella 2 – Classi d'uso del suolo ([www.urbanistica.provincia.tn.it](http://www.urbanistica.provincia.tn.it) ).)

Per quanto riguarda invece il terzo fattore (vulnerabilità) non è stato possibile pervenire ad informazioni georeferenziate sufficientemente attendibili, infatti può variare significativamente in funzione delle caratteristiche dell'evento calamitoso (ad esempio nel caso di esondazioni a parità di tirante la vulnerabilità dipende dalla distribuzione spazio-temporale della velocità dell'acqua). Anche le caratteristiche strutturali dell'elemento a rischio condizionano la vulnerabilità (uno stesso edificio è molto meno vulnerabile in caso di esondazione a seconda che presenti o meno vani abitabili a piano terra); infine anche la morfologia del terreno e delle opere artificiali può condizionare significativamente la vulnerabilità di un elemento a rischio (la presenza di depressioni e rilevati è determinante nell'incidenza producibile sui beni presenti in un'area alluvionata).

Ai fini del presente piano, dovendo analizzare in maniera generalizzata l'intero territorio provinciale, si è quindi ritenuto

opportuno assumere la scelta più cautelativa riguardo al fattore vulnerabilità, assegnandole il massimo valore per l'intero territorio provinciale, in altri termini, nell'applicazione della relazione sopra richiamata, essa è stata assunta con valore sempre pari all'unità.

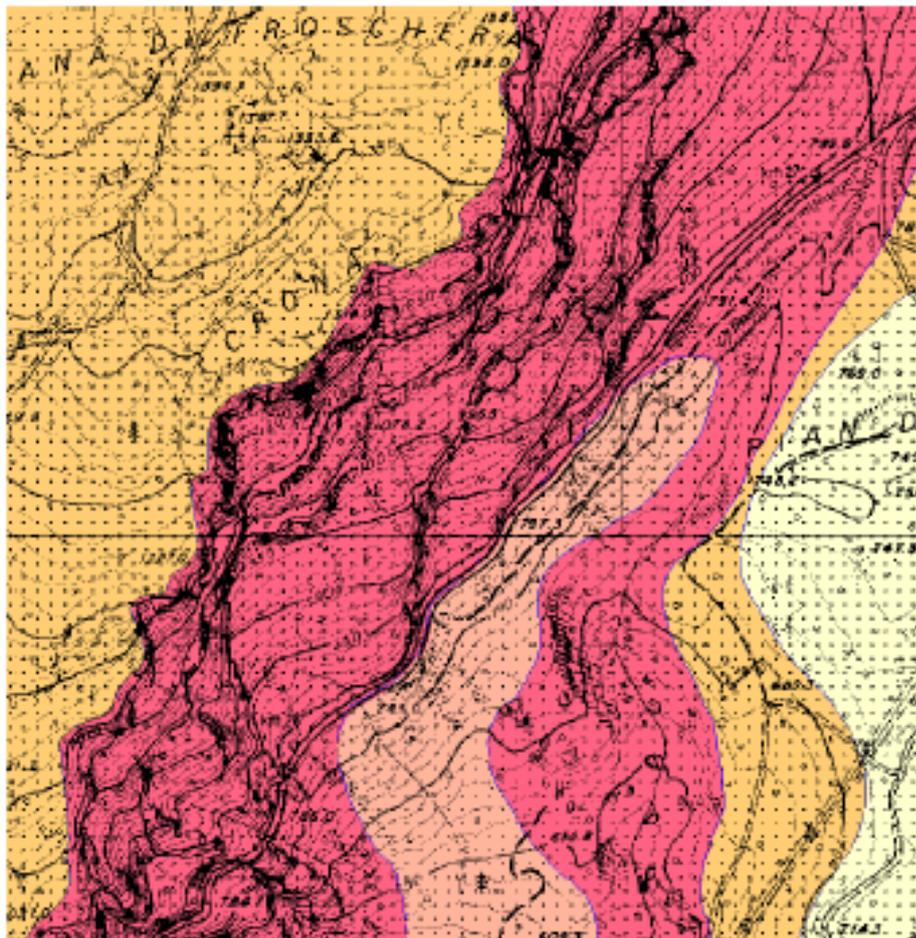
Il nuovo PUP (Piano Urbanistico Provinciale), approvato con L.P. n.5 del 27/05/2008, applica le misure di salvaguardia del piano urbanistico provinciale previste dalle norme di attuazione di cui all'allegato B e dalla legge provinciale 4 marzo 2008, n. 1 (Pianificazione urbanistica e governo del territorio). Per l'adeguamento al nuovo piano urbanistico provinciale dei piani territoriali delle comunità e dei piani regolatori generali si applicano le disposizioni in materia delle norme di attuazione di cui all'allegato B e della legge provinciale n. 1 del 2008.

### **1.2.2 Carta di sintesi**

Alla luce di quanto sopra, il PUP a norma della L.P. 09/11/1987 n.26 e L.P. 07/08/2003 n.7 “Approvazione della variante 2000 al PUP”, individua le zone da sottoporre a vincoli particolari per la difesa del suolo e delle acque. Con l'ultimo aggiornamento della “Carta di sintesi geologica” alla scala 1:10.000, entrato in vigore il 06/01/2010, vengono individuate dal Servizio Geologico, in collaborazione con altri servizi provinciali, recependo la pianificazione subordinata in vigore, le aree a diversa penalità geologica. Inoltre, in seguito all'approntamento della Carta delle Risorse idriche del nuovo P.U.P (art. 21 Norme di Attuazione), con il 5° aggiornamento della Carta di Sintesi Geologica, le cartografie sono state riviste anche per il tematismo riguardante la tutela delle risorse idriche (art. 48 delle Norme di attuazione del nuovo P.U.P.).

La Carta di Sintesi Geologica, così come da ultimo aggiornamento introdotto dalla delibera della G.P. n. 3144 di data 22/12/2009, individua

l'area oggetto degli interventi tra le “aree ad elevata pericolosità geologica, idrogeologica e valanghiva” come **”aree ad elevata pericolosità geologica e idrogeologica”** per l'intero versante roccioso, esteso sino alla strada provinciale e alle zone adiacenti ad essa soprattutto nell'area nord-est e sud-ovest “Aree di controllo geologico, idrologico, valanghivo e sismico” , come: **“aree critiche recuperabili”** nel tratto centrale del versante esteso verso la base del pendio lungo le falde detritiche.



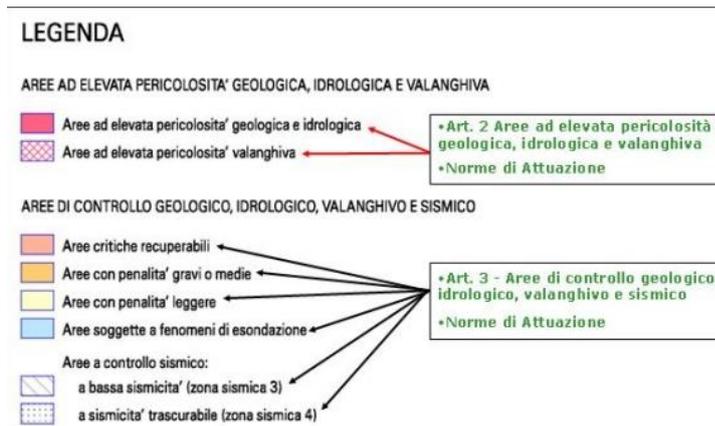
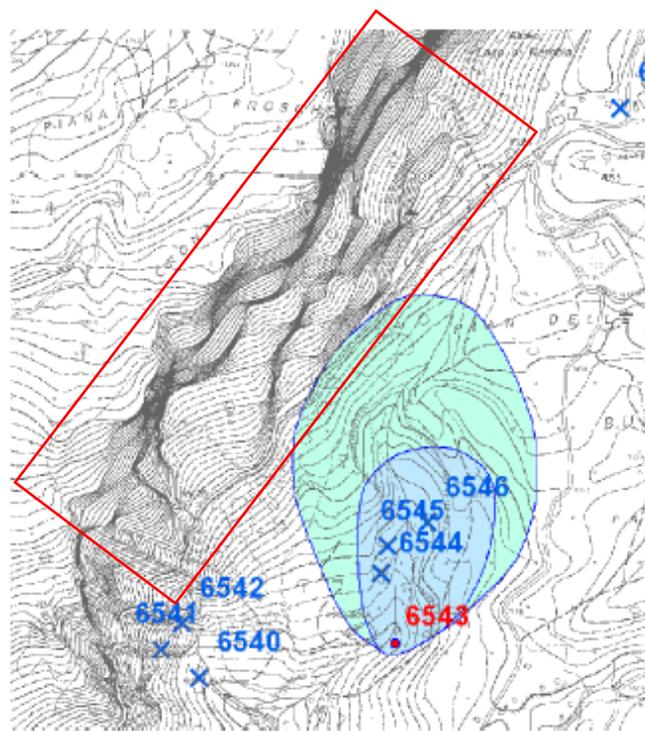


Figura 2 - Estratto della carta di sintesi della provincia di Trento - 5° aggiornamento relativa all'area di studio e relativa legenda ([www.urbanistica.provincia.tn.it](http://www.urbanistica.provincia.tn.it)). In prossimità della strada si osservano le aree ad elevata pericolosità geologica e idrogeologica e quelle critiche recuperabili.

### 1.2.3 Carta delle risorse idriche

La Carta delle Risorse Idriche del PUP individua punti sorgentizi e una sorgente codificata con il numero 6543 a valle dell'area in esame, questa situazione è disciplinata dall'art.21 del PUP per le acque destinate al consumo umano.



#### Legenda

##### Zona di Tutela Assoluta

- Sorgenti
- Sorgenti Minerali
- Acque Superficiali
- Pozzi

##### Zona di Rispetto Idrogeologico

- Sorgenti, Sorgenti Minerali, Acque Superficiali e Pozzi

##### Zona di Protezione Idrogeologica

- Sorgenti, Sorgenti Minerali, Acque Superficiali e Pozzi

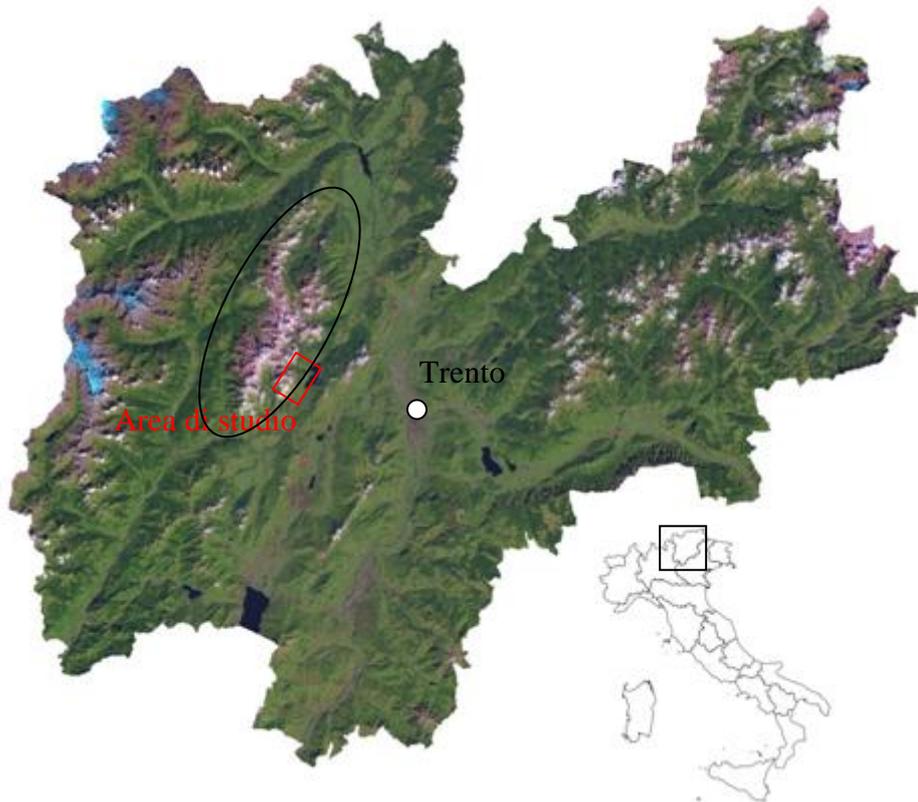
Figura 3 - Estratto della carta delle risorse idriche della provincia di Trento ([www.urbanistica.provincia.tn.it](http://www.urbanistica.provincia.tn.it)), con indicata, a titolo di esempio, l'area di rispetto del pozzo 6543 (in blu) e quella di studio (in rosso).

## Capitolo 2 Inquadramento geologico - strutturale

### 2.1 Inquadramento geografico

L'area di studio si trova nelle Alpi centro orientali (Italia settentrionale) nella parte occidentale della provincia di Trento. Essa appartiene al comune di San Lorenzo in Banale, posto nelle Giudicarie Esteriori, confinante dal punto di vista amministrativo a nord con Molveno ed Andalo, ad est con Vezzano e Calavino, a sud con Dorsino e Comano Terme, ad ovest con Stenico.

Dal punto di vista geografico l'area di studio è situata nel margine sud orientale del Gruppo del Brenta, in particolare tra la conca di Molveno, nella quale è situato l'omonimo lago di sbarramento naturale, e l'abitato di San Lorenzo in Banale, ai piedi del monte Prada lungo la ss 421 dei laghi di Molveno e Tenno.



*Figura 4 - Localizzazione dell'area di studio(segnata in rosso) nella Provincia Autonoma di Trento nell' Italia nord orientale. Viene evidenziato (in nero) il gruppo montuoso del Brenta.*

Il gruppo montuoso del Brenta è localizzato tra la Valle di Non e di Molveno (ad est), la valle di Sole (a nord), le valli Giudicarie (a sud) e la val Rendena (a ovest) , individuate dal torrente Noce che attraversa le valli di Sole e di Non, dal fiume Sarca che scorre in val Rendena e nelle valli Giudicarie e dal torrente Bondai Tale via di comunicazione rappresenta uno dei possibili collegamenti fra l'area gardesana e la parte alta della provincia di Trento e l'Alto Adige. La SS421, oggetto del presente studio, collega Tione di Trento (565m) con le valli dei Laghi e le valli Giudicarie inferiori ed esteriori attraverso la gola del Limarò ed il passo della Ballino (a sud e sud-est) e la val di Non (a nord) attraverso sulla Sella di Andalo (1042m).

Le cime più elevate di questo massiccio sono la Cima Tosa (3175m), la Cima Brenta (3150m). Ad est della zona di studio è presente il Massiccio della Paganella con quote che passano da 1600m a 2100m.



*Figura 5 - Visione della parete orientale del mt. Prada in studio (segnata in rosso) circondata (in senso orario) dall'abitato di S. Lorenzo in Banale, dal Mt. Prada, dal lago di Molveno, dall'accumulo della omonima frana e dall'incisione valliva in cui scorre il torrente Bondai*

## **2.2 Inquadramento strutturale**

### **2.2.1 Assetto generale**

L'area in questione è stata oggetto di studio da parte di molti autori, fra i quali Doglioni & Bosellini (1987), Dalpiaz et al. (1990), Massironi et al. (2006) e Castellarin et al. (1992) hanno fornito delle indicazioni importanti sull'evoluzione morfotettonica.

La catena alpina è un orogene collisionale a doppia vergenza con una lunga e complessa storia dovuta all'interazione tra le placche Europea e di Adria. E' convenzionalmente divisa in due domini tettonici principali caratterizzati da un senso opposto di trasporto e da differenti

regimi deformativi: la catena alpina in s.s. e la catena delle Alpi Meridionali (Sudalpino). Il primo rappresenta il cuore dell'orogene Alpino ed è costituito da un ventaglio di sovrascorrimenti (thrust fan) N-NW vergenti dominato da un metamorfismo alpino e da una deformazione duttile. Il secondo è una catena a pieghe e sovrascorrimenti SSE-SE vergenti (fold and thrust belt) caratterizzata da una tettonica fragile e da assenza di metamorfismo alpino. La classica suddivisione è una conseguenza di un'orogenesi polifasica che ha avuto inizio nel tardo Cretaceo e continua tuttora.

L'evoluzione dell'area del Sudalpino orientale è avvenuta tramite una serie di eventi tettonici che hanno coinvolto i margini delle placche Adriatica ed Europea. Durante il Permiano inferiore ampi corpi vulcanici hanno occupato una depressione tettonica di estensione superiore ai 2000 Km<sup>2</sup> tra il Lineamento Periadriatico a NO e la Linea della Valsugana a SE (Distretto vulcanico Atesino) (D'Amico et al. 1980). Tale vulcanismo è il prodotto di un'intensa attività sub-aerea di tipo fissurale che si protrasse tra 276 e 268 Ma (D'Amico & Del Moro, 1988; Barth et al., 1994).

Dalla fine del Paleozoico (Permiano) alla metà del Mesozoico eventi di distensione litosferica hanno portato all'apertura dell'oceano Ligure-piemontese, collegato verso est al più vasto oceano della Tetide. Il Sudalpino rappresenta parte del margine passivo adriatico con ancora conservati i rapporti tra le unità paleogeografiche (bacini e piattaforme) mesozoiche (Figura 6). In particolare, il corridoio delle Giudicarie con la sua direzione NNE-SSW rappresenta l'eredità del margine occidentale tra la piattaforma carbonatica di Trento e il bacino lombardo (Trevisan, 1930; Castellarin 1992).

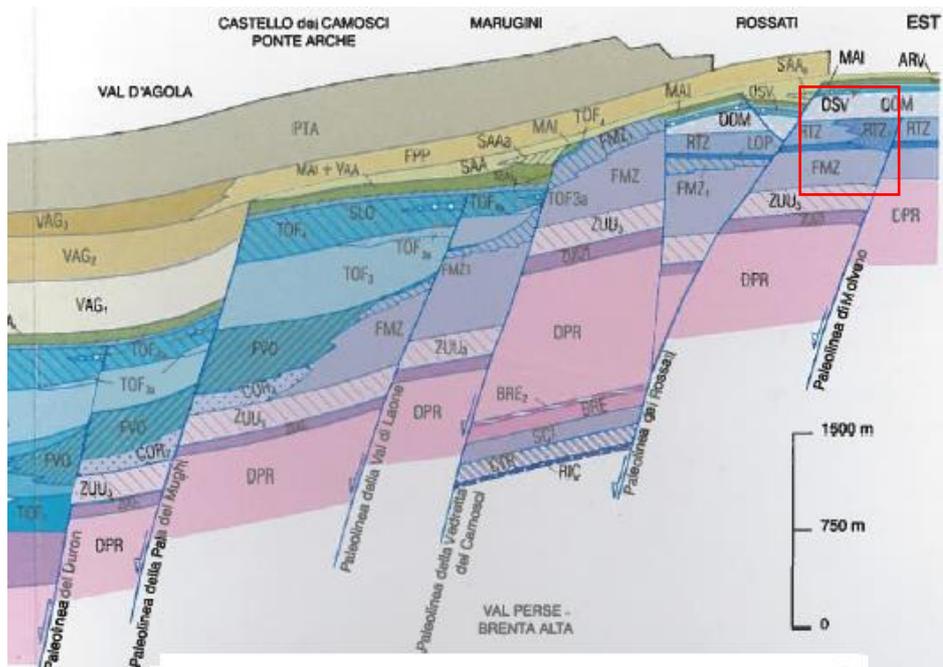


Figura 6 – Estratto del profilo E-W da al lago di Molveno della carta geologica del Foglio CARG Tione di Trento con l'area di studio (segnata in rosso). Tra le varie faglie mesozoiche ad alto angolo si distinguono le Linee dei Rossati e di Molveno.

Nel Cretacico medio, l'inversione di movimento tra le placche ha portato alla chiusura del bacino Ligure-piemontese, mentre nel Terziario con la collisione dei margini passivi varie fasi compressive hanno dato origine alla conformazione strutturale attuale della catena alpina.

Dal Pleistocene l'azione erosiva fluvio-glaciale all'interno di periodi di inter- e peri-glaciali, ha modellato le valli, talvolta con grossi eventi franosi (Fuganti, 1969; Zanferrari et al., 1982) legati anche a eventi sismici.

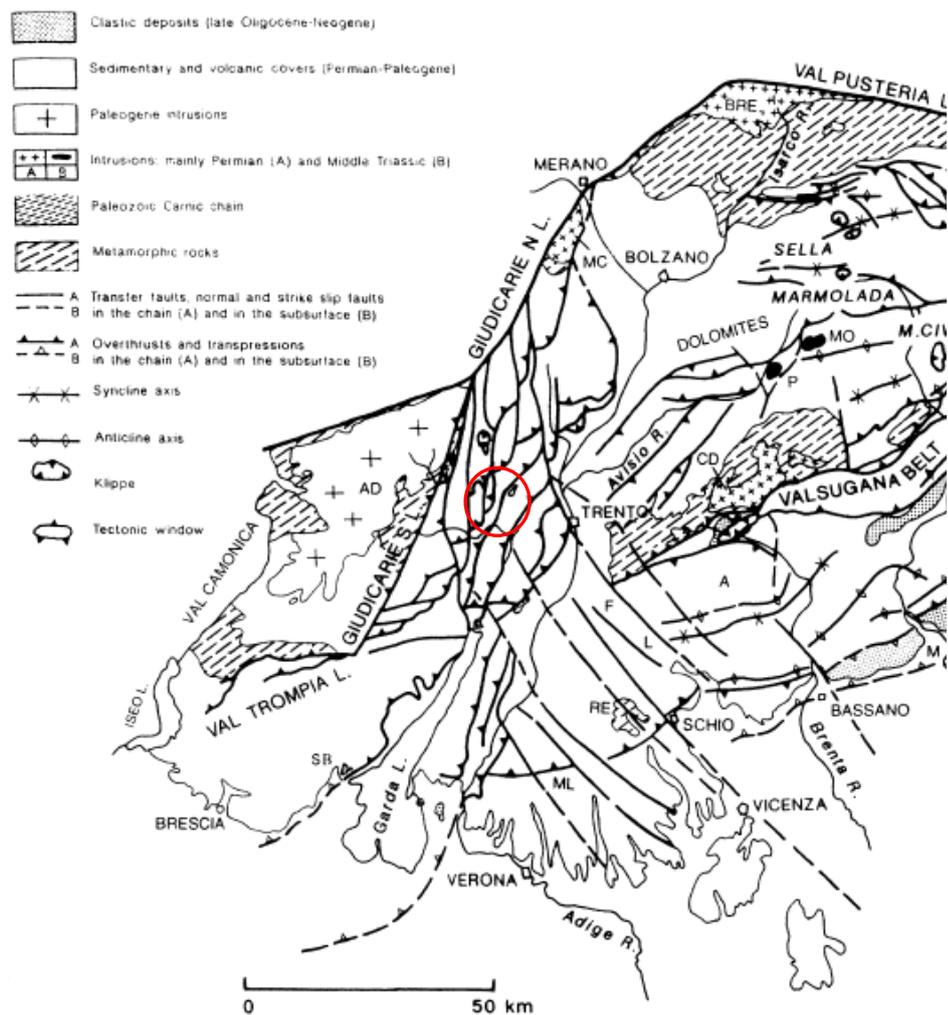


Figura 7 – Mappa strutturale sintetica del Sudalpino centro-orientale (modificato da CNR, 1991). Simboli: MO Monzoni, P Predazzo, BL Belluno, M Montello, RE Recoaro, ML Monti Lessini, F Folgaria, L Lavarone, A zona di Asiago, SB colle di S.Bartolomeo, CD Cima d’Asta, AD Adamello, Orobic, Grigna e Presolana. (Castellarin et al, 1998b). Viene evidenziata l’area di studio.

La presenza di corpi vulcanici sovrapposti ha favorito l’irrigidimento della crosta superficiale del Sudalpino. In fase di compressione (fase alpina), la differente reologia fra i corpi vulcanici e le rocce sedimentarie presenti ha permesso la formazione di uno scollamento con thrust progressivi verso sud, nell’area orientale rispetto alla Linea delle Giudicarie. Nell’area ad occidente di quest’ultima si sono formati invece back-thrust, mentre le faglie al margine del Distretto vulcanico e lungo la transizione piattaforma di Trento – Bacino lombardo sono state riattivate in transpressione sinistra.

Secondo Castellarin (2009), la configurazione strutturale dal tardo Cretaceo è distinta nei seguenti sistemi tettonici.

- Sistema tettonico pre-Adamello, nel quale sono presenti un thrust belt sud vergente e un dicco sub verticale, legati alle compressioni eo-alpine.
- Sistema strutturale dinarico, con formazione di una zona frontale esterna dinarica nel settore orientale del Sudalpino, rappresentata da thrust con trend NW-SE, SW vergenti, legata a compressione dinarica eocenica e/o più recente.
- Sistema Giudicarie - Val trompia –Valsugana, composto dalla presenza di due sistemi tettonici:
  - associazione di strutture elvetica (insubrica) che forma thrust con trend WNW; influenza la pianura Padana, le alpi lombarde e il Trentino occidentale; legata agli eventi di post collisione dell'oligocene-miocene
  - Giudicarie – Val Trompia – Valsugana Belt che riarrangia e incorpora strutture precedenti (Elvetica); forma una struttura larga e arcuata attorno al pre-Adamello Belt e al batolite dell'Adamello; legata alla compressione del Serravaliano-Tortoniano. La compressione neogenica ha influenzato ampiamente la parte settentrionale della piattaforma veneta con il thrust della Valsugana orientato ENE.
- Sistema scledense, legato alla compressione della fase Adriatica (Messiniano-Pliocene) con trend NW ha dislocato il sistema a thrust delle Giudicarie nel settore più orientale.

Lungo il bordo meridionale del Sudalpino, la catena delle Giudicarie, composta strutturalmente da thrust con trend ENE della linea della Valsugana, è divisa dalla zona di trasferimento della faglia Schio-Vicenza orientata NW provocando movimenti transpressivi sinistri. Essa delimita un blocco strutturale a forma di triangolo tra la catena delle Giudicarie, il Montello-Friuli Belt e la pianura Padana.

Di seguito la Figura 8 mostra l'orientazione delle spinte tettoniche avvenute dall'Eocene al Pliocene, precedentemente descritte.

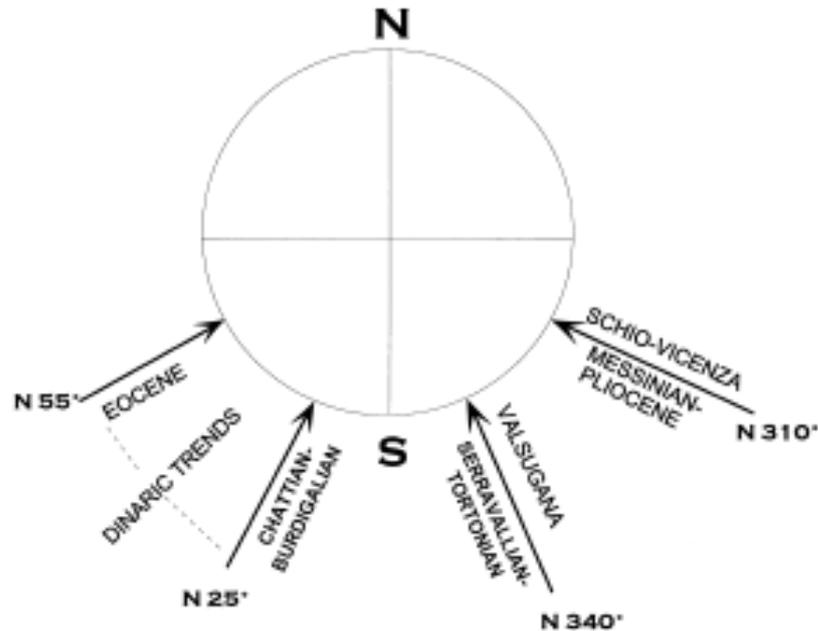


Figura 8 – Direzione azimutale dei principali sistemi tettonici del Sudalpino orientale (Castellari *et al.*, 1998b).

### 2.2.2 Gruppo di Brenta sud – orientale

Il gruppo montuoso del Brenta è compreso nel recente foglio CARG 59 Tione di Trento alla scala 1:50000. Il seguente schema delle deformazioni è ricavato dalle relative Note Illustrative (APAT, 2005). Le strutture descritte nel testo indicate con lettere sono elencate nella lista riportata in Figura 9.

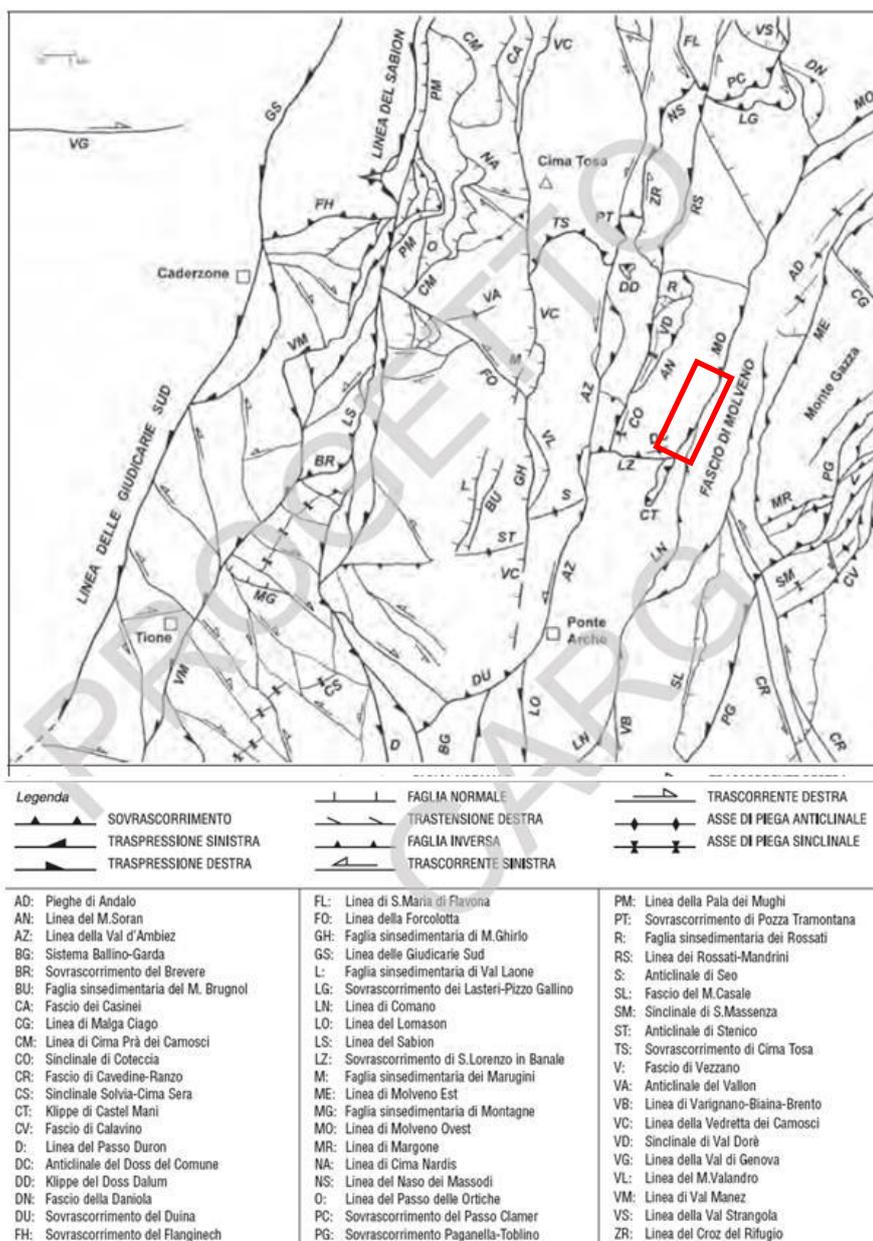


Figura 9 - Schema dei principali elementi tettonici del Foglio Tione di Trento (APAT, 2005) con segnata in rosso l'area di studio.

### ➤ SISTEMA STRUTTURALE VALSUGANENSE

Le strutture dominanti sono pieghe e sovrascorrimenti orientati E-W e ENE-WSW. Esse sono strutture di piccola ampiezza separate da lunghe rampe laterali orientate N-S e NNE-SSW del sistema delle Giudicarie. Da Ovest le strutture principali sono:

- l'ampio sovrascorrimento della Val Duina (DU) in cui vi è il raddoppio della potente successione delle Argille di Ponte Arche

(sezione D-D'); è delimitato da una chilometrica rampa laterale N-S con trascorrenza quasi pura di grande risalto strutturale (linea della Val d'Ambiéz, AZ). Al suo interno vi sono grandi strutture interne con ampie pieghe a ginocchio (kink folds chilometrici) presenti a Nord (ginocchiature di Stenico, ST e di Seo, S) separate dal trasferimento N-S da parte della Linea della Vedretta dei Camosci (VC).

- Il grosso sovrascorrimento E-W di San Lorenzo in Banale (LZ), assieme al klippe di Castelmani (CT), è delimito da grandi guide trascorrenti sinistre N-S che si propagano per tutto questo settore del foglio TIONE (ad ovest la linea trascorrente sinistra delle Val d'Ambiéz AZ e ad est la Linea trascorrente sinistra del lago di Molveno Ovest, MO). Inoltre vi sono due espressioni secondarie del piegamento e sovrascorrimento di San Lorenzo in Banale sono la piega a ginocchio con asse E-W del Dosso del Comune (DC) (simile al ST e S) e la sinclinale di Coteccia (simile al VD) incurvata verso Nord nel tratto occidentale vicino alla Linea dei Rossati (RS). Ad Est del sovrascorrimento di San Lorenzo in Banale (LZ) vi è la Linea di Molveno Ovest (MO) che si congiunge alla linea di Comano (LN) sub verticale ed ovest vergente.
- Il voluminoso prisma rialzato del Monte Gazza, il quale domina il settore orientale del foglio TIONE e costituisce una pronunciata struttura a fiore delimitata dalla transpressione sinistra di Molveno Est (ME) ovest vergente ad alto angolo e quella est vergente sub verticale della Linea di Toblino-Paganella (PG) associata a tratti ENE di sovrascorrimento.

➤ SISTEMA SCHIO - VICENZA

E' rappresentato dalle linee NNW-SSE trascorrenti sinistre di Cavedine-Ranzo (CR) contro le quali si interrompe, con netta variazione di stile, la cintura strutturale posta a sud-est del thrust obliquo (transpressivo) della Toblino-Paganella (PG). Si tratta di un fascio di elementi tettonici orientati da NE-SW a NNE-SSW: sovrascorrimenti di

Margone (MR) e Toblino; accavallamenti di Lon, Fraveggio, Vezzano (V) e di Ponte Oliveti-Calavino (CV); pieghe anticlinali e sinclinali associate (Padergnone, Santa Massenza, SM). Anche la Linea NW-SE di malga Ciago sembra avere la stessa funzione rispetto alla transpressione-sovrascorrimento della Linea di Molveno Est (ME).

Si ritiene che queste strutture in prevalenza NE-SW costituiscano associazioni valsuganensi in buona parte ruotate dalla direzione E-W primarie verso orientamenti NE-SW attuali ad opera delle tardive compressioni del sistema Schio-Vicenza, successive al Tortoniano, circa del Messiniano-Pliocene ( fase Adriatica-Padana), propagate in parte all'interno del sistema delle Giudicarie.

Inoltre si pensa che tutto il fascio strutturale della Giudicarie sia stato riattivato blandamente da queste compressioni tardive; accavallamenti NE-SW e sinclinali potrebbero costituire degli elementi tettonici originati nelle compressioni più recenti.



*Figura 10 - versante SE della val Dorè vista da SE, con la cima dei Rossati in centro. Si distinguono la sinclinale della Val Dorè (VD) e la Linea dei Rossati (LS) la quale affianca le formazioni di Monte Zugna (FMZ) a quella rossastra della Scaglia Rossa (SAA).*

FAGLIE DISTENSIVE

Si tratta di strutture mesozoiche che sono state risparmiate dall'inversione strutturale neogenica, tranne il fascio del monte Casale e la faglia diretta di malga Ben-Drena che prosegue verso sud all'angolo SE del foglio TIONE.

### **2.2.3 Sismicità**

La sismotettonica dell'Italia è il risultato di un relativo movimento fra Africa e Eurasia (Zampieri & Massironi, 2007). Nella crosta superficiale delle Alpi Meridionali orientali la sismicità è localizzata su thrust sud vergenti con la copertura Adriatica (Chiarabba et al., 2005). La contrazione in direzione N-S ha causato larghi terremoti legati ai thrust e a movimenti trascorrenti su faglie mesozoiche ereditate. La sismicità è raggruppata nelle parti più orientali e occidentali dell'intersezione all'interno delle catene Dinarica e Giudicariense rispettivamente (Slejko et al., 1989; Bressan et al., 1998), mentre il fronte del dominio centro-orientale mostra assenza di recente attività sismica e rappresenta l'area più probabile per grandi terremoti futuri (Chiarabba et al., 2005; Galadini et al., 2005). Esso include la catena delle Giudicarie (G) ed il massiccio dei Lessini (L) (Zampieri, 2000) i quali sono stati interessati dai tre sistemi principali di faglie: il trend NNE transpressivo delle Giudicarie, il trend NW strike-slip della Schio-Vicenza e quello ENE-NE compressivo della Valsugana (Figura 11).

Inoltre tutti i sistemi Giudicarie, Schio-Vicenza e Valsugana mostrano evidenze di attività neotettonica (Galadini & Galli, 1999; Galadini et al., 2001; Zampieri & Sauro, 2001).

La regione GL è caratterizzata da leggera sismicità (Magnitudo <5.0), eccetto un moderato terremoto ( $M_w \approx 5.0$ ; Pondrelli et al., 2007) nel periodo 1981-2002. La sismicità è raggruppata tra i sistemi delle faglie Schio-Vicenza e Giudicarie mentre decresce in magnitudo e frequenza man a mano che ci si allontana da queste "giunzioni" verso tutte le direzioni ed è rappresentata da terremoti in crosta superficiale (minore di 20 km di profondità) (Scarascia & Cassinis, 1997).

Recenti studi mostrano che la sismicità è confinata ai limiti orientali ed occidentali della regione GL, prevalentemente associata a faglie strike-slip e thrust (Figura 11; Garbin , 2012). In particolare le due subzone L ed G sono caratterizzate da strike-slip e thrust con componenti di trascorrenza rispettivamente. Invece all'interno della zona G il tensore calcolato ha una direzione di spinta NW, all'incirca perpendicolare ai fronti di thrust della catena delle Giudicarie mentre all'interno della zona L il tensore di spinta ha direzione NW ed è coerente con una riattivazione a strike-slip laterale destro delle faglie che appartengono al sistema Schio-Vicenza (Viganò et al., 2008).

In base alla carta di Sintesi geologica (Figura 2), la quale segue le direttive provinciali e nazionali (Capitolo 1), l'area di studio è collocata in zona sismica 4 ovvero trascurabile (APAT, 2005).

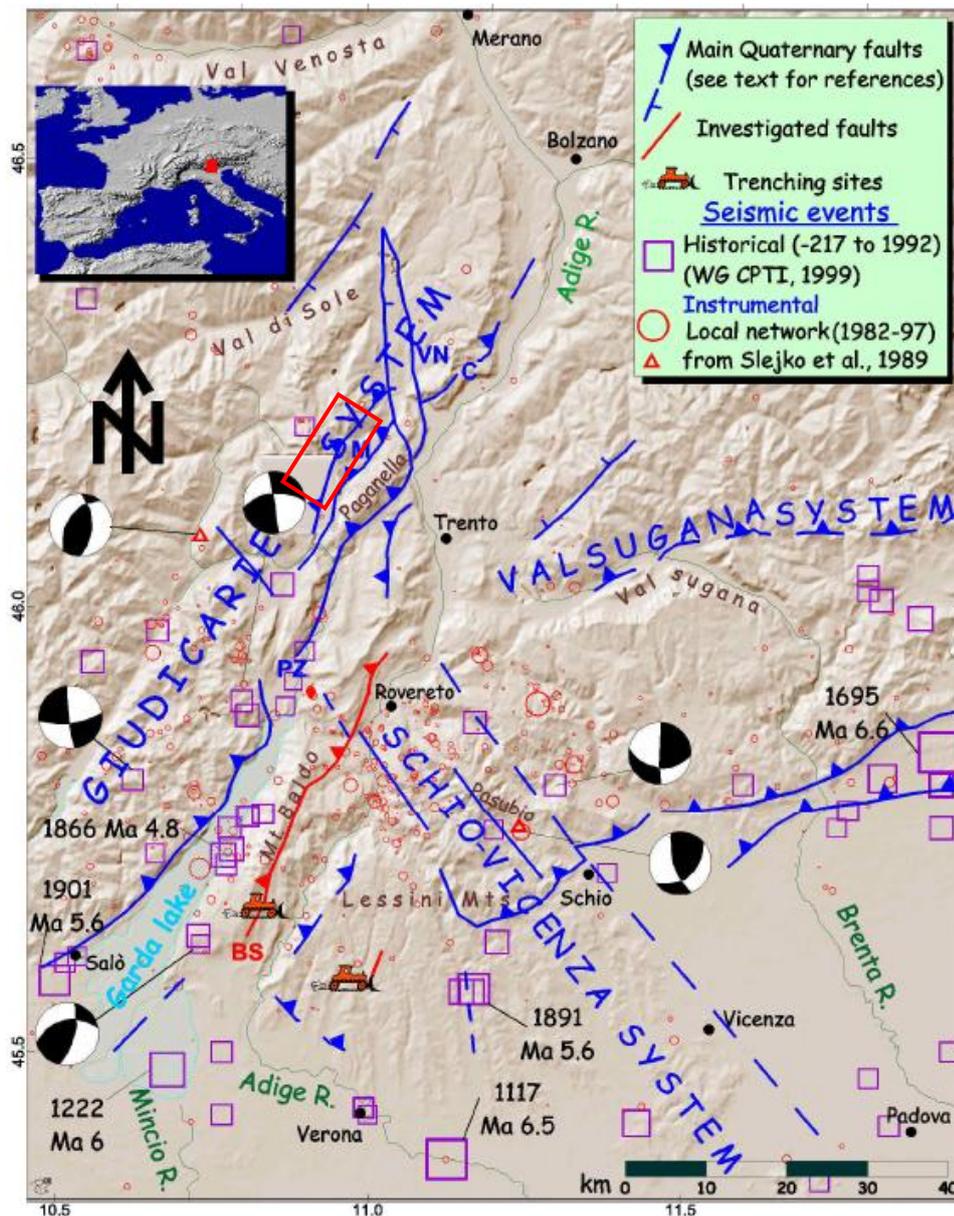


Figura 11 - Assetto sismotettonico dell'area del Sudalpino centrale. Vengono riportate le principali strutture definite in letteratura come attive nel Quaternario, ognuna della quali con i relativi eventi sismici cui è soggetta al regione. I terremoti storici (epicentri registrati macrosismicamente) vengono riportati dal Working Group CPTI (1999); eventi dal 1982 al 1997 vengono riportati da registrazioni strumentali dalla rete sismica del Trentino Alto Adige dalla Provincia di Trento. L'epicentro del terremoto del 1117 è stato definito sulla base delle località proposte da Magri & Molin (1986). Vengono riportati i meccanismi focali da Sljiko et al. (1989) e la data dei terremoti riportati. Le lettere riportano i nomi delle faglie, tra cui C Cortaccia thrust; VN, Val di Non structures; M, Molveno thrust; PZ, Paganella-Zambana thrust; BS, Mt. Baldo-Mt. Stivo thrust. L'area di studio è segnata in rosso.

## 2.3 Assetto geologico

### 2.3.1 Geologia della valle di Molveno nei pressi del monte Prada

La geologia della parte occidentale della provincia di Trento è dominata da due blocchi di rocce sedimentarie e vulcaniche, divisi dalla linea della Giudicarie Sud.

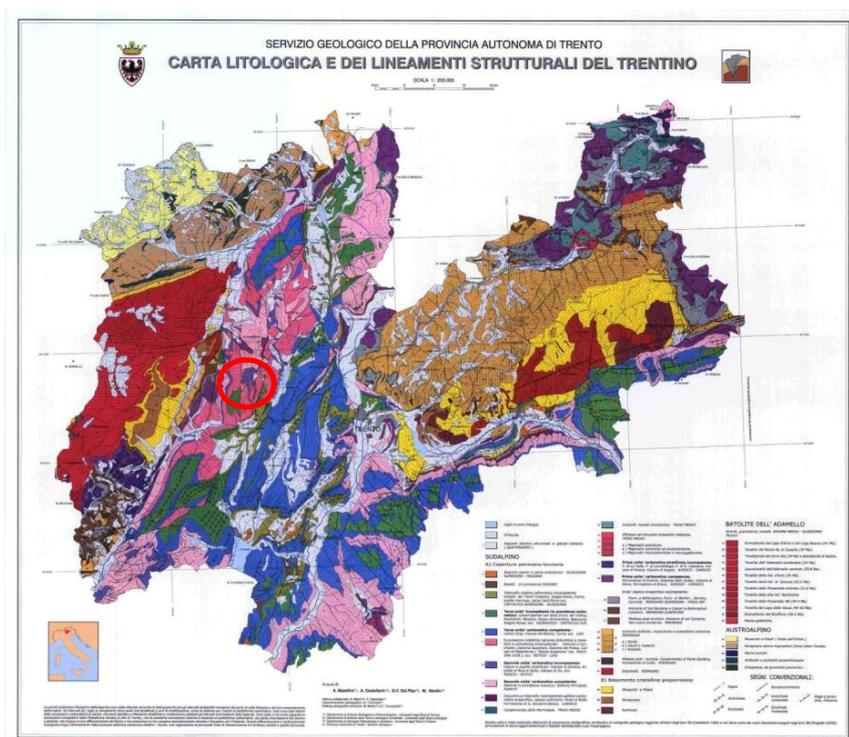


Figura 12 - Schema litologico e dei lineamenti strutturali della Provincia Autonoma di Trento ([www.protezionecivile.tn.it](http://www.protezionecivile.tn.it)). L'area di studio è segnata in rosso.

Con uno sguardo veloce alla Figura 12 si riescono a distinguere tali domini, in particolare le aree blu, rosa e verdi costituiscono rocce calcaree, dolomie e di bacino (Triassico-Giurassico-Cretaceo) mentre quelle rosse, gialle ed arancio-beige costituiscono i corpi intrusivi ed effusivi relativi al Gruppo dell'Adamello-Presanella.

L'area di studio è situata nel margine occidentale della piattaforma di Trento, nella parte sud-orientale del Gruppo del Brenta.

In riferimento alla carta geologica del Foglio CARG 059 TIONE di TRENTO e all'estratto di Figura 13 (APAT, 2005), vengono di seguito descritte le litologie presenti nell'area tra il lago di Molveno e San Lorenzo in Banale dalla quota di 750m (base della parete) alla quota di 2400m (Doss d'Arnal). Per le litologie del monte Prada viene fatta una descrizione sintetica e si rimanda alle Note Illustrative del Foglio CARG Tione di Trento (APAT, 2005) per i dettagli. Invece, per l'unica litologia affiorante nell'area di studio, la formazione del calcare oolitico di Massone, viene riportata una descrizione più dettagliata nel capitolo 4.

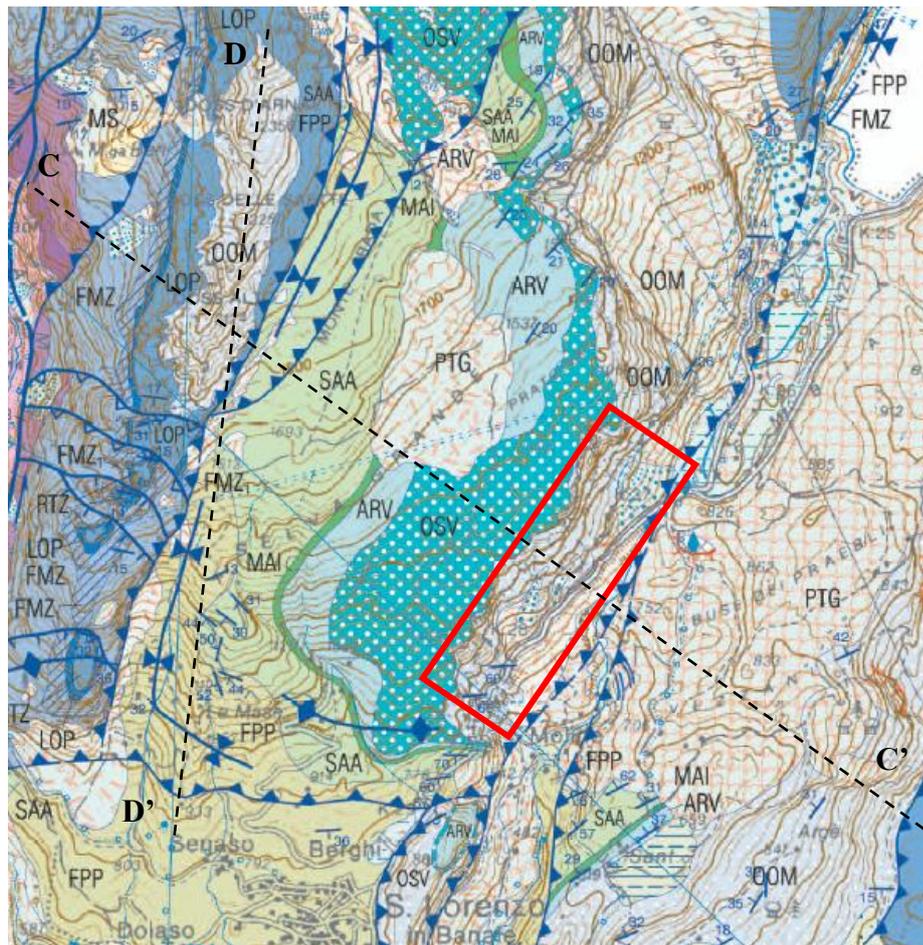


Figura 13 - Inquadramento geologico generale dell'area interessata dal presente studio, segnata in rosso (estratto dalla cartografia CARG alla scala 1:50000, APAT, 2005). Vengono segnati in nero i profili successivamente descritti.

Unità di piattaforma e bacino del Norico - Retico - Lias basale

 DOLOMIA PRINCIPALE (DPR)

Dolomie stromatolitiche, dolomicriti e dolo areniti chiare, fossilifere (Megalodon e Worthenia sp.), in strati modio-spessi, peritidali nella parte inf. (500-700m) e subtidali in quella sup.. Limite inferiore netto concordante su BRE<sub>2</sub> e localmente discordante con paleokarst su BRE, non affiorante nel settore E del Foglio. Spessore 1200-1500m. Norico-Retico.

## CALCARE DI ZU



### Membro di Tremalzo (ZUU<sub>1</sub>)

Calcarei micritici e calcai dolomitici grigio-scuro, bioturbati, con Megalodontidi, calcari stromatolitici grigio-chiaro con strutture da disseccamento e breccie intraclastiche. Strati medio-spessi. Limite inf. Graduale su ZUU<sub>1</sub>. Spessore fino a 250m. Retico.



### Membro del Grostè (ZUU<sub>3</sub>)

Calcarei micritici grigio-scuro, marne e argilliti nere, biocalcareni gradate a Molluschi e Brachiopodi in strati medio-sottili. Localmente cespi di coralli. Limite inf. Netto concordante su DPR, graduale su ZOR. Spessore fino a 600m (Zuclo). Norico-Retico

## **Il Gruppo dei calcari Grigi e le Unità in facies veneta dell'Alto di Trento Retico-Lias Aaleniano**

Il gruppo dei Calcari Grigi, eteropico in alcuni punti ai membri della formazione di Tofino e della formazione di Val d'Oro, costituisce un'unità sintettonica di piattaforma carbonatica tra le più classiche del Lias del Sudalpino che si è sviluppata sotto il controllo della tettonica estensionale del rifting norico-liassico.

In base ai caratteri litologici, alle associazioni di facies e alle reciproche relazioni geometriche delle successioni interne al Gruppo sono state distinte quattro formazioni. Esse corrispondono ai membri che erano stati introdotti e utilizzati in precedenza (Bosellini & Broglio Loriga, 1971; Masetti et al., 1996a, 1996b). Le tipiche associazioni liassiche di piattaforma carbonatica di tipo bahamiano sono chiuse alla loro sommità dal calcare oolitico di S. Vigilio che precede il definitivo affondamento della piattaforma in zone più profonde, in gran parte afotiche, testimoniate dai calcari sovrastanti del Rosso Ammonitico

Veronese e della Maiolica. Queste successioni, in facies veneta, sono tipiche del settore orientale del Foglio (ad E della Linea della Val d'Ambièz, AZ in Figura 9), mentre mancano o risultano incomplete, in quello occidentale. Infatti questa linea assieme a quella della Vedretta dei Camosci (VC in Figura 9) rappresenta la prosecuzione verso nord della scarpata tettonica Ballino-Garda (BG in Figura 9).



#### FORMAZIONE DI MONTE ZUGNA (FMZ)

Calcari stromatolitici, biomicriti, calcareniti fossilifere con livelli discontinui di "terra rossa" (paleokarst). In strati spessi (unità peritidale). Biocalcareniti talora oolitiche con livelli di micriti brune in strati medi, localmente più scure con spicole di Spugne (unità subtidale). FMZ è eteropico con TOF<sub>2</sub>, FMZ e COR<sub>2</sub>. Limite inferiore netto concordante su ZUU<sub>3</sub>. Spessore fino a 650m (Croce dell'Altissimo). Retico - Sinemuriano.



#### Membro di Stenico (FMZ<sub>1</sub>)

Calcari micritici grigi e ocra a spicole di Spugne, Calcari oolitici e intraclastici, mal stratificati. Rara selce bruna. Limite inferiore graduale su FMZ, eteropico a FVO. Spessore fino a 250m. Retico sup. - Sinemuriano inf..



#### CALCARE OOLITICO DI LOPPIO (LOP)

Calcari oolitici intraclastici grigio-chiari, con rare intercalazioni di micriti a spicole di Spugne calcaree e Belemnoidi, in strati spessi a laminazione incrociata. Limite inferiore netto e concordante su FMZ. Spessore 0 - 200m. Sinemuriano.



#### FORMAZIONE DI ROTZO (RTZ)

Calcari micritici grigi con Molluschi (tra cui "Lithiotis") e Foraminiferi con interstrati di marne scure, calcareniti oolitiche, in strati medio-spessi. Limite inferiore netto concordante su LOP, eteropico a RTZ<sub>1</sub>. Spessore fino a 250m. Sinemuriano - Pliensbachiano.



#### CALCARE OOLITICO DI MASSONE (OOM)

Calcari oolitici chiari in strati spessi, localmente a laminazione incrociata. Limite inferiore netto e concordante su RTZ e RTZ<sub>1</sub>. Spessore fino a 250m. Pliensbachiano sup.

## CALCARE OOLITICO DI S. VIGILIO (OSV)

Calcari oolitici a crinoidi grigio-giallastri, encriniti rosse, in strati spessi-molto spessi, talora a laminazione incrociata. Limite inferiore netto discordante su OOM e localmente (M.Misone) su TOF<sub>4</sub>. Spessore 10 - 30m. Toarciano – Aaleniano inf..

### Unità di bacino del Bajociano - Cretacico inferiore e del Cretacico Superiore

## ROSSO AMMONITICO VERONESE (ARV)

Calcari micritici rossastri nodulari a Bivalvi pelagici. Calcari micritici selciferi rossi con livelli di cineriti argillificate, in strati medio-sottili. Calcari rossi nodulari ad Ammonoidi. Limite inferiore netto su OSV marcato da croste polimetalliche di hard ground. Spessore 0 -20m. Bajociano sup. - Titoniano.

## MAIOLICA (MAI-MAI<sub>2</sub>)

Calcari micritici bianchi e grigi ricchi in noduli e lenti di selce, a Radiolariti e Tintinnidi in strati medio-sottili. Alla base corpi di breccie poligeniche (MAI<sub>2</sub>) spessi fino a 20m. Limite inferiore netto e concordante su SLO, TOF<sub>4</sub> o erosivo su FMZ<sub>1</sub> in presenza di MAI<sub>2</sub>. Spessore 10 - 150m. Titoniano sup. – Barremiano.

## SCAGLIA ROSSA (SAA-SAA<sub>1</sub>)

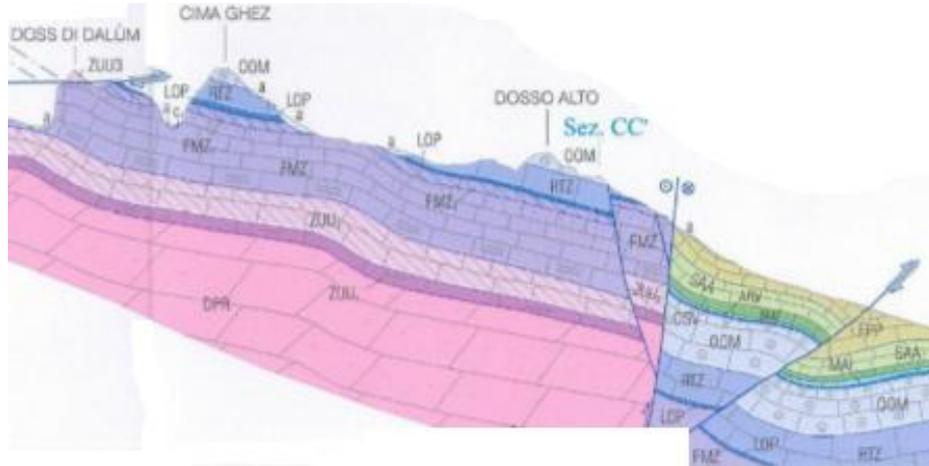
Calcari micritici nastriformi (5-15 cm) talora selciferi, calcari marnosi rossi, ricchi in Foraminiferi planctonici. Contengono voluminose breccie a blocchi (SAA<sub>2</sub>) e formano il riempimento di estesi corpi filoniani. Limite inferiore netto e concordante su VAA, inconforme su MAI e localmente discordante su FMZ<sub>1</sub> e TOF<sub>4</sub> eteropica con VAG-VAG<sub>1</sub>. Spessore 0 - 270 m. Aptiano sup. - Eocene inf..

### Unità di bacino dell'Eocene inferiore – Oligocene

## FORMAZIONE DI PONTE PIA' (FFP)

Calcari micritici lastriformi (10-25 cm) nella parte superiore passanti a calcari marnosi con intervalli (cm, m) di bentoniti e banchi metrici di calcitorbiditi nummulitiche alla sommità. Limite inferiore netto concordante su SAA. Spessore fino a 200 m. Eocene inf. - Eocene sup..

Entrando nel dettaglio dell'area in esame vengono di seguito riportate due sezioni geologiche estratte dal Foglio CARG Tione di Trento orientate rispettivamente N-S (Figura 14) ed NW-SE (Figura 15) che sintetizzano il contesto geologico - stratigrafico e strutturale locale:



*Figura 14 – Estratto del profilo N-S (D-D') della carta geologica del Foglio CARG Tione di Trento relativo all'area di studio, segnata in rosso.*

Dal profilo di Figura 14 si osserva che la stratificazione generale immerge verso Sud di circa 30°. In particolare, dal Dosso di Dalum (a nord) verso sud, in prossimità del Dosso Alto, sono presenti due lineamenti N vergenti ad alto angolo, i quali alzano di poche decine di metri la successione triassica sup. - giurassica. Seguendo il pendio si incontrano due lineamenti importanti: il primo, con carattere trascorrente sinistro, giustappone/affianca le litologie triassiche - giurassiche (DPR, ZUU1, ZUU2, FMZ, LOP, OOM) a quelle giurassiche - cretacee (OOM, OSV, ARV, MAI, SAA, FPP); mentre il secondo, costituisce il sovrascorrimento di San Lorenzo in Banale sud vergente (LZ in Figura 9) e solleva tale successione rispetto alla propria prosecuzione verso sud (posta sull'omonimo abitato). Entrambi i lineamenti provocano delle pieghe di trascinamento.

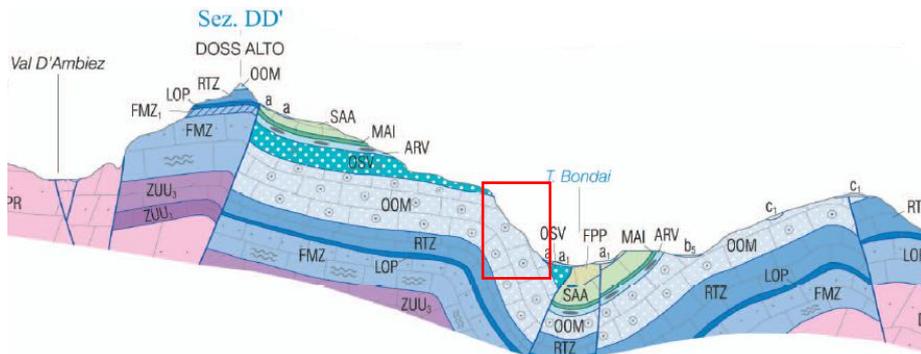


Figura 15 - Estratto del profilo NW-SE (C-C') della carta geologica del Foglio CARG Tione di Trento relativo all'area di studio segnata in rosso.

Il profilo geologico di Figura 15 rappresenta una serie di pieghe originate dagli eventi compressivi. In particolare, da ovest verso est sono presenti le seguenti strutture tettoniche: la linea della val d'Ambiez (AZ in Figura 9) che abbassa la serie triassica DPR di qualche centinaio di metri rispetto alle litologie più giovani attualmente affiancate, una faglia est vergente che solleva tale successione rispetto a quelle giurassiche e cretacee più giovani, con piega sinclinale di trascinamento seguita dall'anticlinale originata dall'uncinamento sulla Linea di Molveno Ovest, anch'essa est vergente. In questo caso le successioni giurassiche risultano piegate con l'asse di cerniera situato all'incirca sulla parete in studio. Tale struttura, nel fondovalle, è associata alla linea di Molveno Est nel formare la sinclinale che segue tutta la valle omonima, nella quale affiorano le successioni cretacee. Salendo le pendici della dorsale Paganella-Gazza, la stratificazione segue un'altra anticlinale, influenzata da strutture tettoniche importanti ed in seguito rovesciata in prossimità della valle dei Laghi.

I depositi quaternari relativi a tale zona vengono descritti nel capitolo 3.

## Capitolo 3 Geomorfologia

### 3.1 Aspetti generali morfostrutturali regionali

Come accennato nel capitolo 2, il paesaggio trentino assume aspetti decisamente diversi passando da est verso ovest conservando le testimonianze delle vicissitudini tettoniche della fase alpina nel suo complesso. Una caratteristica peraltro comune del territorio è rappresentata dalle grandi valli ad orientazione all'incirca N-S (Valle del Cison ad Est e Val Giudicarie ad Ovest) e NNE-SSW, in particolare agendo le prime quali linee di svincolo cinematico preesistenti e diversamente riattivate dalle diverse fasi tettoniche. In queste va ricercata la paternità ancestrale delle "attuali" importanti evidenze morfologiche, in quanto anche lungo queste paleo strutture hanno preferenzialmente agito in modo evidente gli agenti esogeni fin dalla prima emersione. Lungo quegli stessi assi distensivi di età sia permiana che giurassica che dividevano il territorio nei due grandi paleo-bacini lombardo e veneto si giocò l'effetto della "inversione strutturale" con acme miocenico.

Ad est osserviamo evidenti, allineamenti N-S principalmente riconoscibili nella vergenza di alcuni grandi Gruppi montuosi (Pale di San Martino), quali relitti della orogenesi meso-alpina dinarica oligocenica, e spostandosi progressivamente verso ovest e verso sud il paesaggio è prevalentemente improntato con allineamenti vallivi ENE-OSO tipici della fase tettonica valsuganese miocenica (Valsugana), cui va attribuita la fase di deciso sollevamento che porta alla neonata catena neoalpina che prende il nome di Catena Giudicariense (Castellarin, 2009).

Tra i grandi esempi morfologici che la evidenziano primo tra tutti è probabilmente quello della Marmolada, che evidenzia allo stesso tempo effetti sia di polarità del sollevamento che di raccorciamento crostale, ma procedendo verso sud è sicuramente l'allineamento della Valsugana quello che in modo più persistente caratterizza il paesaggio fino in prossimità della Valle dell'Adige dove l'effetto della fase compressiva

adriatica messiniana si traduce in evidenze morfologiche con grandi allineamenti NNO-SSE quali la Valle di Non e la zona dei laghi della Valsugana impostati su linee trascorrenti appartenenti al sistema Schio-Vicenza (Linea Trento-Cles-Caliso-Val d'Astico). Più ad ovest ancora, venendo quindi alla zona in esame, troviamo che le linee ancestrali ad orientazione N-S, riattivate in qualità di strutture transpressive (lateralità di rampa), ospitano corrispondenti allineamenti vallivi meridiani (Molveno, San Lorenzo, Ponte Arche) con il lato est improntato su estese monoclinali est-vergenti (Paganella, M.te di Ranzo, M.te Casale, ecc) corrispondenti a rampe laterali.

Lungo questi assi strutturali l'erosione del deflusso superficiale unitamente all'azione delle fasi glaciali quaternarie ha potuto quindi plasmare il paesaggio che tuttavia consente una sua chiara lettura in prospettiva morfologica - strutturale .

Tale paesaggio presenta quindi importanti differenziali altimetrici, condizione favorevole al degrado dei fianchi vallivi sui quali ha prevalentemente agito l'azione tensionale (carico/scarico) dei ghiacciai dando luogo a fenomeni franosi anche di grandi dimensioni.

In questo capitolo vengono presentati i principali aspetti morfologici e geodinamici gravitativi che caratterizzano la zona compresa tra il lago di Molveno e l'abitato di San Lorenzo in Banale.

L'analisi geomorfologica ha anche l'obiettivo di dettaglio di definire qualitativamente le caratteristiche elastiche del terreno (soil type) su cui si sviluppano le traiettorie di crollo generate nella simulazione numerica adottata (software Rockyfor3D) e descritta nel proseguo.

## **3.2 Aspetti geodinamici locali**

### **3.2.1 Classificazione dei movimento franosi**

Riprendendo la classificazione proposta dal progetto EPOCH (1993), i fenomeni gravitativi di versante possono essere distinti in:

- Crolli
- Ribaltamenti
- Frane rotazionali
- Frane traslazionali
- Espansioni laterali
- Deformazioni profonde da creep
- Valanghe di roccia
- Colate detritiche

Cruden e Varnes (1996) avevano proposto una classificazione maggiormente approfondita, la quale distingue il tipo di materiale interessato dal movimento gravitativo in roccia, roccia sciolta e terra, riportata di seguito in Tabella 3 .

Tipo di movimento	Tipo di materiale		
	Roccia ( <i>rock</i> )	Roccia sciolta o terra ( <i>engineering soil</i> )	
		Detrito grossolano ( <i>debris</i> )	Detrito fine ( <i>earth</i> )
<b>Crollo (<i>fall</i>)</b>	Crollo di roccia	Crollo di detrito	Crollo di terra
<b>Ribaltamento (<i>topple</i>)</b>	Ribaltamento di roccia	Ribaltamento di detrito	Ribaltamento di terra
<b>Scivolamento (<i>slide</i>)</b>			
<b>rotazionale (<i>rotational</i>)</b>	Scivolamento rotaz. di roccia	Scivolamento rotaz. di detrito	Scivolamento rotaz. di terra
<b>traslativo (<i>translational</i>)</b>	Scivolamento trasl. di roccia	Scivolamento trasl. di detrito	Scivolamento trasl. di terra
<b>Espansione laterale (<i>spread</i>)</b>	Espansione di roccia	Espansione di detrito	Espansione di terra
<b>Colata (<i>flow</i>)</b>	Colata di roccia	Colata di detrito	Colata di terra

Tabella 3 - Classificazione dei movimenti franosi nella quale si distinguono differenti materiali coinvolti: roccia, roccia sciolta e terra (Cruden & Varnes, 1996).

Di seguito vengono brevemente descritte le due tipologie caratterizzanti la parete in studio, per le restanti si rimanda alla letteratura.

### Crolli

I crolli rappresentano distacchi di roccia lungo superfici di scivolamento dettate dall'assetto strutturale dell'ammasso e che possono presentarsi in forma planare, a scalini coniugati e di cuneo.

Il distacco, detto anche fenomeno di caduta massi, si verifica in genere come caduta libera dei blocchi coinvolti e si trasforma con traiettorie di rimbalzo e di rotolamento fino a raggiungere aree anche molto lontane dal punto di distacco.

### Ribaltamenti

Il fenomeno dei ribaltamenti coinvolge colonne o lastre di roccia interagenti e sub verticali, che possono svilupparsi lungo piani di rottura singoli o multipli.

I ribaltamenti sono potenzialmente molto pericolosi in quanto si sviluppano in maniera lenta all'inizio per poi evolversi rapidamente fino al collasso immediato, con velocità molto alta e grandi distanze di trasporto.

### **3.2.2 Fattori che influenzano le frane**

I fattori che concorrono a determinare un fenomeno gravitativo vanno distinti in: fattori predisponenti, preparatori ed innescanti, che da un lato comportano una diminuzione delle risorse disponibili in seno all'ammasso e dall'altro determinano un aumento delle sollecitazioni al suo interno o al contorno.. Di seguito, in Figura 16, viene riportato uno schema relativo alle cause interne ed esterne.

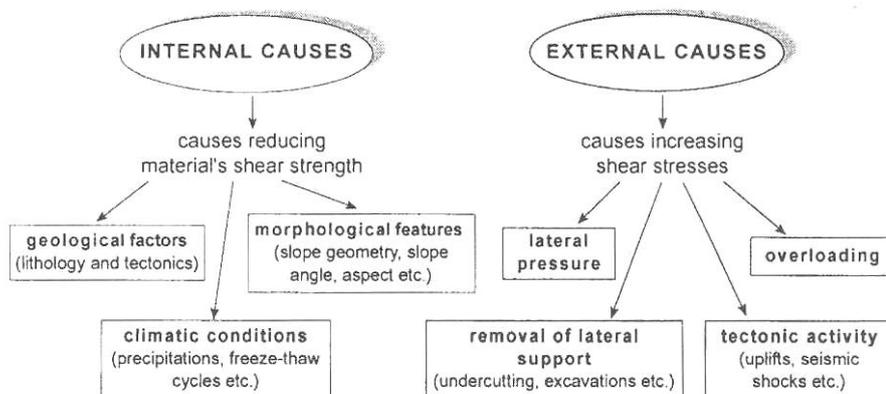


Figura 16 – Suddivisione delle cause di frana interne ed esterne (Pasuto & Soldati, 1996).

### **3.2.3 Modelli di rottura**

I modelli di rottura più frequentemente osservati nella pratica possono essere classificati in una delle prime quattro categorie seguenti, meno spesso nelle altre, in funzione del tipo e del grado di controllo strutturale:

- scivolamenti bidimensionali, o piani, governati da una singola discontinuità immergente in concordanza con il fronte della scarpata;
- scivolamenti tridimensionali di cunei definiti da due discontinuità con una linea di intersezione immergente in concordanza con il fronte della scarpata;
- ribaltamenti di lastre o di colonne di roccia definite da discontinuità che immergono con forte inclinazione all'interno della scarpata;
- rotture lungo superfici di scivolamento circolari o mistilinee, tipiche di ammassi molto fratturati, con altezza di scarpata molto elevata, o caratterizzati da resistenze al taglio molto basse;
- scivolamenti bidimensionali, o piani, governati da due sistemi di discontinuità coniugati tra loro;
- scivolamenti bidimensionali, o piani, governati da tre sistemi di discontinuità, di cui due coniugati ed uno discordante

### **3.3 Geomorfologia della valle di Molveno nei pressi del monte Prada**

La valle di Molveno è caratterizzata dalla presenza dell'omonimo lago che ne costituisce gran parte. Oltre ai depositi lacustri appunto, la parte meridionale dell'altopiano della Paganella, è caratterizzata dalla presenza di depositi quaternari di tipo gravitativo e glaciale -

postglaciale (PTG), evidenziati nella carta geologia del foglio CARG (Figura 17).

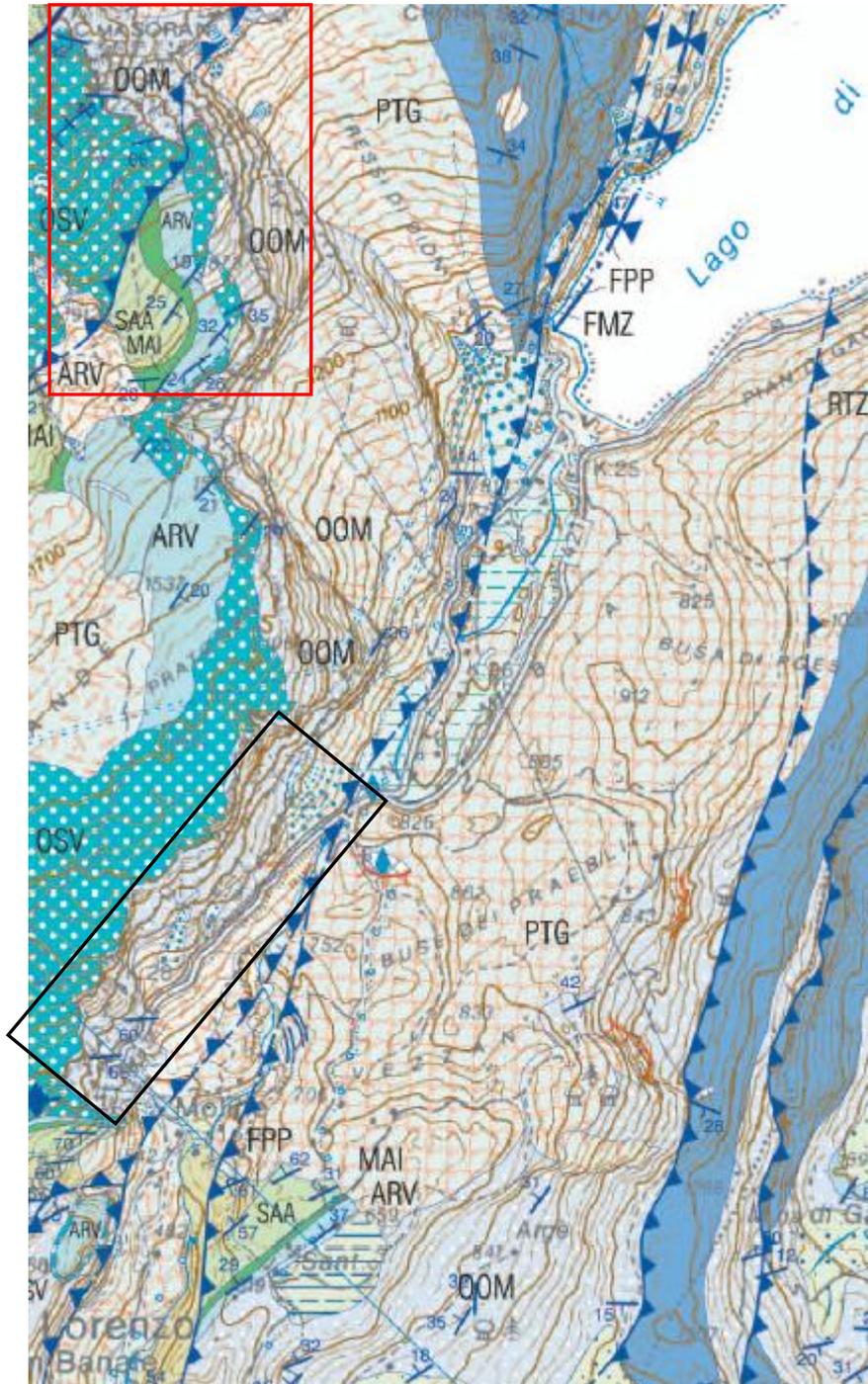


Figura 17 – Estratto della carta geologica del foglio CARG Tione di Trento. Vengono evidenziati l'accumulo di frana posto a sud del lago di Molveno, le strutture, le faglie est ed ovest vergenti, il monte Soran (segnato in rosso) e l'area di studio (segnata in nero).

La frana di Molveno è definita come una fra le più grandi frane post-glaciali del Trentino (Fuganti, 1969; Baroni et al., 1990), essendo caratterizzata da un deposito di grande dimensione di circa 250 milioni di mc e se unito a quello proveniente dal versante opposto è pari a 550 mc (Chinaglia, 1993).

E' una frana di scivolamento sul piano di rampa laterale afferente il M.te Gazza. Essa si sviluppa in qualità di scivolamento planare, lungo le ampie superfici di strato che caratterizzano il fianco orografico sinistro, favorito dalla profonda escavazione del solco vallivo che al momento del ritiro glaciale determinò una condizione di “sostegno manco” al piede.

Situata sul versante occidentale del monte Gazza, nella parte meridionale del massiccio della Paganella, la frana è caratterizzata da un coronamento che si estende da NNW a SSE per 2-3 km mantenendosi alla quota di 900-1000 m, mentre la parte basale si estende dall'inizio del lago di Molveno fino alla località Moline (Figura 18). Le litologie interessate sono la formazione dell'Oolite di Massone, la Formazione di Rotzo e quella del Rosso Ammonitico Veronese.



*Figura 18 - Accumulo della frana di Molveno: visto da sud e da nord-ovest. Si distinguono alcune forme del deposito che evidenziano vari eventi di frana.*

Poco a nord della frana di Molveno, in prossimità della strada statale 421, è presente una piccola frana attiva nella formazione del Rosso Ammonitico Veronese (ARV).

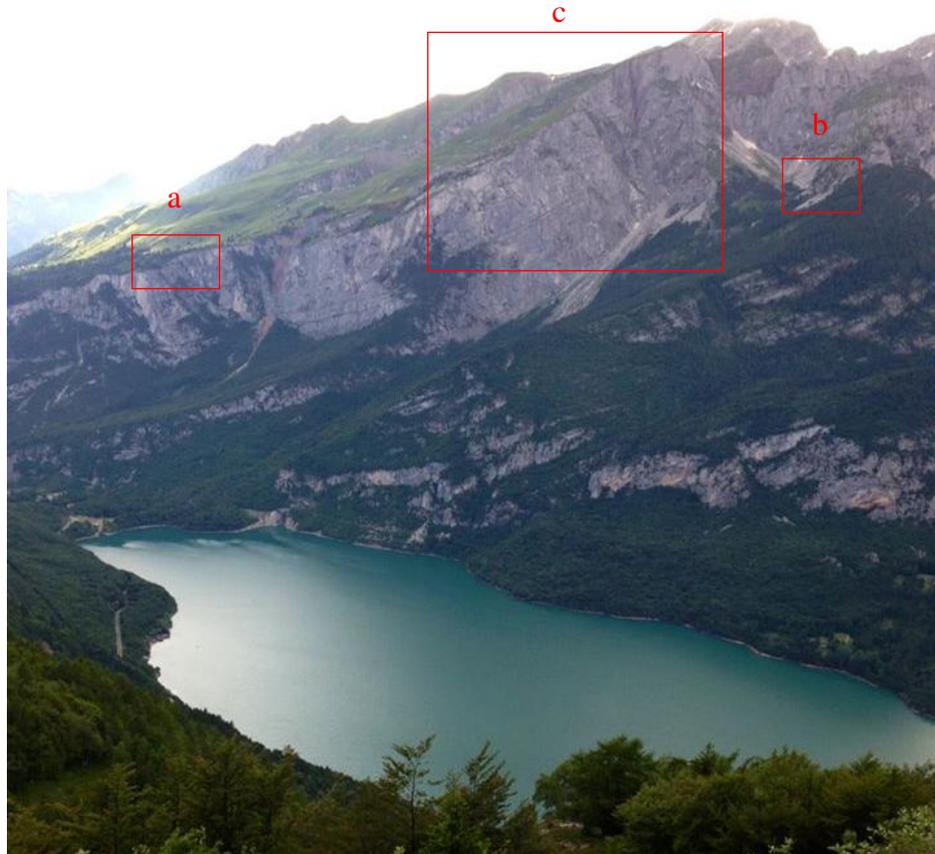
La frana di Molveno ha favorito l'accumulo idrico a monte della stessa formando l'omonimo lago e lasciando una zona pianeggiante e umida tale da permettere la formazione del lago di Nembia, il quale attualmente funge da scolmatore del lago di Molveno.

Tale bacino è ubicato nel solco morfo-strutturale che separa la catena del Brenta ad ovest dalla dorsale Paganella-Gazza ad est, ed è sorretto frontalmente da più corpi di frana, derivanti da scivolamenti planari e valanghe di roccia, per un volume totale di detrito valutato in circa 550 milioni di mc . L'area immediatamente a sud-ovest del lago di Molveno è caratterizzata da una successione di dossi (quota 932, 910, 833, 790, 822) e di depressioni (Busa di Poes, Busa di Colin, Buse dei Pravebili), che richiamano la tipica morfologia di un accumulo detritico a dossi e grossi massi. Lo sbarramento risulta articolato in più corpi di frana, non distinguibili dalla sola analisi della carta topografica (marocca di Nembia, marocca delle Moline, marocca di pian delle Gaorne), provenienti sia dal versante destro (Mt. Prada) sia da quello sinistro (Paganella).

Nel settore destro orografico della valle di Molveno sono presenti alcuni fenomeni gravitativi, alcuni dei quali catastrofici (Fuganti, 1969; Baroni et al., 1990) resti di seguito descritti. Partendo da Molveno (nord) verso San Lorenzo in Banale (Sud) si trovano il conoide alluvionale formato dal Rio Valle delle Seghe, alcuni depositi di versante di piccole dimensioni, la DGPV del monte Soran, altri fenomeni di versante e quello di crollo dall'imponente parete NE ed E del monte Prada, caso di studio di questo lavoro.

La DGPV del Monte Soran (Figura 19), descritta da alcuni autori fra cui Sauro & Zampieri (2001) e Chinaglia & Fornero (1995), rappresenta un'importante struttura tettonica attiva. In passato, è stato luogo di imponenti eventi di crollo. Oggi, in virtù degli studi effettuati relativamente agli stati tensionali cui sono soggetti i piani di strato e faglia sub verticali, si pensa che il cuneo strutturale possa portare ad prossimi eventi di crollo di notevole importanza.

Depositi di versante riguardanti tale fenomeno sono presenti in prossimità del lago di Molveno, in località Tressi di Dion e Prato Nan (Figura 19) e nell'area tra il lago di Nembia e San Lorenzo in Banale. Questi ultimi coinvolgono anche la strada statale 421 dei Laghi di Tenno e Molveno, oggetto di studio.



a

b



*Figura 19 – Esempi di crolli e colate detritiche sul versante sud occidentale della valle di Molveno. a. Fenomeni di crollo sul versante NE del monte Prada, poco sopra alla località Prati di Nan in cui si riconoscono delle morfologie molto simili a quelle presenti su versante est, oggetto di studio. b. Colate detritiche nei pressi della località Tressi di Dion e della bassa val di Ceda. c. Cima del monte Soran con alcuni elementi strutturali di notevole importanza.*

Il monte Prada è un massiccio di rocce calcaree, in particolare costituito dalle litologie presenti in Figura 13, ovvero dalle formazioni FMZ, RTZ, LOP, FMZ, OOM, MAI, SAA, FPP, i cui simboli sono spiegati nel capitolo 2.3.1. Esso è delimitato da importanti strutture tettoniche che hanno influito sull'attuale morfologia. Infatti, osservando la Figura 5, si distingue un andamento a rampe e ripiani.

Oltre all'azione tettonica, alcuni eventi franosi di esigue dimensioni hanno favorito l'accumulo di detrito proveniente dalle pareti poste sulla cresta spartiacque (dal passo Bregain posto a sud al Dosso d'Arnal posto a nord) da 1600 a 2000 m di quota, come riportato in Figura 13.

La successione di dossi e solchi pratosi del monte Prada viene interrotta a nord dalla presenza dell'imponente val Dorè, disposta circa WNW-ESE.



*Figura 20 – Visione della val Dorè da est verso ovest. Si distinguono alcuni coni detritici alla base delle pareti della dorsale cima Ghez – cima dei Rossati – monte Dion.*

Tale solco, lungo profondo da 200 m a 1000 m, è originato da importanti strutture tettoniche persistenti sia a nord che a sud ed è caratterizzato da una serie di fenomeni franosi, in particolare crolli che si trasformano in colate detritiche (Figura 20). La Val Dorè è delimitata dal monte Prada a sud, dalla valle di Molveno ad est, dal monte Soran a nord e dalla dorsale cima Ghez-cima dei Rossati-monte Dion ad ovest.

### **3.3.1 Idrologia**

Dal punto di vista pluviometrico, l'area tra San Lorenzo in Banale ed il lago di Molveno è caratterizzata da valori per lo più bassi rispetto a quelli provinciali (Figura 21). Infatti, nell'intervallo temporale degli ultimi 30 anni, si colloca nella fascia di intervallo di precipitazione media annua da 800 a 1000 mm. Nel dettaglio la stazione meteorologica di San Lorenzo in Banale mostra valori annuali massimi di 1360 mm e minimi di 820 mm ([www.meteotrentino.it](http://www.meteotrentino.it)).

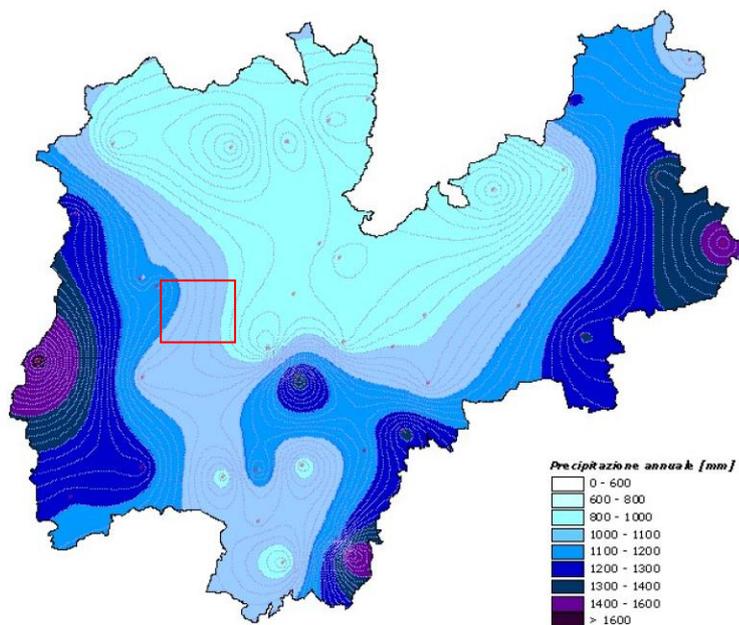


Figura 21 - Mappa della distribuzione media annuale delle precipitazioni sul Trentino per il trentennio 1981-2010 ([www.climatrentino.it](http://www.climatrentino.it)). L'area rosso indica l'area di studio.

Sul monte Prada non vi è scorrimento superficiale, tranne in occasione di eventi intensi di precipitazione, nei quali l'acqua scorre nelle vallette per poi infiltrarsi.

Sulla parete orientale del monte Prada l'acqua che precipita sul Piano di Froschera si infiltra nel deposito glaciale e nel massiccio roccioso.

Significativo è osservare come l'idrografia, sia pure ancora embrionale, a partire da quota 705 superi, con un salto di poco meno di 200 m (ad ovest - sud-ovest di Buse dei Pravebili), il fianco dell'accumulo franoso, generando un profondo solco sul quale scorre il torrente Bondai.

### 3.3.2 Idrogeologia

Le Dolomiti di Brenta, con la loro estensione di 556,8 kmq rappresentano la più estesa idrostruttura del Trentino. Considerate le

formazioni geologiche affioranti si può stimare che circa il 60% del territorio sia interessato da circolazione carsica profonda: pertanto, gli acquiferi carsici delle Dolomiti di Brenta sarebbero in grado di fornire complessivamente 12 mc/s di portata media annua. Attualmente, le risorse idropotabili sfruttate ammontano a meno di 1 mc/s, e sono concentrate soprattutto nelle più importanti sorgenti periferiche del massiccio (Centonia, Fusin Molin, Busoni e Acquasanta), e fanno capo ai principali acquedotti della Val di Sole, Val di Non, Piana Rotaliana, altipiano della Paganella, media e alta Valle del Sarca ([www.protezionecivile.tn.it](http://www.protezionecivile.tn.it)).

Il gruppo del Brenta, essendo caratterizzato per gran parte da rocce carbonatiche, è soggetto al fenomeno del carsismo, formando in alcuni casi delle enormi cavità all'interno della montagna. La cavità più vicina ed a monte della zona di studio, è la Grotta "Silvia" situata nell'alta val d'Ambièz (Zambotto, 2008), tuttavia non è escluso che ci siano delle cavità importanti anche all'interno della dorsale Cima Ghez-Dosso Alto, data la natura litologica del luogo.

Per quanto riguarda la circolazione idrica superficiale, questa non si sviluppa in un reticolo idrico ben sviluppato, ma si esplica principalmente in una circolazione per permeabilità primaria, legata ai corpi sedimentari situati alla base delle pareti verticali, dotati di elevata permeabilità e a scorrimento superficiale nelle aree in cui affiora il substrato roccioso. E' inoltre possibile una circolazione per permeabilità secondaria profonda, legata a fatturazione dei corpi litoidi, per loro natura impermeabili, ma resa possibile dalla presenza di faglie e diaclasi, che consentono di veicolare l'acqua in profondità attraverso le discontinuità presenti nell'ammasso. Con questa seconda possibilità, data la natura calcarea della roccia, si sono sviluppate vie preferenziali di natura carsica che convogliano l'acqua all'interno del corpo roccioso, attraverso fratture e cunicoli che fungono da corsie preferenziali per la circolazione, più o meno profonda, delle acque. Lo sviluppo di un reticolo di circolazione carsica, sviluppandosi lungo sistemi di fratture e

di debolezza già presenti all'interno dell'ammasso roccioso, interviene direttamente anche nel suo comportamento geomeccanico, modificandone le caratteristiche geometriche delle superfici e piani di contatto, modificando le caratteristiche resistive della matrice, attraverso processi chimici di alterazione superficiale delle interfacce.

Nella parte a valle dell'area di studio, invece, è presente il complesso carsico delle Moline. Esso è costituito da un insieme di 4 grotte (Sorgente Paroi, Bus del Carpen, Grotta Paroi, Grotta Riempita) che si sviluppano per 560 m complessivi (Ischia, 1991) nella formazione dei Calcari Grigi costituita da banchi a stratificazione metrica a giacitura subverticale inseriti nel contesto di un'ampia piega a ginocchio (Miorandi et al., 2005). Gli studi effettuati in tali cavità dal 1990 (PAT 2009, Borsato, 2007; Miorandi et al., 2005; Ischia, 1991) hanno dimostrato che esiste una certa relazione tra le temperature, le precipitazioni e la portata fluente, sulla base di analisi chimiche e isotopiche. Infatti la grotta Paroi, continuazione naturale della Sorgente Paroi (quota 631 m), è una sorgente valchiusiana temporanea che si attiva solamente a seguito di forti precipitazioni (Borsato, 2005).

# **Capitolo 4 Rilievo geomorfologico - geologico - strutturale**

## **4.1 Introduzione**

L'analisi della morfologia superficiale della zona è stata condotta inizialmente con l'ausilio delle ortofoto e del DTM-LiDAR messo in disponibilità dalla Provincia Autonoma di Trento. Successivamente l'analisi è stata integrata con il rilevamento in campagna supportato dal rilievo laser scanner terrestre effettuato dall'ing. A. Gaspari.

Il rilievo di campagna è stato caratterizzato da una serie di sopralluoghi in quasi tutte le aree accessibili della parete in studio.

## **4.2 Analisi geomorfologica**

### **4.2.1 Remote sensing**

#### **4.2.1.1 LiDAR**

Il *Light Detection And Ranging* (LiDAR) è probabilmente la tecnologia più significativa introdotta per la mappatura topografica nell'ultimo decennio.

Si tratta di una tecnica innovativa di telerilevamento attivo che permette di determinare la distanza di un oggetto o di una superficie sfruttando un impulso emesso da un dispositivo e successivamente diffuso dal bersaglio in questione. Il risultato è rappresentato da una raccolta di dati 3D.

Inoltre, la precisione centimetrica – millimetrica dei sensori e del laser ranging permette a tale tecnica di essere altamente accurata, oltre ad essere supportata da un sistema di posizionamento orientato ed integrato (POS; Shan, 2009).

Una grande qualità di questo strumento, è rappresentata dalla possibilità di filtrare le lunghezze d'onda della vegetazione e ricavare così il modello topografico tridimensionale, per di più ad alta risoluzione.

Il rilievo LiDAR della Provincia autonoma di Trento si compone dei seguenti prodotti ([www.territorio.provincia.tn.it](http://www.territorio.provincia.tn.it)):

- Modello digitale delle superfici (DSM) : è il grigliato regolare derivato dal DG, opportunamente filtrato, ricampionato e ortometrico per rappresentare l'andamento delle superfici (firstpulse), con passo di 1x1 metro (aree tipo 1) e di 2x2 metri (aree tipo 2 e 3).
- Modello digitale del terreno (DTM): è il grigliato regolare derivato dal DG, opportunamente filtrato, ricampionato e ortometrico per rappresentare l'andamento del terreno (last pulse), con passo di 1x1 metro (aree tipo 1) e di 2x2 metri (aree tipo 2 e 3).
- Il dato grezzo (DG) : viene ceduto solo su richiesta specifica. E' voluminoso ed ha finalità documentali e di supporto alla progettazione. Infatti, disponendo di skills e programmi adeguati (es. Microstation-Terrascan) è possibile effettuare classificazioni e progettazioni di dettaglio molto efficaci. Esso rappresenta l'insieme di tutti i punti rilevati, non filtrati né trasformati (e, quindi, non collaudati).

La copertura si compone di 1753 blocchi di 2 km di lato (senza sovrapposizione).

Per tutta la provinciale vengono utilizzati due tipi di sensori: TOPOSYS e OPTECH ALTM 3100, i quali si riferiscono rispettivamente alla zona dell'asta del Fiume Adige e a tutto il resto del territorio. Di seguito vengono riportate alcune informazioni relative al sensore OPTECH ALTM 3100.

<b>Parametri</b>	<b>Valori</b>
Lunghezza d'onda [nm]	0.4 - 0.8
Frequenza d'impulso massima [kHz]	100
Altezza media di volo [m]	1000-1800
Velocità di volo [km/h]	250
Direzione di volo	incrociato
Angolo di scannerizzazione [°]	25
Densità media dei punti per aree di tipo 1 ( > 8punti per cella da 2.5m x 2.5m)	0.9
Precisione planimetrica	1:5000

Tabella 4 - Caratteristiche del rilievo LiDAR in dotazione della Provincia Autonoma di Trento.

In questo lavoro di tesi, è stato adottato il rilievo LiDAR di tipo 1 ovvero con maglia pari a 1m x 1m.

Al fine di una migliore comprensione tridimensionale, dal DTM è stata derivata la forma *hillshade*, caratterizzata da ombre prodotte da una sorgente luminosa virtuale proveniente da SW (135° rispetto al nord) o da NW (315°), peraltro modificabili. La scelta relativa all'uso di una o dell'altra alternativa, ha avuto come priorità l'esaltazione dei caratteri morfologici ritenuti maggiormente significativi, a tal fine sono stati distinti due diversi modelli rispettivamente per l'osservazione della parete e del ciglio.

Il modello digitale terrestre ha soddisfatto le seguenti esigenze:

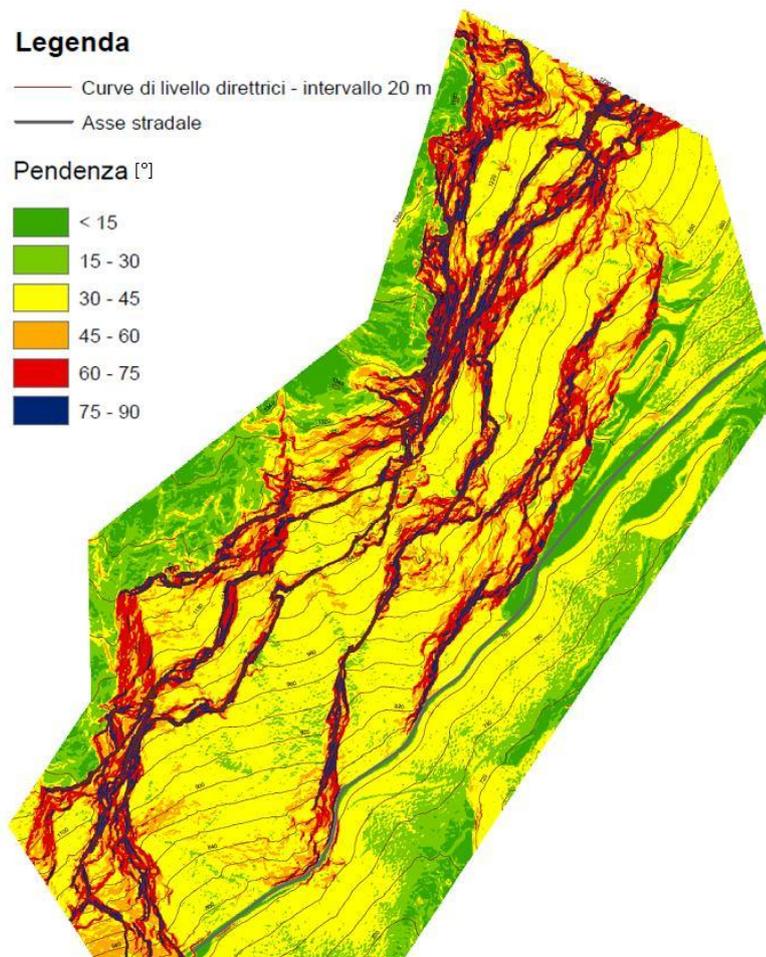
- derivazione dell'*hillshade*, forma tridimensionale più chiara per l'osservazione;
- analisi geomorfologica del monte Prada alla macro e meso scala;
- derivazione della carta delle pendenze;
- file di input per le simulazioni numeriche con il software Rockyfor3D (capitolo 7), adottando la risoluzione di 1m x 1m e 5m x 5m.

La carta delle pendenze è stata estratta mediante il tool *Slope* con il software ArcGIS 10.1 e riportata in Figura 22. Tale rappresentazione, adottando un'adeguata classificazione cromatica, mette in luce i piccoli avvallamenti sia sulla porzioni rocciose apicali che lungo tutto il pendio

della parete. Inoltre essa ha fornito delle indicazioni per la definizione delle aree sorgenti per quanto riguarda la compilazione del database usato per le simulazioni di caduta massi. A tale scopo, la scala cromatica è stata suddivisa in 6 classi di seguito elencate considerando tra l'altro due fattori importanti:

- l'angolo a partire dal quale viene considerato possibile l'innesco di fenomeni di crollo ( $45^\circ$ );
- intervallo di pendenza delle superfici di rottura osservate nei rilievi in campagna, nella documentazione fotografica e dalle analisi di stabilità ( $60 - 75^\circ$ ).

In seguito viene riportata tale rappresentazione con la relativa legenda.



*Figura 22 - Carta delle pendenze della parete est del monte Prada, la relativa legenda e l'asse stradale.*

#### 4.2.1.2 SAR e foto aeree

Il Radar ad Apertura Sintetica (SAR) è un sistema di telerilevamento radar coerente, attivo e a microonde. Il principio alla base del SAR è la possibilità di ottenere una elevata risoluzione angolare dall'analisi dello spettro del segnale in ricezione da un sistema radar di tipo coerente. Per una descrizione dettagliata di tale sistema vengono indicati i lavori di SARmap (2007) e di Ferretti (2001, 2007).

Le applicazioni dell'interferometria satellitare SAR sono principalmente le seguenti:

- problemi legati alle inondazioni, sfruttamento del suolo e gestione territoriale;
- ricavare modelli digitali del terreno (DEM) sia in zone di pianura che di montagna;
- monitoraggio spostamenti del terreno nel tempo (PSInSAR).

La metodologia Permanent Scatterers Synthetic Aperture Radar Interferometry (PSInSAR) prevede la valutazione ad alta risoluzione di deformazioni di superfici attraverso lunghi periodi di osservazione (con intervallo di precisione tra 0.8 e 0.1 mm/anno); quindi è particolarmente adatta ad analizzare movimenti superficiali relativi ad ampie regioni aventi bassa attività tettonica. In virtù di ciò, la Provincia Autonoma di Trento ha adottato tale tecnica per studiare i movimenti attraverso la catena delle Giudicarie, quale “thrust belt” obliquo orientato secondo il trend NNE nel dominio Sudalpino (Massironi et al., 2009).

La visualizzazione dei dati relativi all'area di studio, in possesso del Dipartimento di Protezione Civile di Trento - Servizio Geologico, ha permesso di trarre le seguenti conclusioni. I punti di misura presenti nel database provinciale sono in genere lontani dall'area di studio, tuttavia l'unico punto in prossimità non rappresenta dei movimenti verticali significativi ( $< 0.5$  mm/anno). Questo aspetto, alla macroscale può essere previsto dato che le aree in sollevamento sono rappresentate dalle dorsali Paganella - M.Gazza, Bondone - Stivo, Monte Baldo, poste ad est dell'area di studio (Massironi et al., 2009; Zampieri & Sauro, 2001).

In riferimento alla meso e microscala invece, è ragionevole formulare le seguenti ipotesi che giustificano tale risultato:

- il movimento è avvenuto e non avviene più;
- il movimento è molto lento, lo spostamento è minore della sensibilità dello strumento;
- il movimento ha un tempo di ritorno molto elevato.

### **Documentazione fotografica da AEREO storiche**

Alla scopo di capire se vi sono stati eventi franosi di notevole entità nell'ultimo mezzo secolo, è stata visualizzata la documentazione fotogrammetrica da aereo fornito dal dipartimento di Protezione Civile della Provincia di Trento – Servizio Geologico.

Sulla base di quanto visto, non si evidenzia nessun fenomeno franoso di importanza tale da esser visto in tale scala spaziale e temporale.

## **4.2.2 Geomorfologia dell'area di studio**

La morfologia dell'area è quella tipica di catene montuose interessate da fenomeni orogenetici recenti, in particolare da processi associati all'ultimo picco glaciale e al successivo regime fluviale di deglaciazione. Le forme e i depositi quindi riflettono l'alternarsi e l'interazione di ambienti diversi con le strutture tettoniche e le dinamiche che hanno agito negli ultimi milioni di anni, conferendo alla zona la morfologia attuale.

Le forme principali che caratterizzano la parete sono legate più a dinamiche tettoniche a scala regionale piuttosto che a quelle esogene locali, che hanno agito in epoche recenti. E' lo stress tettonico che, in qualità di fattore predisponente, deformando e fratturando più o meno pervasivamente la roccia, ha consentito e favorito l'instaurarsi di processi erosivi sviluppatasi prevalentemente lungo zone di debolezza strutturale.

Come è ben visibile nella panoramica di Tavola G1 siamo in presenza di una parete, che si sviluppa orizzontalmente per quasi un chilometro e verticalmente per quasi 600 m, caratterizzata da ampie superfici rocciose inclinate verso valle e intervallate le una dalle altre ogni 70-100 metri circa da ripiani di dimensioni variabili (Tavola G3).

Queste superfici si sviluppano su giunti di strato probabilmente indeboliti da movimenti di accomodamento sviluppatisi durante le fasi di piegamento, che ne hanno causato lo scollamento in banchi spessi circa 70-100 m e di conseguenza determinato i domini su cui erosione e crolli progressivi hanno agito per conferire al versante l'attuale morfologica

I piani inclinati agiscono da zone d'arresto per le frazioni più fini che si accompagnano ai singoli crolli, le quali accumulandosi, danno luogo alle falde detritiche presenti lungo tutto il versante (Tavola G4). Le dimensioni di questi corpi si sviluppano maggiormente nei settori più bassi della parete dove le cenge ricevono e intercettano materiale proveniente da settori via via maggiori.

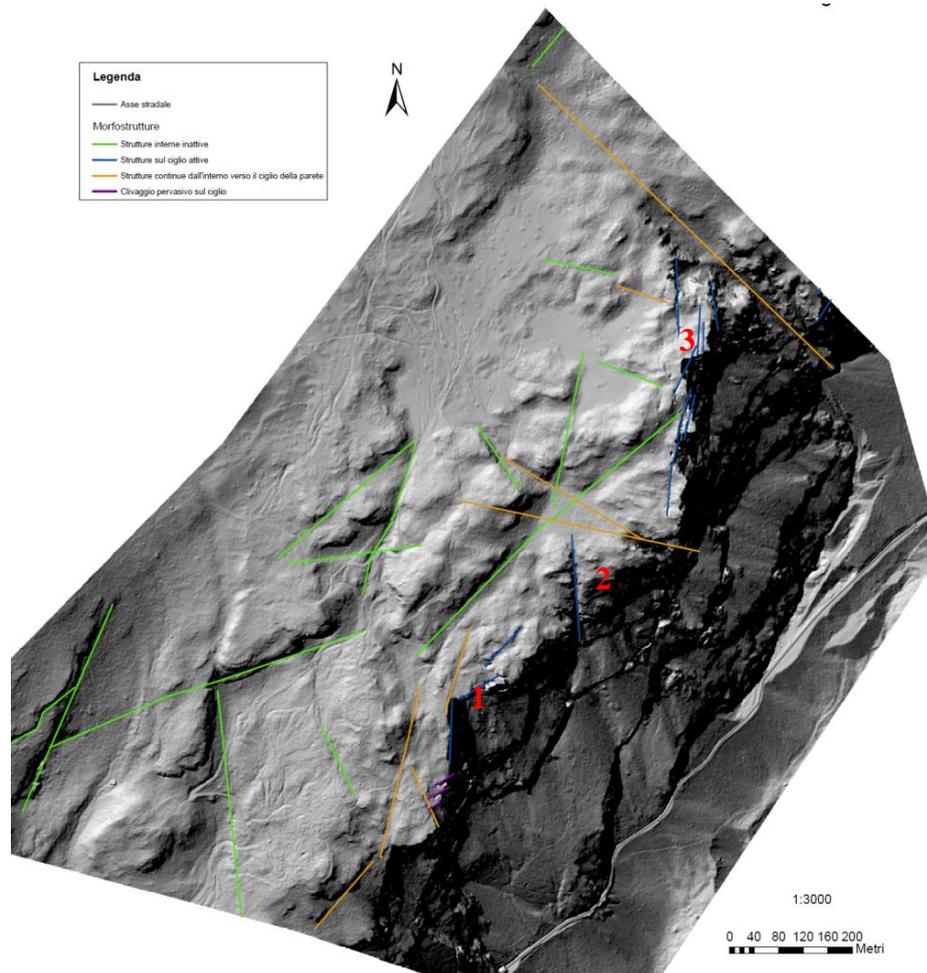
Sulla parete sono presenti una serie di profonde fratture, legate a zone di debolezza strutturale, via via allargate dall'azione erosiva degli agenti esogeni, esse sono orientate circa ortogonalmente alla parete stessa. Alla base di queste fratture si sviluppano piccoli conii detritici, il cui materiale, a mano a mano che si allontana dalla zona sorgente, si interdigita con il materiale proveniente da settori esterni alle fratture stesse. I maggiori accumuli di materiale detritico sono presenti a valle della strada dove si raccordano progressivamente con il fondovalle (Figura 23).



*Figura 23 - Immagine di una parte del deposito di frana localizzato alla base della parete est del monte Prada. Si osservano delle creste di materiale detritico soggette ad erosione retrograda.*

La rappresentazione *hillshade* del DTM della zona pianeggiante in prossimità del ciglio della parete e delle medesima, permette di individuare alcune morfostrutture, osservate anche nel rilievo di campagna e riportate in Figura 24 ed in Tavola G4.

Vengono distinti gli avvallamenti di origine tettonica più interni rispetto a quelli presenti in prossimità della parete. I primi hanno carattere quasi “fossile” e inattivo, mentre i secondi hanno carattere più recente e sono più probabilmente legati a fenomeni di natura gravitativa su larga scala.



*Figura 24 - Rappresentazione delle morfostrutture individuate in prossimità del ciglio della parete est del monte Prada mediante il modello hillshade derivato dal rilievo LiDAR con risoluzione della maglia pari a 1m x 1m. Vengono distinte quattro tipi: struttura interne inattive, struttura sul ciglio attive, struttura continua dall'interno verso il ciglio e clivaggio pervasivo sul ciglio. I numeri posti su alcune morfostrutture si riferiscono alle trincee riportate in seguito.*

### **Zona di ciglio**

Il bordo superiore presenta una topografia maggiormente articolata a causa dell'azione combinata di stress tettonici e azione modellante degli agenti esogeni (la natura calcarea delle rocce affioranti e subaffioranti favoriscono la circolazione delle acque meteoriche lungo le fratture, che in seguito a fenomeni di dissoluzione carsica tendono a svilupparsi e approfondirsi).

In tutta la zona esaminata si riscontrano fratture orientate circa N110°, alcune delle quali caratterizzano l'intero versante, estendendosi

fino all'altezza della strada Statale sottostante. Queste fratture, procedendo verso il versante, determinano un aumento del grado di fratturazione, che interferendo con il clivaggio presente sugli strati calcarei, determina la formazione di geometrie a sviluppo prevalentemente verticale che possono generare fenomeni di instabilità per ribaltamento .

Il momento ribaltante viene favorito da:

- gravità;
- presenza di apparati radicali che si sviluppano lungo molte di queste fratture.

Di seguito vengono riportate alcune immagini delle fratture beanti dette trincee, presenti sul ciglio della parete. La posizione di tali immagini viene riportata nel rilievo *hillshade* di Figura 24.

Trincee presenti sul ciglio della parete:



Figura 25 - Zona 1: (in senso orario) visione della frattura beante che divide il blocco (stop1, capitolo 6) con il piano di scivolamento sullo sfondo; avvallamento parallelo al medesimo piano; scarpate tettoniche gravitative di

cui la maggiore rappresenta la prosecuzione del piano di scivolamento verso nord.

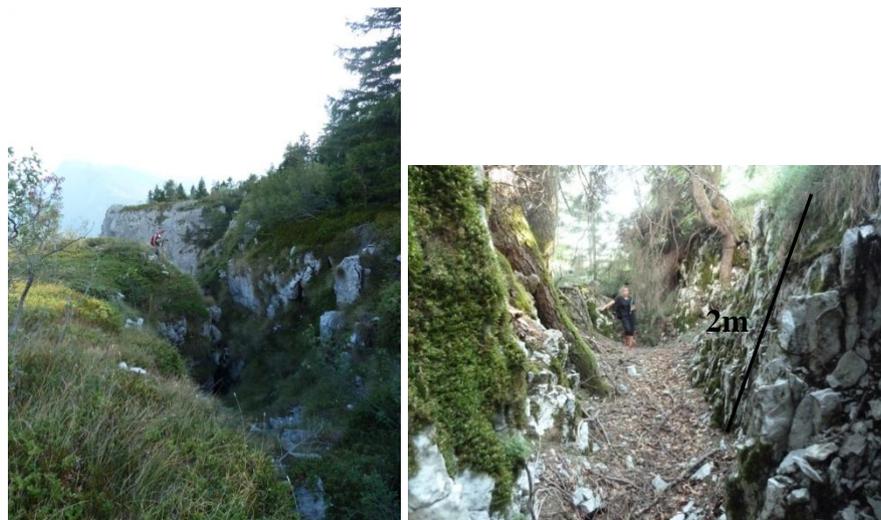


Figura 26 – Zona 2: trincee orientate secondo la direttrice NW-SE, persistenti per più di 15-20 m: la prima (sinistra) a 10 m dal ciglio è profonda 20-30 m, la seconda (destra) a 10 m dallo stesso è profonda 2 m in superficie ma probabilmente prosegue nel terreno.



Figura 27 - Zona 3: trincea posta nel bosco con direzione circa N-S, persistente fino alla valletta che segna il confine nord dell'area di studio. Viene evidenziato un masso alto circa 2,5m posto in prossimità della conclusione della frattura beante.

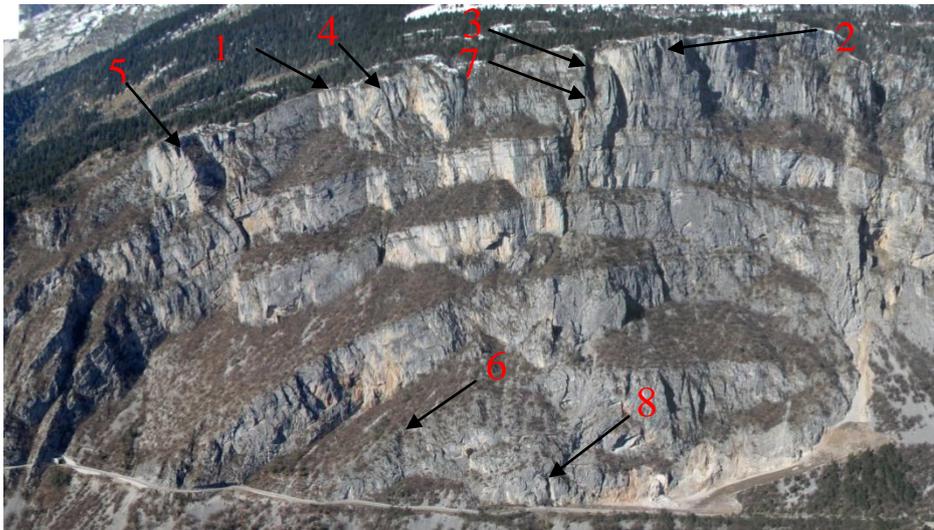
### **Criticità della parete orientale del monte Prada**

Il rilevamento in remoto e in sito della parete hanno permesso di osservare alcune situazioni pericolose in termini di stabilità dell'ammasso roccioso. In alcuni casi si tratta di instabilità causate da

scivolamento planare, altre volte da ribaltamento e da scorrimento di depositi rimasti sul versante.

Le caratteristiche strutturali influenzano in maniera rilevante il grado di instabilità dei blocchi di roccia dell'ammasso. La presenza di zone costituite da un elevato clivaggio porta l'ammasso a scomporsi in blocchi di varie volumetrie, talvolta isolati ed instabili, definite dal rilievo geomeccanico (capitolo 5). Tali volumi riguardano intervalli dai 2 mc ai 200 mc.

Nella panoramica di Figura 1 vengono riportate le posizioni di tali situazioni critiche.



*Figura 28 - Panoramica della parete in studio con localizzazione delle situazioni critiche di stabilità.*



*Figura 29 – Criticità nr. 1. Blocco di grandi dimensioni suddiviso in due blocchi da fratture beanti e da un piano di scivolamento sul quale si abbassato in tempi passati.*



*Figura 30 - Criticità nr. 2. Vista da sud di un blocco di grandi dimensioni, suddiviso da una frattura maggiore a sinistra ed una minore in centro. L'immagine in dettaglio, riguardante un ingrandimento della parte destra, evidenzia le superfici più chiare e giallastre in quanto soggette a crollo recente, legato peraltro ad un grado di fratturazione maggiore.*

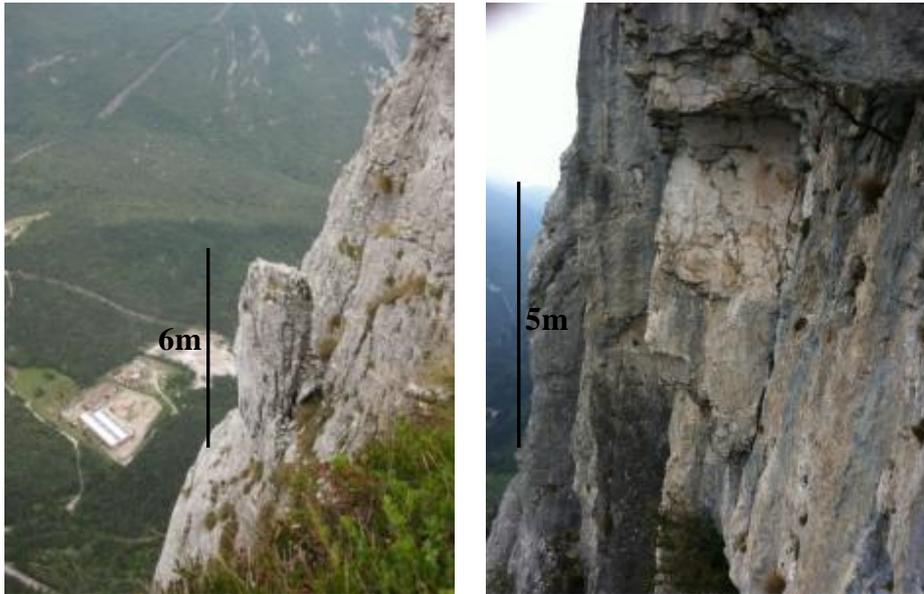


Figura 31 - Criticità nr. 3 e 4 (da sinistra a destra): blocco di forma tabulare in equilibrio precario; blocco prismatico isolato da tutte le parti tranne che verso l'alto. Si osservi il grado di fratturazione cui sono soggetti entrambi.

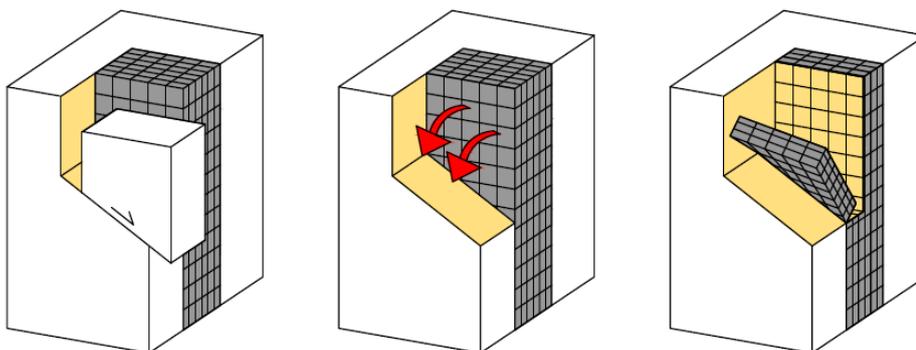


Figura 32 - Criticità nr. 5 (vista da sud) con il dettaglio (a destra) e la

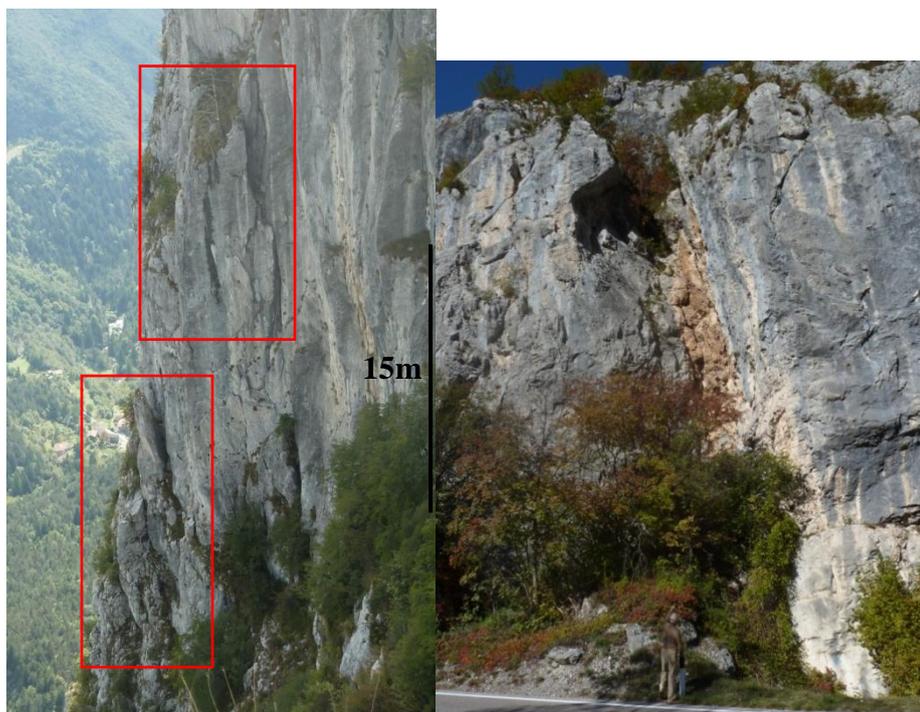
*relativa rappresentazione schematica. Vengono distinti i processi di scivolamento (sliding) e di ribaltamento (toppling), la porzione rocciosa soggetta a clivaggio pervasivo disposto circa WNW-ESE e le superfici “fresche” giallastre.*



*Figura 33 - Criticità nr.5 (vista da sotto): blocco prismatico parzialmente isolato in una zona soggetta a clivaggio verticale persistente disposto ortogonalmente alla parete.*



*Figura 34 - Criticità nr. 6: massa instabile di 2-3 m<sup>3</sup> poggiato su un piano roccioso liscio inclinato di 20-30° localizzato sulla rampa tra la zona I e la zona II (Tavola G6), appena sopra la ss 421.*



*Figura 35 - Criticità nr. 7 e 8: (a sinistra) serie di pilastrini isolati per gran parte; (a destra) frattura di origine tettonica posta in prossimità della strada dalla quale si originano frequenti crolli, alla base della quale si prevede di realizzare una struttura in terra armata o CLS per intercettare le traiettorie.*

Le situazioni critiche nr. 1 e 7 sono state prese in esame nel capitolo 6 al fine di stimarne la stabilità mediante l'uso del software SLIDE 6.0.

Di seguito in Figura 36 vengono riportati a titolo di esempio alcune evidenze di recenti eventi di crollo. Il primo riguarda uno dei vari massi caduti dal tetto di un incavo posto alla base della parete (zona III in Tavola G6) e successivamente in condizione stabile. Si osserva che su tale masso è presente uno spit in ottime condizioni (punto di ancoraggio per l'arrampicata), segnale di distacco molto recente. Il secondo esempio riguarda il crollo di un masso bloccato dalle barriere paramassi di cui è evidente anche la posizione iniziale; questo evento risale ad un anno fa.

Il terzo esempio, visualizzato in Figura 37, riguarda un evento di crollo avvenuto il 28 gennaio 2004 da una parete rocciosa soprastante la strada statale. In quel periodo sono stati registrati altri crolli che hanno interessato la porzione medio - alta della parete. In questo caso si

trattava di tre massi di volume variabile da 0,9 a 1,5 mc i quali, rotolando fino alla base del versante, hanno danneggiato gravemente una barriera paramassi esistente, hanno attraversato la sede stradale e si sono arrestati lungo il ripido versante sottostante la carreggiata.



*Figura 36 - Esempi di recenti eventi di frana. a. Masso di circa 5 mc con attaccato ancora uno spit da arrampicata. b. Esempio di crollo di un masso dal volume di circa mezzo mc, diretto verso la strada statale appena fuori dalla galleria ma bloccato dalla barriera paramassi; viene evidenziata anche la relativa zona sorgente.*



*Figura 37 – Evento di frana del 28 gennaio 2004: si evidenziano la nicchia in panoramica, nel dettaglio e la barriera danneggiata.*

## **4.3 Analisi geologica - strutturale**

### **4.3.1 Geologia**

Nel corso dei rilievi sono state osservate tutte le litologie presentate nel capitolo, tuttavia non sono stati distinti i limiti di tali formazioni. L'unica formazione affiorante sulla parte studiata della parete est del

monte Prada è il Calcarea oolitico di Massone (Figura 38). Il rilievo ha confermato quanto scritto in precedenza (APAT, 2005), infatti sono presenti bancate grigio-chiare di tale litologia molto spesse (anche di 30 metri).



*Figura 38 - Affioramento del Calcarea oolitico di Massone nei pressi del ciglio meridionale della parete.*

Attraverso le informazioni bibliografiche (APAT, 2005) e le osservazioni effettuate, è stato possibile redarre una carta geologica, riportata in allegato in Tavola G4 della parete in studio. In essa vengono distinti i seguenti fattori.

- Morfostrutture poste in prossimità del ciglio della parete;
- Piega anticlinale con asse variabile da NE-SW a E-W;
- Aree interessate da intensa fratturazione;
- Unità di piattaforma giurassica: Calcarea oolitico di Massone
- Depositi quaternari:
  - detrito di versante con spessori limitati, al tetto del substrato roccioso,
  - detrito grossolano, presente prevalentemente (alla base di profonde spaccature o collettori)
  - detrito di versante indifferenziato

- Elementi di natura antropica: area di cava, la strada statale ed il tomo che le separa.

I limiti tra i vari depositi sul pendio rispecchiano quelli adottati per la redazione della carta dell'uso del suolo (Tavola G3), quale passo fondamentale per effettuare le simulazioni numeriche di caduta massi.

## **4.3.2 Analisi Laser Scanner Terrestre**

### **4.3.2.1 Cenni teorici**

Sono considerati scanner 3D tutti quelli strumenti in grado di acquisire coordinate spaziali di una data regione o della superficie di un oggetto in modo automatico, sistematico e con un'alta velocità.

Il principio su cui si basano le differenti tipologie di laser scanner può essere sintetizzato nella proiezione di un raggio di un fascio di luce o di un pattern sull'oggetto e nell'analisi del segnale di ritorno.

Lo strumento viene definito scanner poiché l'acquisizione avviene secondo specifici criteri di organizzazione dei dati raccolti analoghi a quelli degli strumenti di scansione tradizionali. Tali criteri possono essere riassunti nella capacità di operare in modo automatico e sistematico nella velocità di acquisizione (fino a migliaia di punti al secondo) e nella possibilità di avere accesso ai dati in tempo reale.

La scelta dello strumento da utilizzare dipende dalle esigenze di rilevamento, in quanto nessuna tipologia di laser scanner soddisfa tutte le seguenti esigenze: accuratezza di misura, distanza, modalità di acquisizione e risoluzione della nuvola di punti (Sgregonzoli & Vassena, 2007).

I laser scanner terrestri (TLS) utilizzati per operazioni di mappatura e modellazione possono essere applicati da postazioni statiche (o stazionari) oppure dinamiche (o mobili). Il primo è sua volta suddiviso in 3 categorie in funzione della distanza di acquisizione: corto, medio e lungo range (Shan & Toth, 2009).

Il modello di laser scanner adottato per il rilievo della parete est del monte Prada fa parte della terza categoria.

Per informazioni dettagliate sul Laser Scanner si rimanda ai lavori di Shan & Toth (2009) e di Sgreganzoli & Vassena (2007).

### **Uso del Laser Scanner Terrestre:**

Il Laser Scanner Terrestre viene usato per varie applicazioni, alcune delle quali ne vengono di seguito riportate.

- Analisi “stratigrafica” (Franceschi et al., 2009)
- Calcolo del campo deformazionale (Teza et al., 2008; Viero et al., 2010)
- Mappatura della potenziali zone di distacco (Dorfmann et al., 2006; Piacentini & Strada, 2006 ).

L'utilizzo di tecniche laserscanning terrestri per l'analisi geomeccanica di ammassi rocciosi 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 mediante le analisi cinematiche alla base della metodologia, applicando il cosiddetto Test di Matheson (Matheson, 1983).

Tale metodo risulta infatti utile per fornire un'indicazione qualitativa della stabilità dell'ammasso rispetto ad uno o più piani di discontinuità in funzione del loro orientamento reciproco rispetto al versante. Il modello utilizzato si basa sulla valutazione, per tutte le giaciture riconosciute, delle condizioni strutturali necessarie per lo sviluppo dei meccanismi di rottura per scivolamento planare o a cuneo. A seconda dei casi, le condizioni da verificare sono le seguenti:

- cinematismi di instabilità lungo superfici planari:
  - l'immersione della superficie di potenziale scivolamento deve essere di circa  $\pm 20^\circ$  rispetto all'immersione del pendio;

- l'inclinazione della discontinuità deve essere minore dell'inclinazione del pendio o la potenziale superficie di scivolamento deve affiorare sul pendio;
  - l'inclinazione della discontinuità deve essere maggiore dell'angolo di attrito della superficie della discontinuità stessa.
- cinematismi di rottura a cuneo:
- la direzione della linea d'intersezione deve approssimare la direzione del versante;
  - l'inclinazione della linea d'intersezione deve essere minore dell'inclinazione del versante;
  - l'inclinazione della linea di intersezione deve essere maggiore del valore dell'angolo di attrito della superficie di discontinuità.

#### **4.3.2.2 Caratteristiche dell'analisi effettuata con il Laser Scanner**

##### Metodologia del rilievo, strumentazione e geometria di acquisizione

Il rilievo in loco è stato eseguito il 02.01.2012 mediante l'utilizzo di un laser scanner terrestre Riegl 420i con portata di 1 km e dotato d'inclinometro interno assieme a due ricevitori GPS marca Ashtech con precisioni sub centimetrica.

Le stazioni di scansioni sono state pari a 7; sono state effettuate da diversi angolazioni per evitare che vi siano delle zone d'ombra caratterizzate da assenza di dati; complessivamente sono stati rilevati oltre 293.521.000 punti.

Modello **Riegl 420i:**

Caratteristiche	Descrizione
Portata massima	1200m
Precisione	tipica 1cm; massima 5mm
Velocità di scansione	12 punti/secondo
Campo visivo	80° x 360°
Acquisizione colore	Si, tramite fotocamera Nikon e obiettivi calibrati 14mm-28mm-50mm e 85mm
Applicazioni	Rilievo topografico, di pareti rocciose, stradale e cave

Tabella 5 - Caratteristiche del laser scanner terrestre

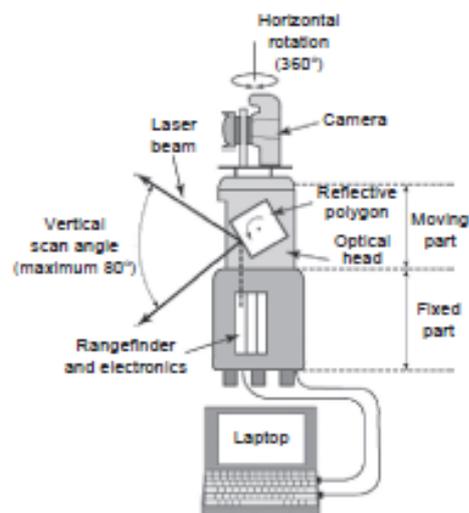


Figura 39 - Immagine del Laser Scanner Terrestre, posto sul versante opposto della valle, e della parete in studio; schema del funzionamento del Laser Scanner Riegl (Shan & Toth, 2009).

### Elaborazioni topografiche

Le nuvole di punti con coordinate 3D vengono georeferenziate e successivamente montate e rese un'unica immagine tridimensionale.

I dati raccolti dagli scanner sono stati filtrati per eliminare le ridondanze, il rumore e la vegetazione, fino ad arrivare ad una corretta definizione della morfologia del terreno.

Successivamente vengono classificati i punti scansionati relativi ad alberi, manufatti di piccola entità, cespugli ed altro. La “nuvola di punti scansionati” pulita, è stata sottoposta a triangolazione per ottenere un

DTM (Digital Terrain Model), utilizzato a livello topografico per la restituzione vettoriale della planimetria a curve di livello.

La restituzione delle sezioni sono state elaborate una ad una direttamente dalla nuvola di punti laserscanner e non dal DTM, ai fini di eliminare inevitabili errori dovuti alla triangolazione.

#### Rilievo ed elaborazioni geomorfologiche e geomeccaniche

Dal rilievo Laserscanner sono state rilevate le fratture e ricavate le informazioni relative all'immersione e all'inclinazione delle principali discontinuità e delle loro intersezioni. Tali informazioni sono state successivamente analizzate mediante l'ausilio delle proiezione stereografiche.

L'insieme di dati geomeccanici raccolti vengono classificati secondo le principali famiglie di appartenenza e calcolata la distanza perpendicolare tra loro, quindi studiata la distribuzione delle distanze per il calcolo del VRU.

#### **4.3.2.3 Risultati**

L'elaborazione dei dati ottenuti attraverso le diverse modalità di rilievo sopra nominate, sono state restituiti mediante elaborati grafici in formato .dxf gestibile attraverso un normale personal computer con applicativi CAD.

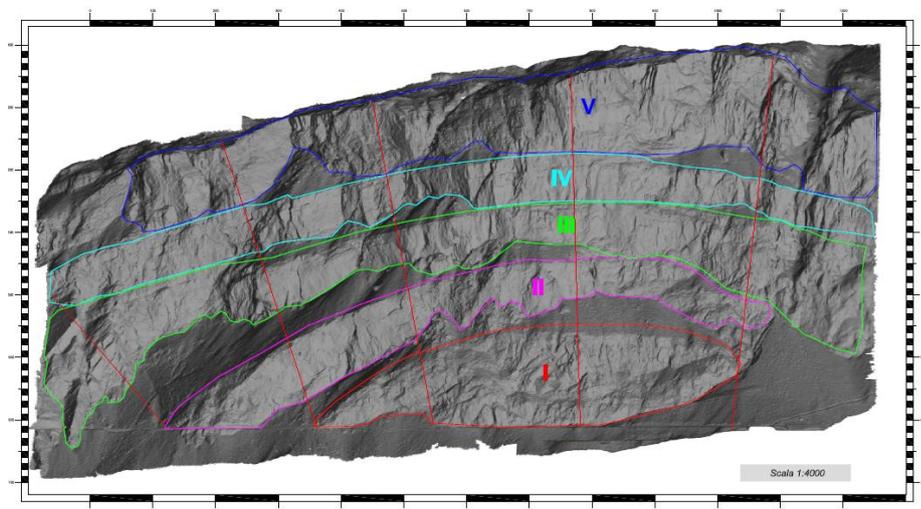
Sono state impaginate 14 tavole complessivamente con i seguenti elaborati:

- corografia 1:10000;
- planimetria a curve di livello 1:1000;
- prospetto frontale 1:2000;
- vista ortogonale 1:2000;
- anaglifo 3D Color e grigio;

- nr. 23 sezioni 1:2000;
- diagramma polare e tabelle delle spazature dell'area suddivisa in cinque zone (Tavola G6).

Successivamente tali zone sono state divise ulteriormente dal sottoscritto al fine di ottenere le variazioni locali delle orientazioni dei piani di discontinuità.

Successivamente, ogni zona è stata suddivisa in sub-zone, con lo scopo di osservare le variabilità locali dell'orientazione delle discontinuità sulla parete alla meso-scala. Infatti, come si nota dalla Figura 40, ogni zona copre all'incirca 150-200 m in lunghezza.



*Figura 40 - Rilievo morfologico della parete alla scala 1 : 4000 con suddivisione in zone (I, II, III, IV, V) e sub-zone, (1, 2, 3, 4, 5) posto in un piano cartesiano 2D avente in ascissa la distanza relativa y ed in ordinata la quota reale z.*

Per la nomenclatura delle sub-zone è stato scelto di mantenere il suffisso con numeri romani (I, II, ..., V) applicato nell'estrapolazione diretta dal rilievo Laserscanner e poi di aggiungere il numero latino corrispettivo (1, 2, ..., 6).

Tale suddivisione ha reso necessaria l'estrapolazione dei diversi valori giacitureali delle discontinuità a seconda della relativa posizione

spaziale ridotta al piano bidimensionale X (ascissa) – Z (ordinata), permettendo la creazione di rappresentazioni stereografiche, riportato in Tavola G5.

A causa del tipo di scelta adottata dal produttore del rilievo laser scanner per filtrare l'enorme mole di dati relativi alle discontinuità registrate sulla parete, in particolare di tipo soggettivo, vengono rappresentati 18 dei 23 settori. La Tavola G5 mostra gli stereogrammi estratti relativi all'orientazione dei piani di strato e frattura.

Influenza delle due pieghe sulle strutture attuali alla meso-scala:

in una configurazione teorica di semplice piega anticlinale mi aspetto di trovare fratture coniugate ad alto angolo ( $60^{\circ}$ - $70^{\circ}$ ) sulla zona dorsale della piega anticlinale, mentre fratture coniugate a basso angolo ( $25^{\circ}$ - $35^{\circ}$ ) in prossimità del nucleo della stessa (Figura 41). Tuttavia, a fronte della complessa evoluzione tettonica (capitolo 2), risulta difficile attribuire dei significati ragionevoli alle singole orientazioni locali dei piani di discontinuità.

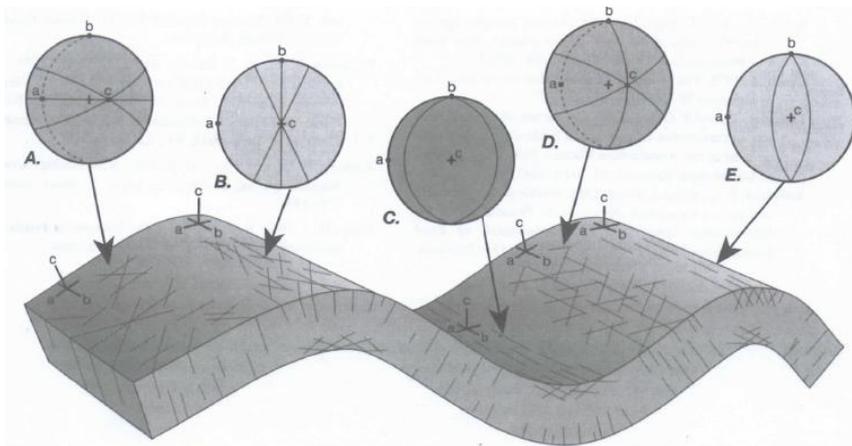


Figura 41 - Fratture associate a pieghe. Le proiezioni stereografiche mostrano l'orientazione dei piani di fratture e di strato (Twiss & Moores, 1992).

Vi è la presenza di piani di discontinuità orientati il più delle volte lungo la direttrice NW-SE, marcatamente nelle aree centrali della parete. In alcuni casi le fratture registrate per sub-zona sono limitate in quantità (anche in aree vistosamente fratturate), tendendo ad essere insufficiente per essere significative.

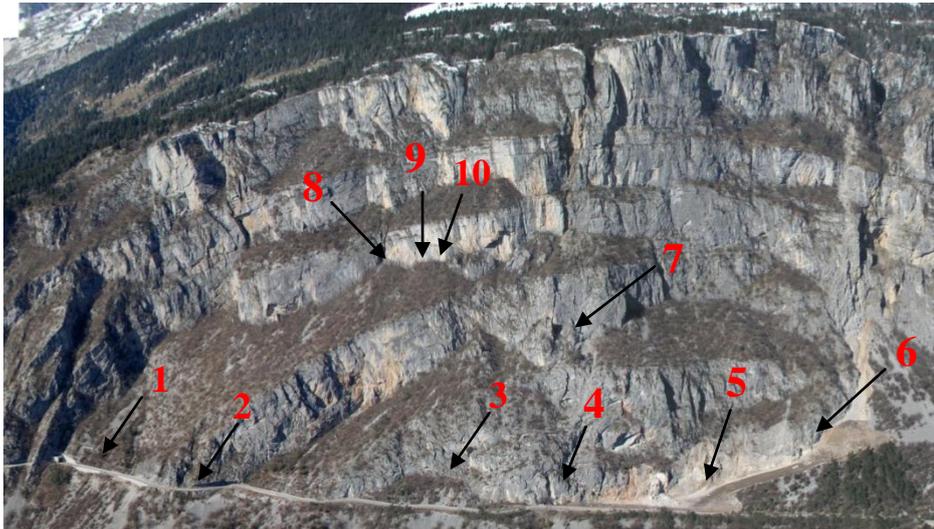
Una visione più sintetica, tuttavia qualitativa in quanto priva di valori giaciturali, viene data dalla rappresentazione di Tavola G5. Essa costituisce la ricerca rapida delle aree più ammalorate dal punto di vista della qualità dell'ammasso roccioso.

Evidentemente da questa visione spaziale non si apprezzano le aree più o meno fratturate, è necessario quindi, a tal fine, prendere in considerazione il rilievo tradizionale in sito, di seguito riportato. Queste direzioni rappresentano le direzioni che hanno controllato la morfologia a monte della parete (Pian di Froschera-M.Prada) e al bordo della stessa (Figura 24).

### **4.3.3 Analisi meso-strutturale**

Durante il rilevamento sono stati osservati vari elementi strutturali di notevole importanza. Per quanto riguarda la cinematica, sono stati individuate varie faglie sulla parete all'interno della cava ed in alcune parti a media parete, come conferma della tormentata evoluzione strutturale che ha subito quest'area. In particolare sono stati individuati movimenti trascorrenti sinistri e destri, thrust e transpressioni.

#### Alcuni elementi strutturali rilevanti



*Figura 42 - Panoramica della parete in studio con localizzazione degli elementi tettonici riportati in seguito.*

In prossimità della strada (Figura 43), gli affioramenti rocciosi sono caratterizzati da un grado di fratturazione molto sviluppato, infatti vi sono ancorate delle reti corticali.

In corrispondenza dell'accumulo detritico posto alla base della parete (zona 3), i piani di strato mostrano degli indicatori cinematici di tipo inverso, i quali evidenziano un probabile slittamento in fase di piega.



*Figura 43 – Elemento nr. 1 e 2: visione delle condizioni di intensa fratturazione dell'ammasso roccioso in prossimità della strada statale.*



*Figura 44 – Elemento nr.3: visione in grande ed in dettaglio del piano di strato riattivato come faglia inversa in prossimità del nucleo della piega anticlinale situato nella zona I con una porzione rocciosa fratturata instabile (in rosso).*

In prossimità della strada e dell'inizio della area di cava è presente una struttura "a fiore", probabilmente di tipo negativo - distensivo. Tale struttura deriverebbe da un fascio di faglie di tipo trascorrente destro. In Figura 45 e in Figura 46 sono riportati le foto e la schematizzazione.



Figura 45 – Elemento nr.4: struttura a fiore positiva o negativa alla base della parete, pochi metri a sud rispetto all'inizio dell'area di cava e del relativo tomo.

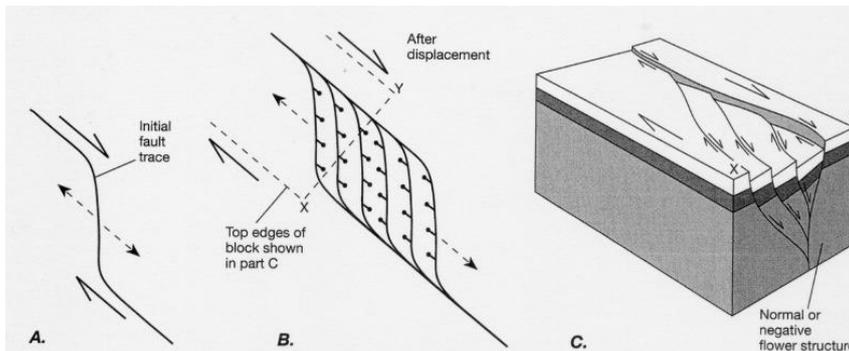
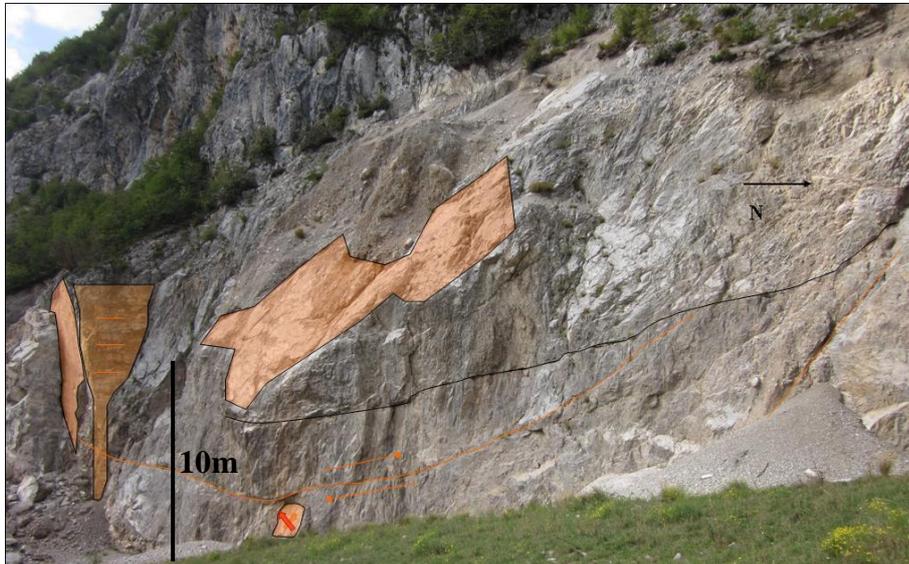


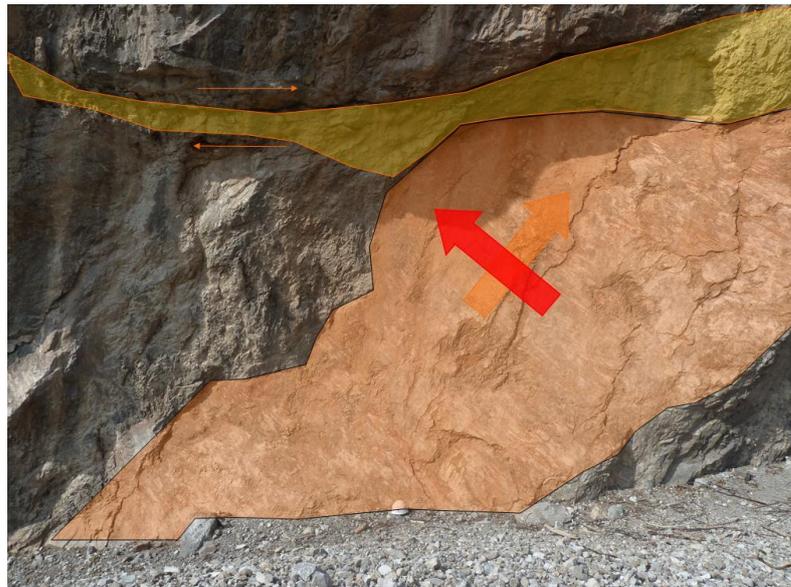
Figura 46 - formazione di un duplex estensionale in una fase distensiva. Le frecce maggiori indicano il senso dominante di shear in una zona di faglia; le frecce minori indicano il senso della componente normale e trascorrente in un dominio distensivo. A. Banda estensionale su faglia trascorrente destra. B. Duplex estensionale sviluppato dalla banda in A. C. Diagramma a blocchi mostra una struttura a fiore negativa normale nelle tre dimensioni, le cui facce rappresentano i piani verticali segnati in tratteggio in B (Twiss & Moores, 1992).

Di seguito viene mostrata parte dell'area di cava, la quale è caratterizzata da un insieme di elementi tettonici sovrapposti, quale indicatore della complessa evoluzione polifasica subita. Infatti, oltre a rappresentare la zona di nucleo dell'anticlinale avente asse orientato E-

W ed in vicinanza anche di quella con asse N-S, è prospiciente alla importante linea di Molveno Ovest (capitolo 2). La Figura 47 evidenzia i piani di scivolamento - faglia verticali ed a  $50^\circ - 70^\circ$  con il materiale detritico prodotto, il piano di strato (in nero), una faglia inversa a basso angolo nord vergente e due faglie (con dettaglio mostrato in figura Figura 48).



*Figura 47 – Elemento nr.5: visione dell'area di cava con indicati i sistemi di faglia ed i cinematismi individuati. Vengono evidenziate faglie ad alto angolo W vergenti, faglie trascorrenti disposte E-W e sovrascorrimenti N vergente.*



*Figura 48 - Dettaglio della figura precedente, si evidenziano tre cinematismi in probabile cronologia: thrust diretto verso W (arancione), faglia traspressiva (rosso) e sovrascorrimento nord vergente con il materiale di riempimento (giallo).*



*Figura 49 - Elemento nr.6: faglie ad alto angolo che abbassano il piano di stratificazione di alcuni decimetri.*

Nella zona II, in prossimità del settore maggiormente fratturato disposto verticalmente, vi è la presenza di una importante faglia (Figura 50) caratterizzata da un cinematismo estensionale, definito come pull-apart. Essa è disposta secondo la direttrice ESE-WNW, in particolare la giacitura dei due piani di rottura è 023/75 e 214/68. La sua apertura è pari a circa 1 metro e il suo riempimento è costituito da un clivaggio centimetrico di roccia con giacitura variabile che segue quella della faglia.



*Figura 50 – Elemento nr.7: faglia estensionale ad alto angolo orientata circa E-W (definita come pull-apart) situata circa a metà parete in zona II con dettaglio del riempimento caratterizzato da un clivaggio centimetrico.*

Nella parte centro-meridionale della zona III c'è la presenza di un'insenatura (Figura 51a), visibile anche dal DTM, dalla quale scende una colata detritica che si espande nel ripiano sottostante. Tale incavo è a sua volta suddiviso in vallette minori caratterizzate da alcune faglie. I dettagli nelle Figura 51b e c mostrano dei cinematismi trascorrenti lungo

l'asse circa EW e NW-SE con della roccia clivata piegata nel primo caso.



*Figura 51 – Elemento nr.8: a. insenatura situata nella parte centro meridionale della zona III con due dettagli. b. piano di faglia trascorrente disposto circa NW-SE con parte del riempimento caratterizzato da un clivaggio piegato. c. frattura beante disposta circa NS con lineazioni da faglia trascorrente disposte NW-SE.*

Di seguito in Figura 52 viene riportato un esempio di una delle varie fasce cataclastiche presenti sulla parete. Esso è situato a pochi metri a nord della precedente insenatura. Viene evidenziata la presenza simultanea di due cinematismi, indicati dalla disposizione delle matite grigia e rossa, rispettivamente secondo la direttrice E-W e N-S.



*Figura 52 – Elemento nr.9: fascia rocciosa soggetta a clivaggio e cinematismi situata circa a metà della zona III. Le due matite indicano la direzione delle lineazioni presenti: quella grigia indica un senso W-E mentre quella rossa un senso circa N-S.*

Un'ulteriore esempio di zona danneggiata è riportato in Figura 53. Anche in questo caso la direzione della faglia segue la direttrice E-W, ma con la presenza di una patina di alterazione bianca costituita probabilmente da gesso.



*Figura 53 – Elemento nr. 10: insenatura (a sinistra) posta all'interno di una zona di faglia molto fratturata nella zona III centrale originata da una faglia trascorrente disposta circa E-W; relativo dettaglio del lato destro (guardando l'insenatura) della faglia trascorrente caratterizzato da alterazione gessosa bianca.*

## **Capitolo 5 Analisi geomeccanica**

### **5.1 Introduzione**

Lo scopo principale del rilievo geomeccanico, per i fini del presente studio è quello di fornire una stima del volume unitario dei blocchi, da utilizzare nelle analisi cinematiche da crollo, eseguite con software 3D dedicato e di indagare la qualità della matrice rocciosa per prevedere il comportamento meccanico durante un evento di crollo. Subordinatamente esso ha supportato anche una parametrizzazione dell'ammasso per i casi affrontati di verifica di stabilità con i metodi dell'equilibrio limite.

A supporto del rilievo geomeccanico tradizionale, si è provveduto alla realizzazione di una scansione laser dell'intera parete. Questa scansione ha fornito un modello tridimensionale, orientato ortogonalmente rispetto ai tradizionali modelli LiDAR, che ha permesso il riconoscimento di una serie di famiglie di discontinuità difficilmente rilevabili, in tempi brevi con le classiche tecniche di rilievo geomeccanico.

In Allegato A6 vengono riportati le grandezze caratteristiche relative ai piani riconosciuti, le proiezioni stereografiche relativi ad ogni settore e una tabella riassuntiva dei piani stessi. Una sintesi dei risultati verrà riportata, per completezza, anche nel prosieguo della relazione.

#### **5.1.1 Cenni teorici sulla geomeccanica**

Nella meccanica delle rocce, le valutazioni che rivestono maggiore importanza sono rivolte allo studio delle caratteristiche mesostrutturali che condizionano il comportamento di un ammasso roccioso fratturato.

Le equazioni relative ai criteri di seguito sintetizzati, cercano di combinare tra loro le componenti dello stato tensionale, separando le

condizioni accettabili da quelle non accettabili, cioè quelle che indicano uno stato limite al raggiungimento del quale l'ammasso roccioso si porta in condizioni di collasso. L'approccio più seguito tenta di descrivere il campo tensionale a rottura senza necessariamente indicare come avvenga la rottura e nella pratica due metodologie hanno ricevuto una larga applicazione: il criterio di rottura di Mohr – Coulomb ed il criterio di rottura di Hoek – Brown (Bruschi, 2004).

### 5.1.1.1 Caratterizzazione dell'ammasso roccioso

#### Criterio di Mohr – Coulomb

Tale criterio è basato sulla determinazione della relazione tra gli sforzi normale ( $\sigma_n$ ) e tangenziale o di taglio ( $\tau$ ) agenti sui piani dell'elemento roccioso, detta involuppo o curva di Mohr. Essi vengono posti su di un piano cartesiano rispettivamente in ascissa ed in ordinata e, mediante la costruzione del cerchio di Mohr, viene ricavato lo stato tensionale cui è soggetto l'elemento di roccia o terreno. L'involuppo di rottura deriva dal collegamento dei punti di tangenza dei cerchi rappresentativi della variabilità delle tensioni normale e di taglio, come riportato in Figura 54.

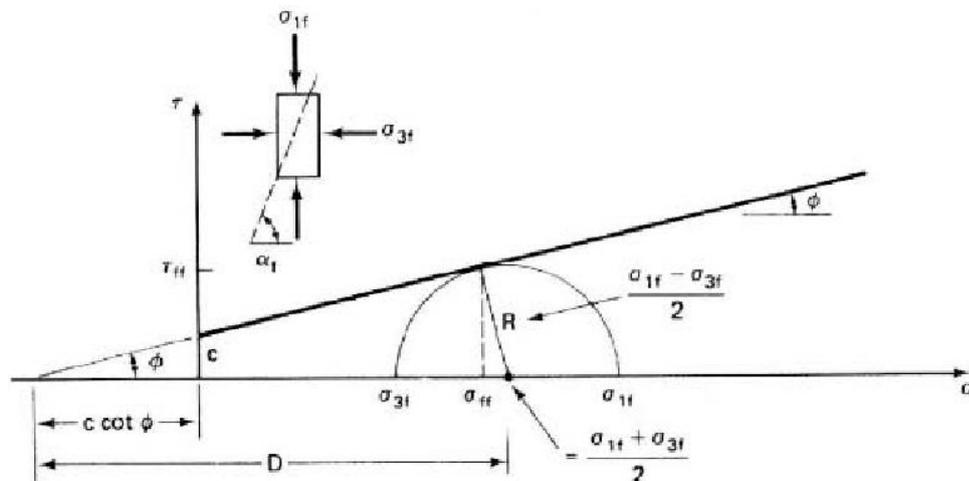


Figura 54 - Cerchio di Mohr che rappresenta il criterio di Mohr-Coulomb. Si distinguono l'angolo di rottura  $\alpha_f$  e l'angolo di attrito  $\phi$ .

Tale curva, quale combinazione critica delle tensioni principali, segue la seguente equazione detta legge di Mohr-Coulomb:

$$\tau = \sigma_n \operatorname{tg}\varphi + c$$

in cui  $c$  rappresenta una resistenza di coesione iniziale e graficamente l'intercetta della curva in ordinata;  $\varphi$  l'angolo d'attrito interno e graficamente la pendenza della retta rispetto l'ascissa.

Coulomb assume che la rottura avvenga quando la tensione di taglio massima raggiunge la resistenza al taglio intrinseca del materiale "c", funzione della tensione normale agente e della componente attrittiva del materiale stesso (Bruschi, 2004).

#### Criterio di Hoek – Brown

Tale criterio di rottura si basa sulle tensioni principali a rottura. In particolare si assume che la rottura in un ammasso roccioso sia controllata dagli spostamenti e rotazioni di blocchi di roccia immersi in un sistema pervasivo di fratture che le separa in un modo così caotico da attribuire all'ammasso la condizione di isotropia. L'equazione che descrive tale aspetto è la seguente:

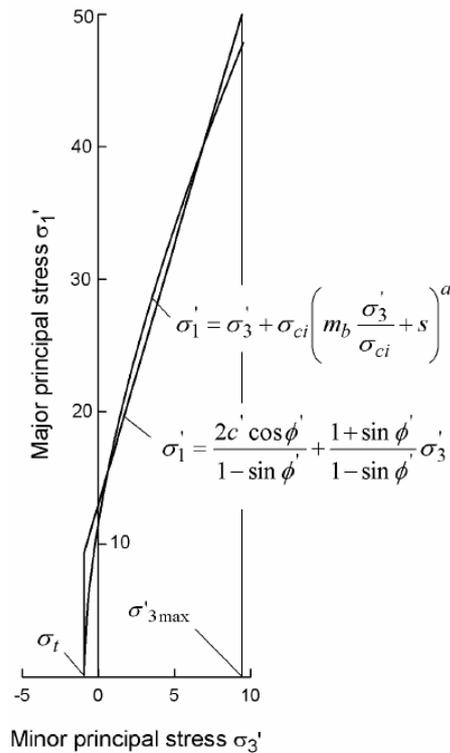
$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m \sigma_c \sigma_3 + s \sigma_c^2} \quad \text{in cui}$$

$\sigma_1$  e  $\sigma_3$  rappresentano le tensioni principali maggiore e minore a rottura;

$\sigma_c$  rappresenta la resistenza a compressione uni assiale della roccia intatta;

$s$  e  $m$  sono costanti empiriche adimensionali senza un preciso significato fisico, ma legate al suo assetto geologico e strutturale.

Il criterio di Hoek - Brown può essere rappresentato in un grafico in coordinate cartesiane (Figura 55), di seguito riportato (Hoek et al., 2002):



*Figura 55 – Grafico che rappresenta il criterio di Hoek-Brown, in ascissa è posta la tensione principale minore mentre in ordinata la tensione principale maggiore*

Tale criterio ha avuto uno sviluppo a partire dal 1980 anni fino agli anni 2000, si rimanda ai lavori di Marinos, Hoek e Brown ([www.rocscience.com](http://www.rocscience.com)) per una chiara e dettagliata spiegazione.

Tale criterio assume che il comportamento sia della roccia che dell'ammasso roccioso possa essere considerato isotropo e quindi può essere applicato solo allorché nell'ammasso roccioso vi sia un numero sufficiente di discontinuità ravvicinate, con identiche caratteristiche, e che la dimensione dei blocchi isolati dalle discontinuità sia sufficientemente piccolo relativamente alla dimensione del problema da analizzare (Figura 56).

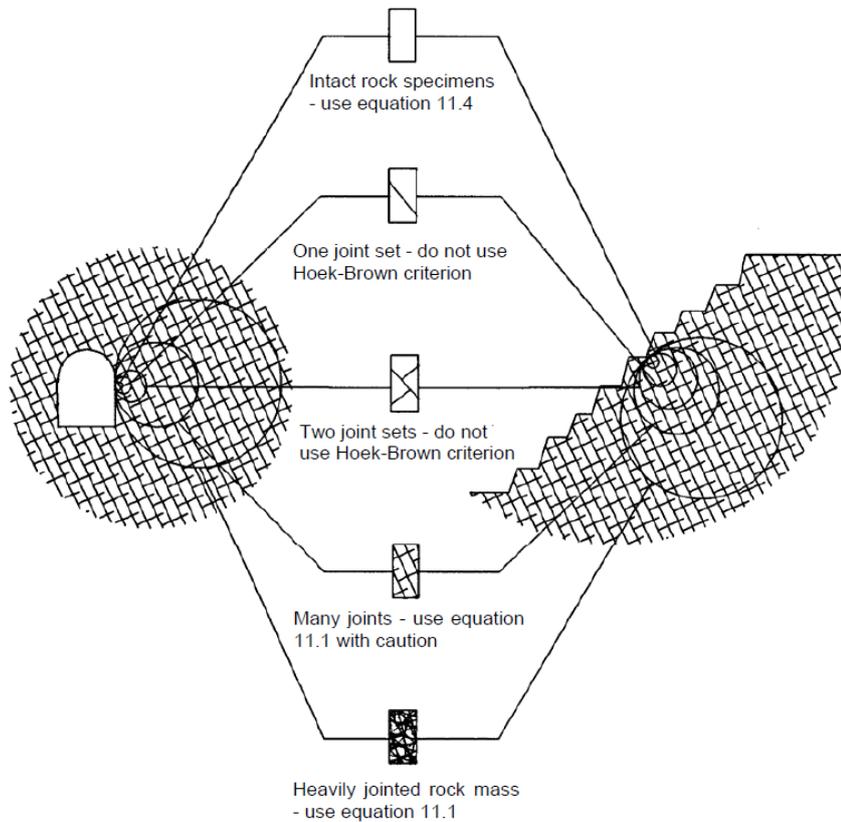


Figura 56 - applicabilità del criterio di rottura di Hoek-Brown attraverso il diagramma ideale mostra la transazione dall'ammasso roccioso fratturato a quello intatto al crescere delle dimensioni del campione (Hoek, 2000).

L'esame delle equazioni relative evidenzia che i parametri fondamentali che concorrono all'involuppo di rottura sono lo stato tensionale, la resistenza a compressione monoassiale della roccia intatta  $\sigma_c$ , il valore del Geological Strength Index (GSI) di seguito descritto e la costante  $m_i$  il cui valore è riferito alla roccia intatta (Hoek, ).

Per definire l'involuppo di rottura si preferisce adottare il criterio di rottura di Hoek - Brown piuttosto che quello di Mohr-Coulomb a causa dell'obbligatorietà di essere in possesso di molte prove triassiali; tuttavia quest'ultimo risulta efficace per rappresentare le condizioni di resistenza residua di un ammasso e le singole discontinuità nella roccia.

Nella pratica, l'uso del software rocklab (messo a disposizione nel sito [www.rocscience.com](http://www.rocscience.com) ) risulta molto utile per confrontare i valori adottati dal criterio di Hoek & Brown con quelli relativi al criterio di Mohr-Coulomb.

### 5.1.1.2 Caratterizzazione delle discontinuità

#### Modello di Patton

In alcune situazioni, la presenza di una o più discontinuità può influenzare di molto la stabilità di un versante. Pertanto viene di fondamentale importanza valutare le caratteristiche dei giunti che attraversano l'ammasso roccioso discontinuo.

Il modello di base è quello di Patton (1966), nel quale si mette in risalto l'influenza della asperità presenti sulle discontinuità sulla resistenza al taglio della stessa sotto un carico normale. Egli schematizza tali asperità attraverso dei denti, aventi inclinazione ( $i$ ) rispetto al piano di scivolamento principale. Così facendo, sotto una tensione normale ( $\sigma$ ) avviene lo scivolamento dei due blocchi sulle superfici dei denti, in funzione dell'angolo di attrito del materiale liscio  $\phi$ , ma se la tensione è sufficientemente elevata, avviene la rottura dei denti.

La relazione che governa il criterio di Patton è quindi la seguente:

$$\tau = \sigma \tan(\phi_b + i)$$

#### Modello di Barton Bandis

Allo scopo di facilitare la definizione del grado di rugosità, Barton (1973) ha proposto di sostituire l'angolo di asperità  $i$  con un parametro funzione del livello tensionale chiamato Joint Roughness Coefficient (JRC), giungendo al modello di Barton & Bandis:

$$\tau = \sigma \tan\left(\phi_b + JRC \log \frac{\sigma_c}{\sigma}\right) \quad \text{in cui}$$

$\sigma_c$  è la resistenza a compressione uni assiale (JCS)

Per la determinazione de valore di JCS è di comune pratica l'uso del martello di Schmidt. Esso, applicando una forza perpendicolare al giunto, deriva un coefficiente di rimbalzo, il quale, associato

all'orientazione della "martellata" stessa, permette la derivazione del valore di JCS attraverso delle tabelle di correlazione (Deere & Miller, 1966; Aydin & Basu, 2005).

Il valore dell'angolo di attrito di base dovrebbe essere determinato da prove di taglio eseguite su provini in roccia aventi superfici lisce, sottoponendo i provini ad una serie di tensioni normali tali da fornire un involuppo di rottura lineare con intercetta di coesione nulla. Tuttavia, in assenza di tali prove, è possibile ricavare una stima di  $\phi_b$  dalla tabella proposta da Barton relativa a molti tipi di roccia.

Per quanto riguarda la determinazione del valore del JRC, è di comune pratica l'uso del *pettine di Barton*. Tale strumento, attraverso il calco della rugosità del giunto secondo immersione e del confronto su dei profili standard, permette di assegnare un valore di JRC.

Gli autori hanno evidenziato la necessità di effettuare delle correzioni dei valori di JCS e di JRC in funzione della scala cui si fa riferimento, distinguendo la rugosità a grande scala da quella a piccola scala.

### **5.1.1.3 Classificazione dell'ammasso roccioso**

Nelle fasi preliminari del progetto di un'opera ingegneristica, sia esso relativo alla stabilità di un versante roccioso o alla stabilità di un'opera in sotterraneo, raramente si hanno informazioni dettagliate sulle caratteristiche di resistenza e di deformabilità dell'ammasso roccioso interessato da questa opera; diventa pertanto di considerevole importanza poter utilizzare uno o più schemi di classificazione (Bruschi, 2004).

Il metodo empirico, legato ai sistemi di classificazione, permette di risolvere i problemi legati alla scarsa conoscenza o esperienza di una zona.

I sistemi classificativi permettono di assegnare all'ammasso roccioso una classe di qualità e parametri meccanici caratteristici.

Le classificazioni tipicamente utilizzate sono di seguito elencati con i relativi autori.

- Rock Quality Designation (RQD) - Deere (1963).
- Rock Mass Rating (RMR) - Bieniawski (1976)
- Rock Tunneling Quality Index (sistema Q) – Barton (1974)
- Slope Mass Rating (SMR) – Romana (1985)
- Geological Strength Index (GSI) Hoek (1980) - Cai et al. (2004)
- Rock Mass index (RMi) - Palmstrom (1995)

Essi si differenziano per il fine per il quale sono stati ideati. Ad esempio i metodi del RMR, del Q e del RMi possono essere comparati nell'analisi di un ammasso roccioso posto in sotterraneo od a cielo aperto, tra i quali il terzo, ideato da Palmstrom, fornisce una migliore caratterizzazione nella discontinuità, in particolare nello studio della persistenza spaziale delle stesse.

Per la descrizione dettagliata di tali metodi si rimanda ai lavori dei rispettivi autori.

In questo lavoro di tesi, come accennato in precedenza, è stato adottato il metodo di analisi basato sulla determinazione del Geological Strength Index, dal punto di vista qualitativo e quantitativo, attraverso l'analisi dei parametri adottati dal sistema RMR, senza tuttavia giungere alle classi previste.

Il metodo del GSI è stato ideato e sviluppato negli anni 80-90 da E. Hoek e da altri autori (tra cui Corkum, Benissi, Kaiser, Marinos e Carranza-Torres) per poi venire considerato in maniera maggiormente quantitativa da Cai et al. nel 2004.

Il concetto su cui si basa il sistema ideato da Hoek è combinare l'assetto strutturale dell'ammasso con le caratteristiche delle discontinuità che lo separano, per arrivare ad un valore indice che permetta il suo utilizzo per una valutazione più accurata della resistenza

e della deformabilità di un ammasso roccioso. In particolare, ad oggi attraverso un grafico vengono correlati i parametri strutturali, come il grado di fratturazione e disturbo tettonico, con le caratteristiche della superficie della discontinuità, in termini di rugosità, alterazione e riempimento della frattura. Tra i vari lavori che descrivono questo criterio classificativo (Hoek et al., 1995; Marinos & Hoek, 2000; Hoek et al., 2002, etc..) vengono indicate le possibili situazioni per quanto riguarda gran parte delle litologie.

L'approccio adottato da Cai et al. (2004) nella definizione quantitativa del GSI, invece, si basa su un approccio più razionale e meno soggettivo di quello ideato da Hoek et al.. In particolare viene tenuto conto del lavoro di Palmstrom (1995), il quale definisce il volume unitario di un blocco di roccia isolato da un sistema di discontinuità e dalle condizioni delle discontinuità. Attribuendo inizialmente un carattere discontinuo ai giunti, quindi assumendo l'esistenza di ponti di roccia, il volume roccioso unitario apparente risulta essere maggiore di quello reale nei casi di ammassi soggetti a fratturazione non persistente. Pertanto, prendendo in considerazione le spazature e un fattore di persistenza relativi ai giunti ( $j_L$ ), viene derivato il valore del volume dei blocchi isolati ( $V_b$ ) ed in seguito viene definito il parametro  $j_C$  Joint condition attraverso la definizione dei parametri  $j_A$  e  $j_R$  rispettivamente l'indice di alterazione e di rugosità (macro e micro) dalle tabelle di Palmstrom (1995).

A questo punto Cai et al. hanno inserito questi due parametri nel diagramma di Hoek - Marinos, ottenendone quanto presente nella Figura 57:

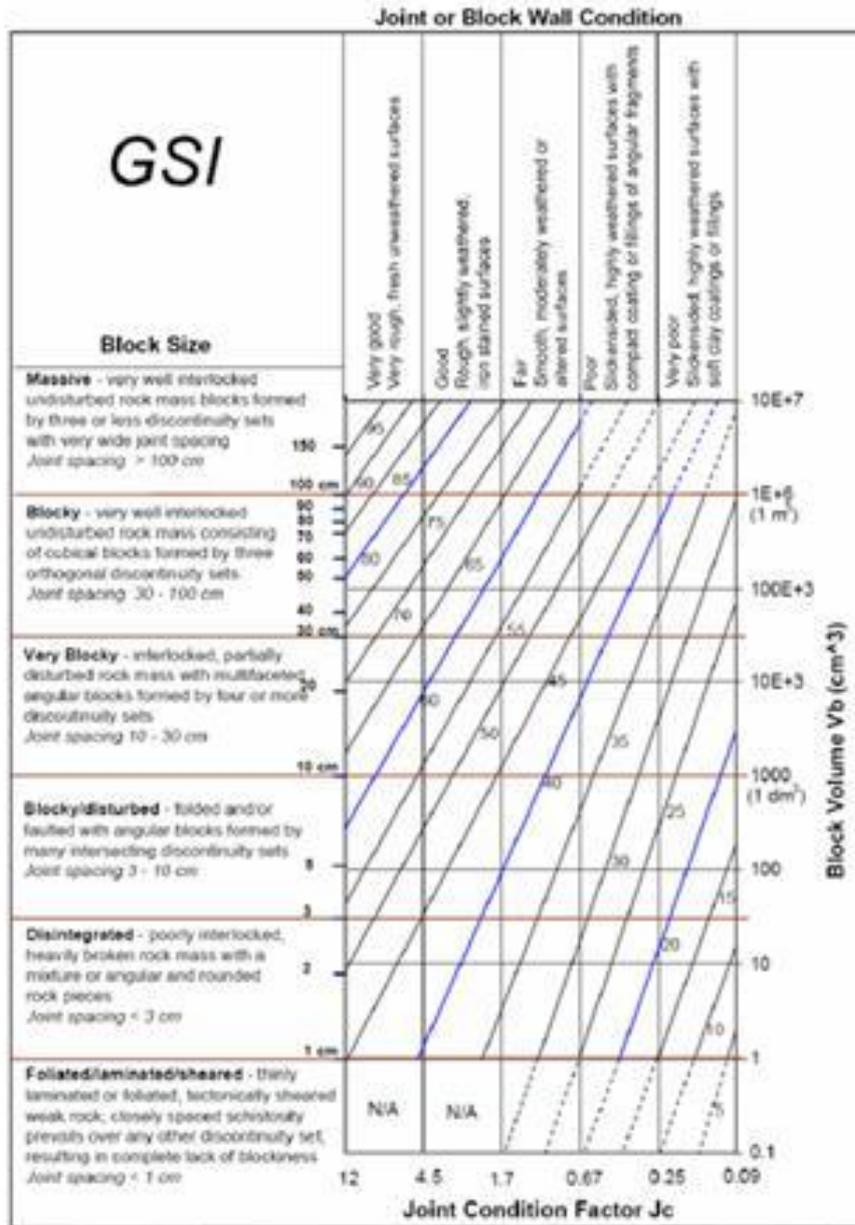


Figura 57 - Diagramma di Hoek-Marinos modificato da Cai et al. (2004). Viene evidenziata la presenza dei due parametri: block volume ( $V_b$ ) e joint condition factor ( $J_c$ ).

Un contributo nella determinazione del GSI, associato comunque al metodo di Palmstrom, viene fornito da Russo e Grasso (2006, 2009) i quali forniscono un'implementazione probabilistica dell'approccio quantitativo.

#### **5.1.1.4 Rilevamento di campagna**

Esistono due criteri fondamentali sui quali si può basare il censimento delle discontinuità (ISRM, 1978a,b):

- Criterio soggettivo secondo il quale vengono rilevate solo le discontinuità che sembrano svolgere un ruolo importante nei riguardi delle caratteristiche meccaniche dell'ammasso;
- Criterio oggettivo secondo il quale vengono campionate tutte le discontinuità che intersecano una certa linea di riferimento (linea di scansione) o che ricadono all'interno di una certa finestra.

Per i dettagli relativi ai criteri sui quali si fonda il rilievo di campagna geomeccanico si rimanda ai lavori di Bruschi (2005) e di Palmstrom (1995).

## **5.2 Rilievo geomeccanico**

Il rilievo geomeccanico è diviso in due parti: valutare l'analisi geomeccanica ottenuta dall'analisi con il Laser Scanner Terrestre e confermare tali valori mediante il rilievo in campagna in alcuni punti della parete e stima del volume unitario dei blocchi di roccia potenzialmente instabili.

La visione d'insieme dell'intero versante ha inoltre consentito di verificare la continuità spaziale delle orientazioni dei piani e delle fratture, fornendo una base attendibile su cui operare alcune considerazioni di stabilità per l'intero versante.

Per la definizione del volume unitario dei blocchi, sono stati raccolti, durante una serie di sopralluoghi in parete e in aree più accessibili nelle zone più basse della parete, una serie di misure di spaziatura tra i piani di discontinuità per giungere alla definizione dell'indice  $V_b$  (volume dei blocchi). Dalla scansione LASER scanner è

possibile definire una volumetria massima enucleabile, mentre il dettaglio riconosciuto in campagna ha fornito valide basi per teorizzare il comportamento cinematico durante il crollo.

I rilievi hanno consentito inoltre di contestualizzare l'assetto strutturale locale con quello regionale.

Le analisi visive eseguite sui cigli superiori, hanno consentito di individuare elementi con gradi di stabilità piuttosto varia, presentando volumi anche superiori ai 20-40 m<sup>3</sup>. Questi sono in genere costituiti da elementi colonnari e piastroni ad abito tabulare (capitolo 4), separati dalla parete attraverso piani di discontinuità paralleli alla parete stessa.

Pur con una certa variabilità giaciturale, è stato possibile riconoscere, in pressoché tutti i settori indagati, la presenza di piani di clivaggio subparalleli alla parete e aventi un' altissima frequenza e pervasività. La giacitura media di tali piani è 125/85, la spaziatura di circa 20-30 cm, ma spesso si trovano settori nei quali l'intervallo tra le discontinuità è dell'ordine dei pochi centimetri (Figura 58).



*Figura 58 - Zona soggetta a clivaggio persistente e orientato secondo la direttrice NW-SE in prossimità del ciglio della parete. Si osserva la spaziatura centimetrica tra le fratture.*

Ortogonalmente a questo, si riconosce un secondo sistema (k3) orientato circa NW-SE, con giacitura media 215/80. Questo sistema si presenta maggiormente spaziato rispetto al precedente, ma sempre molto pervasivo.

L'ultimo sistema riconosciuto, con metodi tradizionali di rilievo in tutto il versante è quello a basso angolo con una debole immersione SE, la giacitura media misurata è 110/10. La rappresentazione stereografica dei sistemi appena descritti è riportata in Figura 59. In entrambi i sistemi, le superfici appaiono in genere poco rugose, anche se l'azione erosiva delle acque meteoriche ne modifica lo stato originario, rendendole più articolate.

Molto frequenti risultano i piani di faglia, con giaciture variabili e indicatori cinematici che testimoniano in maniera inequivocabile, con la loro variabilità, l'articolata storia tenso - deformativa subita da queste rocce.

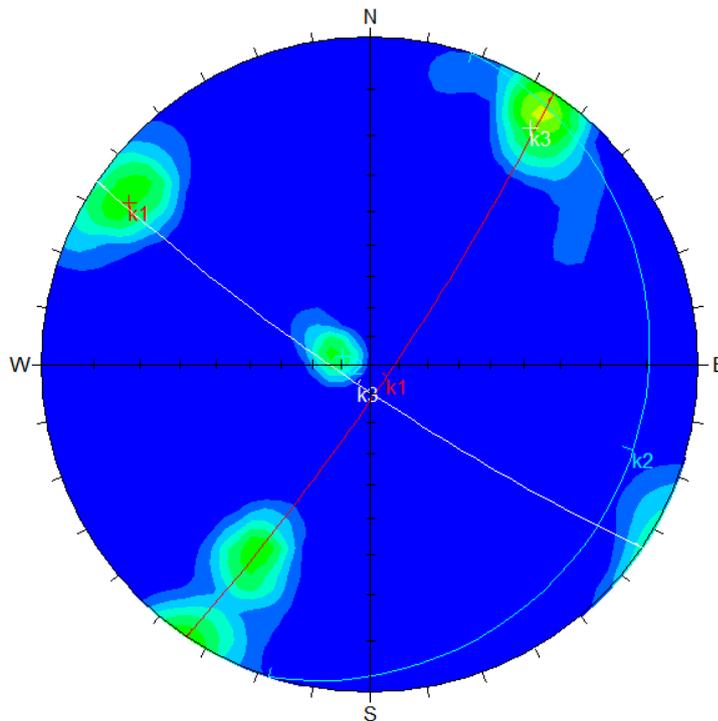


Figura 59 - Rappresentazione stereografica delle discontinuità rilevate in parete.

Come anticipato all'inizio di questo capitolo, a sussidio del rilievo geomeccanico tradizionale è stata eseguita una scansione LASER scanner dell'intera parete, per ottenere un modello digitale del terreno, orientato ortogonalmente rispetto ai modelli comunemente utilizzati.

Il nuovo modello, avendo una risoluzione centimetrica, consente il riconoscimento di una serie di piani e fratture e la loro orientazione spaziale.

La parete è stata inizialmente suddivisa in cinque settori, vedi Allegato A6, in ognuno dei quali è stata fatta un'analisi sui piani riconosciuti nel modello digitale che concordano con quanto rilevato in parete. Anche in questo caso si riconosce una certa dispersione nei valori. Inoltre l'analisi sistematica, eseguita al computer ha permesso di riconoscere una serie di famiglie di fratture, che nei sopralluoghi tradizionali venivano perse per l'impossibilità oggettiva di eseguire scan-line in parete.

La variabilità giaciturale riconosciuta nei rilievi tradizionali, emerge chiaramente anche dai dati estratti dal modello laser scanner, dal quale è possibile anche misurare le spaziature tra piani omologhi, appartenenti cioè alla stessa famiglia.

A titolo di esempio, in Figura 60 ed in Tabella 6 vengono riportati la rappresentazione stereografica delle orientazioni delle discontinuità estratte dal rilievo laser scanner per la zona I dell'Allegato A6.

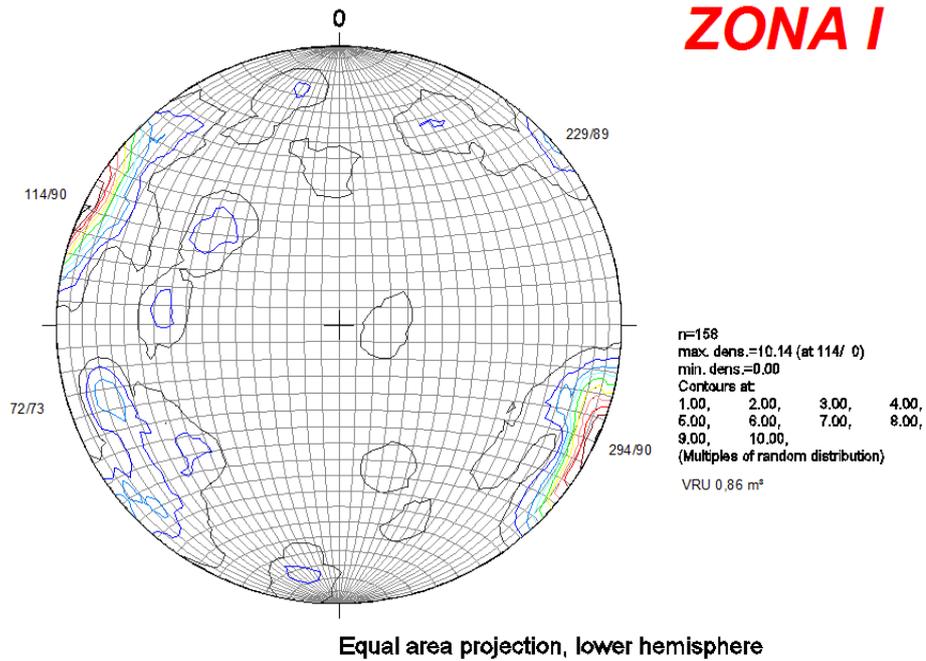


Figura 60 – Rappresentazione stereografica estratta dal software del Laser Scanner Terrestre, relativa alla zona I (Tavola A6).

Zona I				
Sistema	Piano	Spaz. min [m]	Spaz. max [m]	Spaz. media [m]
K1	304/87	0.55	1.63	1.07
	122/90	0.53	1.15	0.83
K3	37/90	0.1	3.53	1.30
	216/90	0.26	1.67	0.94
K5	174/40	0.77	3.18	1.78
	360/65	0.65	1.41	0.91

Tabella 6 – Valori giacitureali delle famiglie di discontinuità estratte dalla zona I con le relative spazature minime, massime e medie.

Dall'analisi delle spazature e dei sistemi di fratture si sono definiti anche i volumi unitari dei blocchi enucleabili per ogni settore.

Dall'analisi delle spazature e dei sistemi di fratture si sono definiti anche i volumi unitari medi dei blocchi enucleabili (VRU) per ogni settore.

Settore	VRU [m <sup>3</sup> ]
I	0.86
II	1.3
III	0.9
IV	0.85
V	0.5

*Tabella 7 – Valori medi dei volumi di roccia unitari (VRU) relativi alle cinque zone estratte della parete.*

E' ovvio che i volumi sopra riportati rappresentano un valore medio di ciò che è stato riconosciuto in ogni settore. Esiste perciò una variabilità locale, dovuta alla presenza di zone di maggior o minor fratturazione che si riflette nei volumi unitari dei blocchi.

### **5.3 Rilievo geomeccanico di campagna**

Il rilievo geomeccanico di campagna è stato caratterizzato inizialmente dall'analisi qualitativa degli affioramenti rocciosi mediante la documentazione fotografica e poi attraverso l'analisi geomeccanica tradizionale mediante linee di stendimento (scan-lines).

Sono stati seguite le indicazioni poste da Bruschi (2004) e dalle ISRM (1978), in particolare, per l'analisi delle discontinuità è stato adottato il criterio di Barton & Choubey, mentre per gli ammassi rocciosi per si è fatto uso del criterio di Hoek & Brown.

Sulla base dell'analisi strutturale effettuata vengono effettuate alcune linee di stendimento (scan-lines) dalle quali vengono ricavate delle stime della qualità dell'ammasso roccioso in alcune aree della parete in studio, la cui localizzazione è riportata di seguito in Figura 61



*Figura 61 - Panoramica della parete con localizzazione delle cinque scanlines eseguite.*

Di seguito in tabella vengono sintetizzate alcune informazioni relative alle scanlines (nr. riferito alla panoramica).

<b>Numero scanline</b>	<b>Lunghezza [m]</b>	<b>Direzione</b>	<b>Criterio</b>
1	6.40	N40W	Oggettivo
2	7.0	N	Oggettivo
3	6.5	N10W	Soggettivo
4	7.0	N	Soggettivo
5	12.4	N	Soggettivo

*Tabella 8 – Informazioni relative alle cinque scanlines eseguite. Vengono evidenziati la lunghezza, la direzione, il criterio adottato.*

A titolo di esempio, in Figura 62, vengono riportati la visione della scanline nr. 1.



Figura 62 – Immagine della scanline nr.1, presso l'area di cava.

Di seguito si riportano i risultati medi del rilievo geomeccanico tradizionale, eseguito in parete sulle porzioni di calcare oolitico di massone poco fratturato, dove si può considerare come modello costitutivo quello di Barton-Bandis.

discontinuità		persistenza (m)	spaziatura (m)	rugosità giunto	JRC	apertura (mm)	riempimento	condizioni idrauliche
K1	124/83	>10	0.05 - 0.25	leggermente ondulata	4 - 6	0 - 0.1	assente	asciutto
K3	215/80	>10	0.5 - 2	leggermente ondulata	4 - 6	0 - 0.1	assente	asciutto
sSt	110/10	50-010	1-5	Leggermente ondulata	2 - 4	0 - 1	assente	asciutto

Tabella 9 – sintesi dei valori ottenuti dall'analisi geomeccanica tradizionale. Vengono indicati le famiglie prevalenti, le giaciture, la persistenza, la spaziatura, la rugosità, il JRC, l'apertura, il riempimento e le condizioni idrauliche relativi al giunto.

Nelle zone in cui il materiale risulta maggiormente fratturato si può applicare il modello costitutivo di Hoek – Brown (Hoek et al., 2002). Per la caratterizzazione geomeccanica è stato utilizzato il Geological Strength Index (GSI) (Marinos & Hoek, 2000), implementato secondo le modifiche introdotte da Cai et al. (2004) più comodo e speditivo quando si è in presenza di un'area vasta come quella analizzata. In queste zone, i

piani di clivaggio hanno frequenza maggiore rispetto a zone a minor disturbo indotto dalle strutture, inoltre sono presenti una serie di piani, associati a faglie e/o superfici di svincolo strutturale che concorrono alla complessità generale dell'ammasso e di riflesso sulle caratteristiche geomeccaniche.

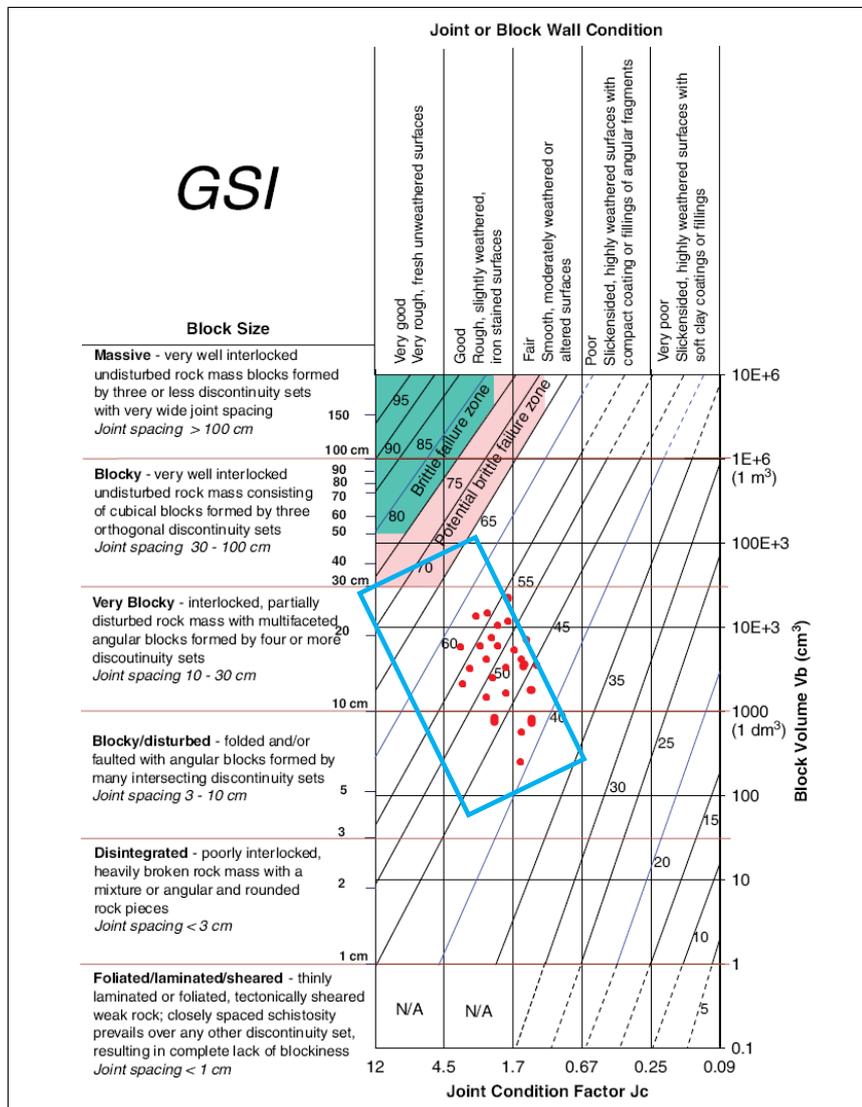


Figura 63 – Distribuzione dei valori di GSI sul diagramma di Cai et al. (2004) stimati per le porzioni rocciose maggiormente fratturate.

La descrizione appena fatta, sulla presenza di tre sistemi principali di fratture, unitamente a quella della loro spaziatura media e pervasività, permette di intuire il comportamento che una grossa massa ha durante un evento di crollo.

Da quanto appena descritto, siamo in presenza di una situazione predisponente allo svincolo di grossi volumi, soprattutto in prossimità dei cigli, che condizionati dalla distribuzione delle fratture-microfratture si possono ridurre in volumi inferiori in seguito agli impatti con le superfici suborizzontali presenti regolarmente lungo tutto il versante.

Le analisi sulle dimensionali dei blocchi presenti negli accumuli alla base delle pareti e nel detrito sottostante la strada, mostrano una nettissima predominanza di frammenti con diametri medi di 20-25 cm. Localmente sono stati rinvenuti blocchi con dimensioni maggiori che statisticamente si possono classificare come eventi rari.



*Figura 64 – masso intercettato dalle barriere con diametro di 50cm circa e volume pari a 0.125mc.*



*Figura 65 - Masso intercettato dalle reti con diametro di 60cm circa e volume pari a circa 0.18 mc.*

Sulla base di quanto appena descritto, dei volumi ottenuti con il rilievo LASER scanner e delle analisi sui frammenti misurati lungo il versante è stato possibile attribuire un volume unitario dei blocchi alle varie zone sorgenti.

Le differenziazioni volumetriche adottate nelle simulazioni riflettono le variabilità nel grado di fratturazione riscontrate in parete. Il volume massimo adottato di 1,2 m<sup>3</sup>, è superiore sia a quanto rilevato lungo il versante che a quello scaturito dalle analisi LASER scanner, tuttavia a favore della sicurezza.

## Capitolo 6 Analisi di stabilità

### 6.1 Introduzione

Scopo di questo capitolo è stimare l'attitudine al distacco di alcuni blocchi di roccia potenzialmente instabili presenti sulla parete in studio, i quali rappresentano le aree sorgenti (sources zones) dei massi simulati per mezzo del software Rockyfor3D, di cui si parlerà in seguito.

Da quanto visto nel capitolo 4, il fenomeno di caduta massi cui è soggetta la parete in questione, è ancora attivo. E' noto infatti, che in seguito ad ogni evento piovoso una quantità di detrito è presente sul manto della strada statale sottostante, tuttavia senza creare pericoli per il traffico veicolare, poiché si tratta di dimensioni inferiori a 15-20 cm di diametro. Al contrario, nella stagione primaverile si presentano degli eventi di crollo costituiti da blocchi di 0.10 – 0.30 metri cubi dalle porzioni inferiori della parete, arginati dalle barriere paramassi presenti.

Come visto nel capitolo 5, la stima delle condizioni di fratturazione (definite dal  $V_b$ , GSI, ecc..) dell'ammasso roccioso, ha lo scopo di stimare le potenzialità di disgregazione dei grossi blocchi (maggiori 10 metri cubi) posti nei settori medio-alti in blocchi di dimensioni minori. A fronte di ciò, in caso di caduta di blocchi di dimensioni importanti, qualsiasi tipo di opera di protezione non sarebbe sufficiente (escludendo la costruzione di gallerie); al contrario, blocchi di dimensioni minori potrebbero essere intercettati da opere dalle caratteristiche adeguate. Alla luce di tali ipotesi, diventa importante stimare quanto le condizioni osservate possano essere prossime o meno ad uno stato di criticità statica.

### 6.1.1 Aspetti geometrici della parete per l'instabilità

I precursori strutturali/tensionali che hanno determinato l'attuale orientazione/sviluppo della parete oggetto di studio si sono succeduti nelle diverse fasi sottoriportate:

- fase estensionale *giurassica*, la quale origina strutture parallele alla valle di Molveno, orientate secondo le direttrici NS e NNE-SSW, in questo caso la linea di Molveno (est vergente ad alto angolo, Figura 9);
- fase compressionale-collisionale *cenozoica*, la quale origina strutture costituite da clivaggi ortogonali o poco trasversali rispetto alle precedenti (Figura 58);
- fasi glaciazioni-declaciazioni *pleistoceniche* per le quali rispettivamente la parete subisce gli effetti di erosione e carico tensionale della massa di ghiaccio e successivo scarico tensionale, con apertura del pattern macrostrutturale preesistente e neoformazione di mesostrutture legate all'insorgenza di stati tensionali di taglio/trazione
- fase olocenica - attuale di azione del gelo-disgelo, con smantellamento progressivo della parete da ovest verso est, con formazione di pilastri e lastroni di roccia isolati in gran parte dalle parete.

In particolare si osserva che tali blocchi poggiano su superfici a franappoggio verso est ad alto angolo mentre, verso ovest, sono appoggiati su superfici verticali. Tali blocchi sono caratterizzati da una forma a lastroni - pilastri (vedi capitolo 5) con una geometria allungata secondo l'asse verticale. Il rapporto tra l'altezza e la larghezza al piede di tali blocchi (snellezza), influenza la stabilità degli stessi. Tale assetto diventa critico nel momento in cui l'elemento si disgiunge progressivamente dall'ammasso (roccia madre) gravando quindi sempre più sulla propria base. Da un punto di vista geomeccanico si determina progressivamente una condizione di carico in condizioni non confinate che determina, con entità variabile al variare del rapporto di snellezza,

condizioni di affaticamento nelle porzioni basali con insorgenza di neo microfratturazione e innesco di fenomeni di propagazione di macrofratture. Si verifica quindi che l'elemento pilastro va progressivamente in crisi sotto il proprio peso, in corrispondenza di una progressiva diminuzione della resistenza al taglio nelle porzioni basali che si traduce nell'insorgenza di una neo macrofrattura inclinata che, dalle porzioni più detensionate (esterno) si propaga secondo un angolo variabile, verso le porzioni più interne.



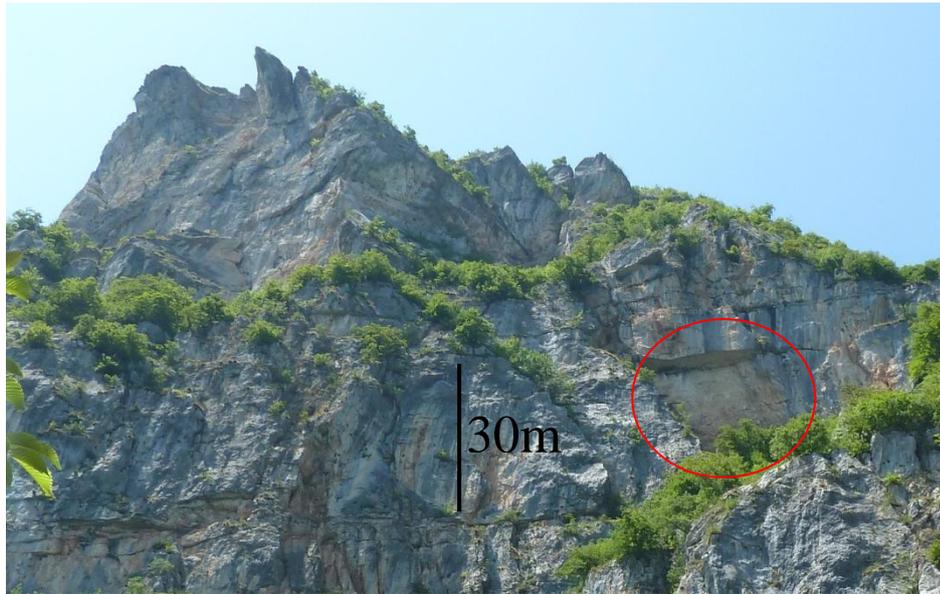
*Figura 66 – Esempio di associazione di superfici verticali e ad alto angolo nelle parti più chiare e rosee in quanto soggette a crolli recenti. Si tratta del lato est del blocco nr. 1 di Figura 29.*

Il concetto di snellezza dei blocchi è stato preso in considerazione anche da Cavers (1981), il quale considera critico il rapporto tra le

lunghezze relative alla lastra soggetta a flessione ed a quella totale per definire il fenomeno di buckling o instabilità flessionale. Successivamente Adhikary et al. (2000) hanno elaborato tale concetto, considerando la geometria della scarpata quale proprietà fondamentale e, attraverso una serie di assunzioni, hanno proposto un metodo grafico per ricavare il parametro di carico critico in funzione dell'inclinazione della scarpata e dell'angolo di attrito del giunto. Inoltre, confrontando le due equazioni relative all'altezza critica per *buckling* e quella per taglio, è possibile stimare quale dei due fenomeni sia più predisponente la rottura.

La qualità della roccia alla base di tali blocchi, unitamente ai rapporti geometrici del caso, influenzano quindi in modo notevole, la velocità di evoluzione tensionale del processo. Per mezzo del software SLIDE è stata stimata, per una configurazione geometrica tipo, la condizione critica di GSI per la quale si ha la formazione di una superficie di rottura. Il criterio di rottura assunto come riferimento è quello di HOEK (2000), implementato da Cai et al. (2004). Nel diagramma si riportano i due ambiti che individuano le due diverse configurazioni di ammasso roccioso in condizioni iniziali e di ammasso in condizioni di criticità.

I fenomeni di crollo riguardano, non solo il collasso di blocchi isolati da superfici verticali associate ad altre ad alto angolo (appena descritte), ma anche da prismi isolati da quest'ultime associate questa volta ai piani di stratificazione. Si tratta di eventi importanti e per fortuna rari, che riguardano volumi superiori ai 100 mc, per i quali vengono riportati due esempi in Figura 67 e . La condizione di stabilità dei blocchi in tali condizioni e potenzialmente instabili, non è stata analizzata in quanto essa necessita di informazioni puntuali geomeccaniche non disponibili e considerazioni sulle deformazioni del blocco rispetto al proprio peso.



*Figura 67 - Superficie rocciosa “fresca” (segnata in rosso) posta nella zona IV (Tavola G6) derivante da un evento di crollo di grandi dimensioni, in cui ha giocato un ruolo importante il piano di stratificazione. Per questa tipologia di crollo non è stata effettuata l’analisi di stabilità.*



*Figura 68 – Superficie rocciosa “fresca” (segnata in rosso) posta porzione settentrionale della nella zona IV della parete, derivante da uno o più eventi di crollo di grandi dimensioni. In questo caso si distinguono entrambi i tipi di rottura in cui concorrono, assieme alla superficie verticale, sia i piano di stratificazione che quello ad alto angolo.*

## 6.2 Cenni teorici sull'analisi di stabilità dei versanti

Le analisi di stabilità si applicano a pendii per stimare le condizioni di stabilità nelle condizioni naturali o per verificare la sostenibilità progettuale di interventi di stabilizzazione.

I metodi di analisi di stabilità si basano su un'impostazione fisico-matematica nella quale intervengono le forze stabilizzanti e destabilizzanti che agiscono sulla scarpata e che ne determinano il comportamento e le condizioni di equilibrio. Si possono suddividere in:

- metodi deterministici: note o ipotizzate le condizioni in cui si trova una scarpata, indicano quanto essa è stabile. Consistono nell'applicazione di leggi empiriche in modo da ricavare il grado di stabilità o il fattore di sicurezza della scarpata. Esistono due gruppi di metodi deterministici: quelli all'**equilibrio limite** e **tensio-deformativi**.
- Metodi probabilistici: valutano la probabilità di rottura di una scarpata in determinate condizioni.

La scelta del metodo di analisi più adeguato per ogni caso dipende dai seguenti fattori:

- caratteristiche geologiche e geomeccaniche dei materiali (terreni o ammassi rocciosi);
- i dati disponibili sulla scarpata e al contorno (geometrici, geologici, geomeccanici, ecc.);
- obiettivi dello studio, grado di dettaglio e risultati attesi.

### 6.2.1 Metodi all'equilibrio limite globale

I metodi all'equilibrio limite globale utilizzano l'equilibrio di una massa potenzialmente instabile e consistono nel calcolare lungo una determinata superficie di rottura il fattore di sicurezza (FS), cioè rapporto tra le forze resistenti e quelle destabilizzanti, così definito anche in termini di tensioni:

$$FS = \frac{\textit{Tensioni tangenziali resistenti}}{\textit{Tensioni tangenziali di scivolamento}}$$

Tali metodi si basano sui seguenti fattori:

- selezione di una superficie teorica di rottura nella scarpata;
- criterio di rottura di Mohr-Coulomb;
- definizione del fattore di sicurezza.

Poiché i problemi di stabilità sono staticamente indeterminati, per la loro soluzione è necessario assumere una serie di ipotesi, differenti a seconda del metodo utilizzato, che rappresentano dei limiti e distinte nei seguenti punti.

- La superficie di rottura deve essere definita da una geometria tale da consentire lo scivolamento, quindi assumendo uno scivolamento cinematicamente possibile.
- La distribuzione delle forze che agiscono sulla superficie di rottura potrà essere calcolata utilizzando dati noti.
- La resistenza si mobilita simultaneamente lungo tutto il piano di rottura.
- Il valore del coefficiente ottenuto si riferisce solo ad una fase del processo di sviluppo della rottura, trascurando così il fatto che la propagazione della superficie parte dal piede della scarpata e che delle deformazioni significative sono già avvenute prima dello sviluppo completo della rottura.

I metodi assumono rottura incipiente per un coefficiente di sicurezza FS pari a 1; esso può comunque essere influenzato da diverse variabili associate alla geologia dell'area di studio, ai parametri del materiale, alle condizioni della pressione nei pori dovute a circolazione d'acqua.

I metodi di analisi di stabilità all'equilibrio limite più utilizzati sono suddivisi in base alla considerazione che essi esprimono alle forze interconco.

I metodi più comunemente utilizzati sono i seguenti: Fellhenius (1927), Bishop (1955), Morgenstern & Price (1967), Spencer (1967), Sarma (1973), Jambu (1973).

Per le descrizioni dettagliate di tali metodi vengono indicati i relativi lavori degli stessi autori e quelli di Hoek & Bray (1991), Morgenstern (1991) e Eberhardt (2003).

Bruschi (2005) consiglia di adottare sempre metodi all'equilibrio limite rigorosi, come quelli di Spencer e di Morgenstern-Price; ad esempio il metodo di Jambu non si associa ad essi in quanto non soddisfa l'equilibrio dei momenti.

Uno degli aspetti più critici nelle analisi all'equilibrio limite è la determinazione dei parametri di resistenza al taglio mobilizzabili lungo una data superficie di rottura. Già Hoek & Bray (1974) avevano fornito un'indicazione sulle regioni di esistenza di vari tipi di condizioni tensionali all'interno di un grafico su cui sono posti in ascissa l'angolo d'attrito frizionale  $\phi$  e in ordinata la coesione  $c$ .

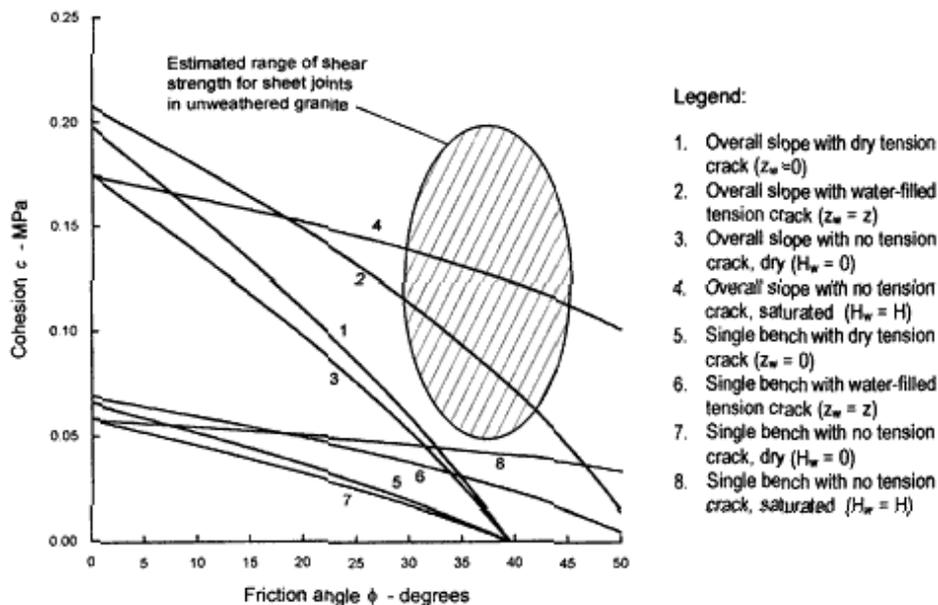


Figura 69 – Regione di esistenza di alcune condizioni tensionali all'interno di un grafico in cui in ascissa è posto l'angolo d'attrito frizionale  $\phi$  e in ordinata la coesione  $c$ . In particolare viene evidenziata l'area relativa ad una superficie piana di granito inalterata (Hoek & Bray, 1974)

### Effetto sismico

Un effetto sismico sottopone il pendio a forze d'inerzia che cambiano alternativamente di direzione molte volte durante l'evento stesso, poiché il terremoto è caratterizzato da un moto variabile la cui accelerazione è rappresentata da un accelerogramma. La verifica di stabilità di un pendio in condizioni sismiche, ha quindi come finalità la valutazione delle sollecitazioni causate dal sisma, alle quali si vanno a sovrapporre allo stato di sollecitazione preesistente dovute ai carichi permanenti (Tanzini, 2001).

Il problema dell'analisi di stabilità dei pendii in condizioni sismiche è generalmente affrontato con il *metodo pseudostatico* che consiste nell'assimilare l'azione sismica ad un sistema di forze di inerzia orizzontali, proporzionali all'accelerazione massima del terremoto atteso, ed agenti nel verso di maggiore instabilità. In particolare, l'azione sismica è rappresentata da un'azione statica equivalente, costante nello spazio e nel tempo, proporzionale al peso  $W$  del volume di terreno potenzialmente instabile. Tale forza dipende dalle caratteristiche del moto sismico atteso nel volume di terreno potenzialmente instabile e dalla capacità di tale volume di subire spostamenti senza significative riduzioni di resistenza. Nelle verifiche allo *stato limite ultimo*, in mancanza di studi specifici, le componenti orizzontale e verticale di tale forza possono esprimersi come  $F_h = k_h \cdot W$  ed  $F_v = k_v \cdot W$ , con  $k_h$  e  $k_v$  rispettivamente pari ai coefficienti sismici orizzontale e verticale (CSLP, 2008):

$$k_h = \beta_s \frac{a_{max}}{g} \quad ; \quad k_v = \pm \frac{k_v}{2} \quad \text{in cui}$$

$\beta_s$  = coefficiente di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito;

$a_{max}$  = accelerazione orizzontale massima attesa al sito;

$g$  = accelerazione di gravità.

In assenza di analisi specifiche della risposta sismica locale, l'accelerazione massima attesa al sito può essere valutata con la relazione seguente:

$$a_{max} = S * a_g = S_s * S_T * a_g \quad \text{in cui}$$

$S_s$  e  $S_T$  = coefficienti che comprendono l'effetto dell'amplificazione rispettivamente stratigrafica e topografica;

$a_g$  = accelerazione orizzontale massima attesa su sito di riferimento rigido.

La scelta del coefficiente sismico si basa normalmente su criteri empirici o su quanto indicato dalla normativa esistente anche se dovrebbe essere scelto in funzione della magnitudo del terremoto, della distanza ipocentrale e del tipo di terreno.

Adottando il metodo pseudostatico, la verifica delle condizioni di equilibrio di un pendio consiste nella ricerca della superficie critica e quindi del minimo valore del coefficiente di sicurezza per un prefissato valore del coefficiente sismico. Tale metodo ha tuttavia dei limiti, sintetizzati di seguito (Tanzini, 2001).

- La deformazione complessiva prodotta può non arrivare necessariamente a valori tali da causare il completo collasso del pendio, in quanto le forze applicate possono annullarsi nel caso in cui abbiano verso opposto. E' evidente che le deformazioni dovute ad un carico ciclico come quello causato da un sisma dipende dal tipo di sollecitazioni dinamiche (durata, forma e contenuto in frequenza dell'intero accelerogramma).
- Non viene considerata la possibile variazione della resistenza al taglio, legata in maniera proporzionale a alla pressione dei pori, nel caso di ammassi rocciosi molto fratturate o terreni.

Ad oggi, tale metodo viene considerato dalle norme NTC 2008, al fine di determinare l'azione sismica di progetto, di seguito applicata all'area di studio.

## 6.2.2 Definizione dell'azione sismica di progetto

La normativa prevede che venga valutata la “pericolosità sismica di base” in condizioni ideali di sito, i cui valori relativi alle aree interessate nazionali sono pubblicati sul sito <http://esse1.mi.ingv.it/>.

Le azioni di progetto vengono ricavate dalle accelerazioni  $a_g$  e dalle relative *forme spettrali*, definite su sito di riferimento rigido orizzontale (suolo di categoria A), in funzione dei tre parametri:

- $a_g$  = accelerazione orizzontale massima del terreno;
- $F_0$  = valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;
- $T^*C$  = periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

L'analisi geologica – geomorfologica della parete, associata alle prove geotecniche e geofisiche effettuate nella porzione di terreno-roccia in prossimità della strada statale (escluse dal presente lavoro di tesi), hanno permesso di distinguere due tipi di terreno, classificabili in base alla normativa come di seguito.

- Profilo stratigrafico **tipo A**: *ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi* caratterizzati da valori di  $V_{s,30}$  superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo di 3 m;
- Profilo stratigrafico **tipo C**: *depositi di terreni a grana grossa addensati o terreni a grana fina consistenti* con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di  $V_{s,30}$  compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero  $15 < N_{spt,30} < 50$  nei terreni a grana grossa e  $70 < c_{u,30} < 250$  kPa nei terreni a grana fina).

Le forme spettrali previste dalle NTC sono caratterizzate da prescelte vite di riferimento della costruzione  $V_R$  e probabilità di

superamento nella vita di riferimento  $P_{V_R}$  associate a ciascuno degli stati limite considerati.

A tal fine è conveniente utilizzare, come parametro caratterizzante la *pericolosità sismica*, il periodo di ritorno dell'azione sismica  $T_R$ , espresso in anni. Fissata la vita di riferimento  $V_R$ , i due parametri  $T_R$  e  $P_{V_R}$  sono immediatamente esprimibili, l'uno in funzione dell'altro, mediante la seguente espressione

$$T_R = - \frac{V_R}{\ln(1 - P_{V_R})}$$

In virtù di ciò, è possibile ricavare i valori di azione sismica di progetto per lo stato limite ultimi (SLU). A tal fine, il Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici ha messo a disposizione, sul proprio sito [www.cslp.it](http://www.cslp.it), il programma sperimentale "Spettri di risposta" che fornisce gli spettri di risposta rappresentativi delle componenti (orizzontali e verticale) delle azioni sismiche di progetto per il generico sito del territorio nazionale. Si tratta di un foglio di calcolo diviso in 3 fasi:

- 1) individuazione della pericolosità del sito;
- 2) scelta della strategia di progettazione;
- 3) determinazione dell'azione di progetto.

Pertanto, considerando i valori dei parametri di input, sono stati ottenuti i relativi risultati, espressi nella seguente Tabella 10.

<b>Parametri</b>	<b>Valori</b>
Comune	San Lorenzo in Banale
Zona sismica	4
Vita nominale dell'opera (opera infrastrutturale)	100 anni
Coefficiente d'uso	1
Stato Limite	SLV
Categoria sottosuolo	A
Categoria topografica	T1
Spettro di progetto	anelastico (SLU)

Accelerazione $a_g$	<b>0.087 g</b>
Coeff. di amplific. stratigrafica $S_s$	<b>1</b>
Coeff. di amplific. topografica $S_T$	<b>1</b>
Accelerazione massima $a_{max}$	<b>0.15</b>
Coeff. di rid. dell'accel. max attesa al sito $\beta_s$	<b>0.27</b>
<b>Coeff. sismico orizzontale <math>F_h</math></b>	<b>0.041</b>

*Tabella 10 – Parametri e risultati della modellazione per l'azione sismica di progetto dell'area di studio mediante il foglio di calcolo "Spettri di risposta".*

Dai valori ottenuti, mostrati in Tabella 10, si evidenzia un valore di coefficiente sismico orizzontale  $F_h$  pari a 0.041, da applicare nella simulazione di analisi di stabilità in presenza di sollecitazioni sismiche.

### **6.3 Modellazione di stabilità con il software SLIDE 6.0**

#### **6.3.1 Cenni teorici del software SLIDE**

SLIDE è un programma di stabilità all'equilibrio limite dei versanti 2D usato per la valutazione della stabilità rispetto a superfici di rottura circolari o non circolari in versanti rocciosi o di materiale incoerente. Il programma analizza quindi la stabilità di un ammasso usando i metodi dell'equilibrio limite secondo i seguenti criteri: Ordinario/ Fellenius, Bishop semplificato, Jambu semplificato, Jambu corretto, Spencer, Corps of Engineers1, Corps of engineers2, Lowe-Karafiath, GLE/Morgenstern-Price.

Possono essere analizzate le condizioni di equilibrio lungo singole superfici di scivolamento oppure possono essere applicati metodi di ricerca per localizzare la superficie critica. In seguito possono essere estratte analisi deterministiche (fattore di sicurezza) o probabilistiche (probabilità di rottura).

Il software SLIDE consiste in 3 programmi distinti:

- MODEL: programma di pre-processamento usato per inserire e modificare le caratteristiche geometriche, carichi eventuali e proprietà del materiale, le superfici di rottura definite del modello e salvare i file di input
- COMPUTE: motore dell'analisi all'equilibrio limite;
- INTERPRET: programma di post-processamento usato per visualizzare il risultato dell'analisi eseguita.

### **Procedura utilizzata**

Sulla base delle informazioni ricavate dal rilievo di campagna viene effettuata una scelta delle situazioni pericolose sulla parete rocciosa per le quali è possibile applicare un modello analisi di stabilità. Successivamente viene eseguito un modello geometrico a cui vengono assegnate le proprietà strutturali e geotecniche supposte. Eseguendo la simulazione si ottiene un valore del fattore di sicurezza. In seguito vengono variati i valori dei parametri in gioco allo scopo di definire la condizione critica e quindi capire quanto il modello supposto come reale sia lontano dalla condizione di collasso. Possono essere applicate anche analisi statistiche ai vari parametri.

Eventualmente possono essere aggiunte le seguenti variabili:

- definizione delle possibili o prestabilite superfici di rottura (failed surfaces) circolari o non circolari
- aggiunta di fratture tensionali (tension cracks)
- aggiunta di una eventuale "linea" di falda (water table)
- aggiunta di carichi (loads): puntuali, distribuiti
- aggiunta di carichi sismici orizzontali
- aggiunta di eventuali supporti (supports) presenti tiranti, chiodature, micropali, tessuto geotessile, ...

Sulla base dei risultati ottenuti dall'analisi di stabilità, vengono effettuate considerazioni sulla probabilità di accadimento di distacchi di blocchi di roccia di varie dimensioni da alcune aree della parete in

studio, le quali rappresentano le zone sorgenti (sources) in fase di simulazione di caduta massi, descritte nel capitolo 7.

### 6.3.2 Applicazione del software SLIDE 6.0 ad alcuni casi

Tra le varie situazioni esaminate, vengono in seguito riportati due casi nei quali si mettono in evidenza le caratteristiche geometriche e geomeccaniche. In particolare le situazioni critiche nr. 1 (caso 1) e 3 (caso 2), la cui localizzazione viene riportata in Figura 42.

I metodi di rottura considerati sono quelli di Jambu corretto, Spencer e Morgenstern & Price. Si è visto che i valori di FS dei tre metodi oscillano alla terza cifra decimale, pertanto il medesimo viene considerato fino alla seconda cifra decimale.

Per la localizzazione dei casi di studio si rimanda alle panoramica di Figura 28.

#### Caso 1



*Figura 70 - Vista da sud del grande blocco nell'area nominata Stop1. Si distinguono due fratture maggiori ed una minore in centro.*

In questo caso si ha un blocco roccioso di grandi dimensioni suddiviso in blocchi minori da alcune grandi fratture preesistenti: due maggiori ai lati ed una minore al centro. In tempi passati la frattura di sinistra ha costituito probabilmente il piano di scivolamento lungo il quale il blocco si è abbassato (si veda Capitolo 4).

Il criterio di rottura più adatto a rappresentare questa condizione geomeccanica è sicuramente quello di Barton & Bandis (capitolo 6.4.1).

### Caso 1a. Ammasso omogeneo costituito da 1 materiale: mat. 1

Inizialmente l'ammasso roccioso viene considerato omogeneo dal punto di vista geomeccanico, assegnando quindi un solo materiale al modello (mat. 1) oltre alla superficie di rottura (Figura 71). Ad essi vengono assegnati rispettivamente i valori relativi ai criteri di Hoek-Brown gen. e di Barton-Bandis.

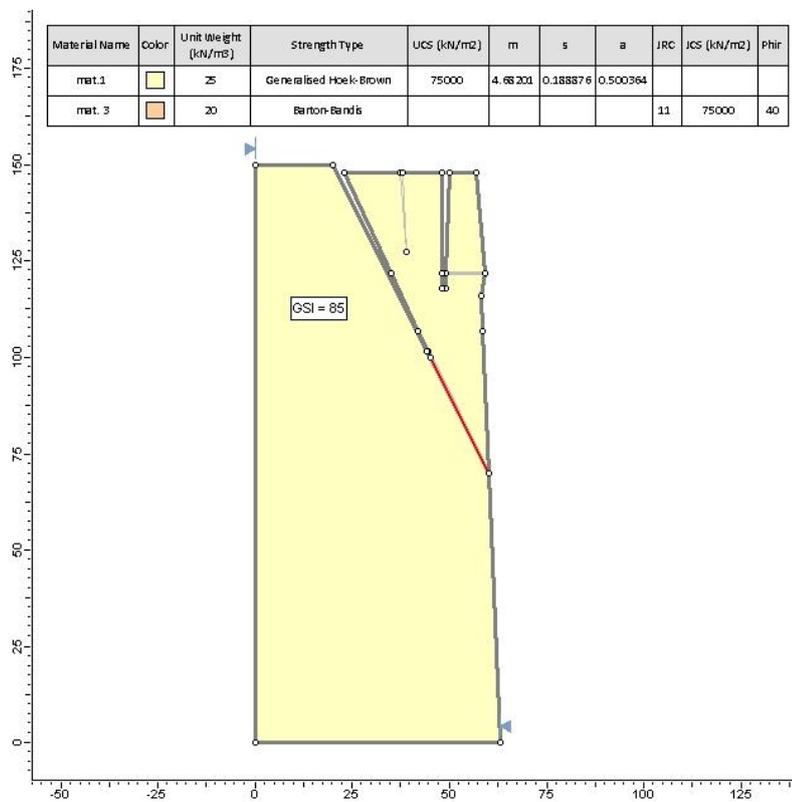


Figura 71 – Modello geometrico con le proprietà assegnate, relativo al caso 1° di ammasso omogeneo. Vengono assegnate le caratteristiche al mat.1 e alla superficie di rottura rispettivamente secondo il criterio di Hoek-Brown gen. e di Barton-Bandis.

## Interpretazione

A titolo di esempio in viene riportato il risultato della simulazione di stabilità secondo la configurazione soprastante. Vengono assegnati i valori di JCS e UCS pari 75000 kPa, GSI pari a 85, JRC pari a 11 e  $\phi$  pari a 40°.

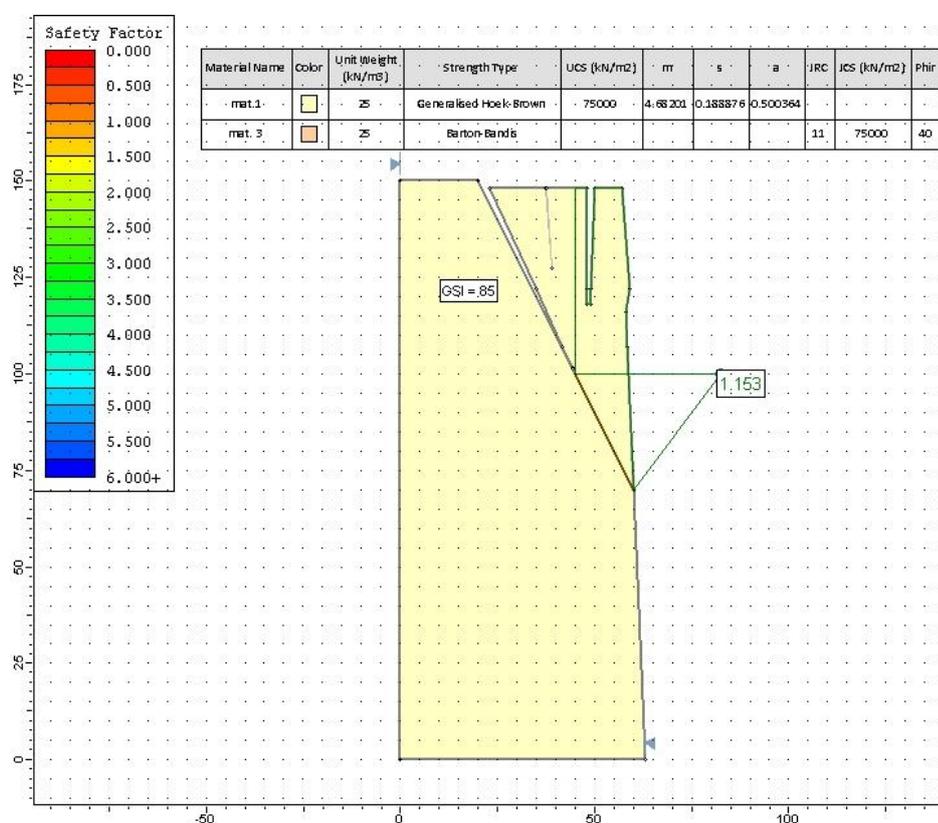


Figura 72 – Interpretazione della simulazione di analisi di stabilità per il caso 1a. Al mat.1 e alla superficie di rottura vengono assegnati rispettivamente i parametri relativi al criterio di Hoek & Brown gen.(UCS, GSI, m), mentre alla superficie vengono assegnati quelli relativi al criterio di Barton-Bandis (JCS, JRC e  $\phi$  residuale). Si osserva un valore di FS pari a 1.153.

### **Caso 1b. Ammasso eterogeneo costituito da 2 materiali:**

#### **mat.1 buono e mat.2 scadente.**

Poiché la condizione di omogeneità non è adattabile in questo caso, il modello è maggiormente rappresentabile adottando due materiali per sopperire ai limiti inevitabili della modellazione. Viene quindi aggiunta una fascia di materiale più scadente (mat. 2) dal punto di vista geomeccanico, maggiormente fratturato rispetto a quello già considerato

(mat. 1) e localizzato nella parte di appoggio dei blocchi colonnari. Tale materiale viene rappresentato in verde mentre quello di migliore qualità in beige.

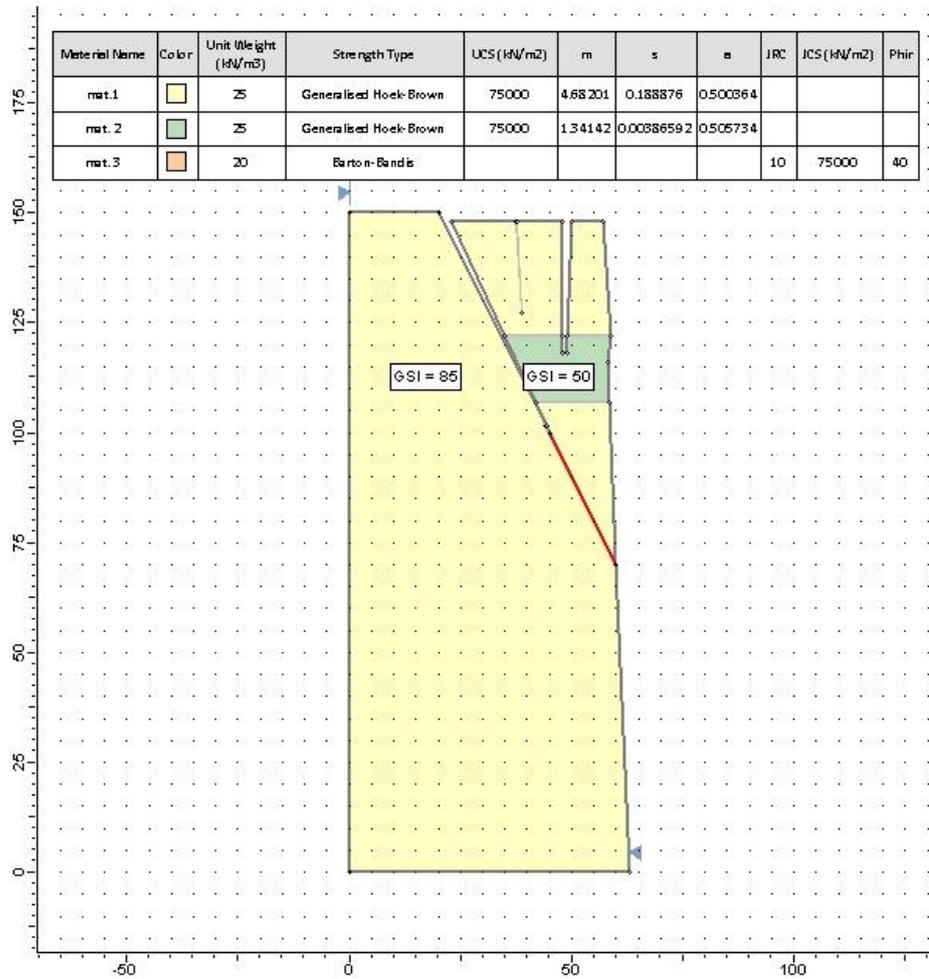


Figura 73 – Modello geometrico del blocco in analisi nel caso 1b. Si evidenziano i due materiali adottati e la presenza di una superficie di rottura predisposta. Ai materiali vengono assegnati i parametri relativi al criterio di Hoek & Brown gen.(UCS, GSI, m), mentre alla superficie vengono assegnati quelli relativi al criterio di Barton-Bandis (JCS, JRC e  $\varphi$  residuale).

In seguito in Figura 74 vengono riportati i risultati dell'analisi di stabilità mediante il contouring dei valori di FS mantenendo costante per tutti il valore di GSI del mat.1 (pari a 85), variando in ognuno il valore di GSI da 45 a 60 (con intervalli di 5 unità) e variando i valori di angolo d'attrito residuo  $\varphi$  res. da 35° a 44° e quelli di JRC da 10 a 13.

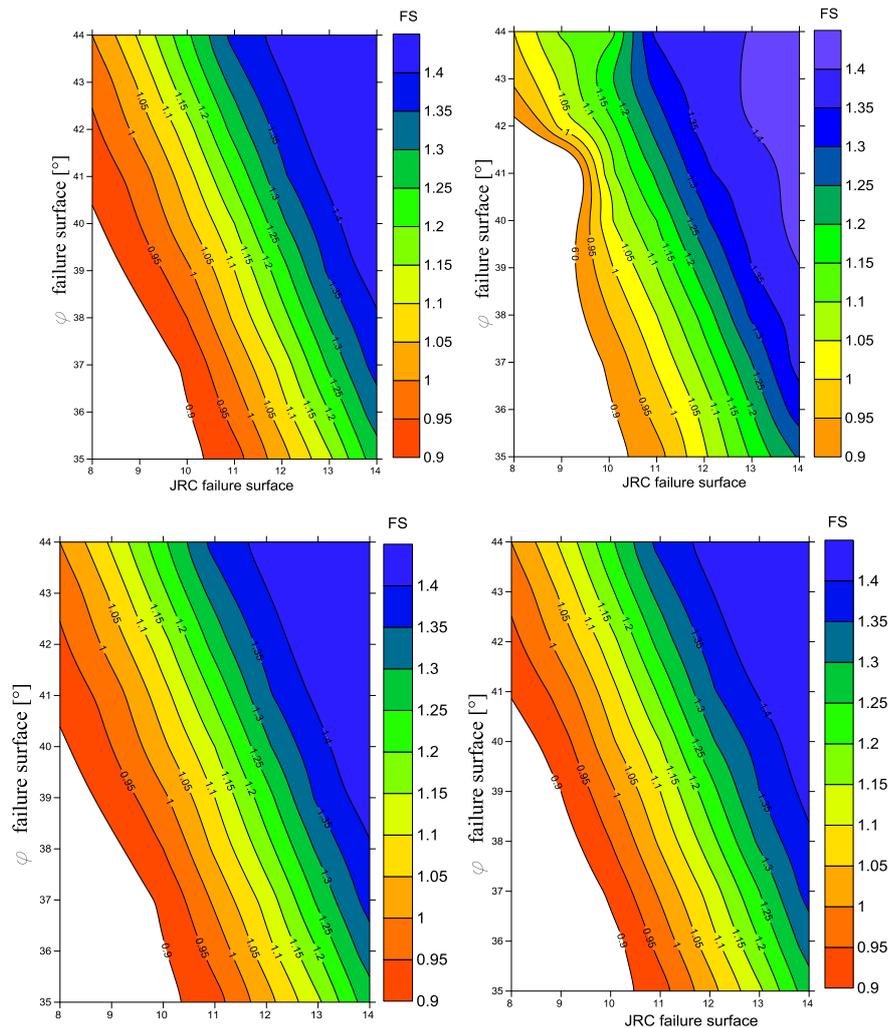


Figura 74 – Risultati dell’analisi di stabilità per il caso 1b, per mezzo del contour del valore di FS, mantenendo costante il valore di GSI (85) del mat.1, considerando variabili i valori di GSI (45-50-55-60) del mat.2, del JRC (9-14) e  $\phi$  (da 35° a 44°) della superficie di rottura.

Dalla Figura 74 è possibile affermare le seguenti osservazioni:

- esiste una relazione lineare inversa tra JRC e  $\phi$ ;
- il loro prodotto è proporzionale al valore di FS;
- il valore critico di FS scorre sulla retta con coordinate (JRC=0;  $\phi$  =44)-(JRC=11.7;  $\phi$  =0);
- la variazione dei valori di GSI del mat.2 da 45 a 60 non influenza il valore di FS, a parità di  $\phi$  e JRC.

## Applicazione di una sollecitazione sismica di progetto

In riferimento a quanto alla normativa vigente e da quanto ottenuto al capitolo 6.2.2, viene applicata al modello corrente una sollecitazione sismica orizzontale avente coefficiente sismico orizzontale  $k_h$  pari a 0.041 kN.

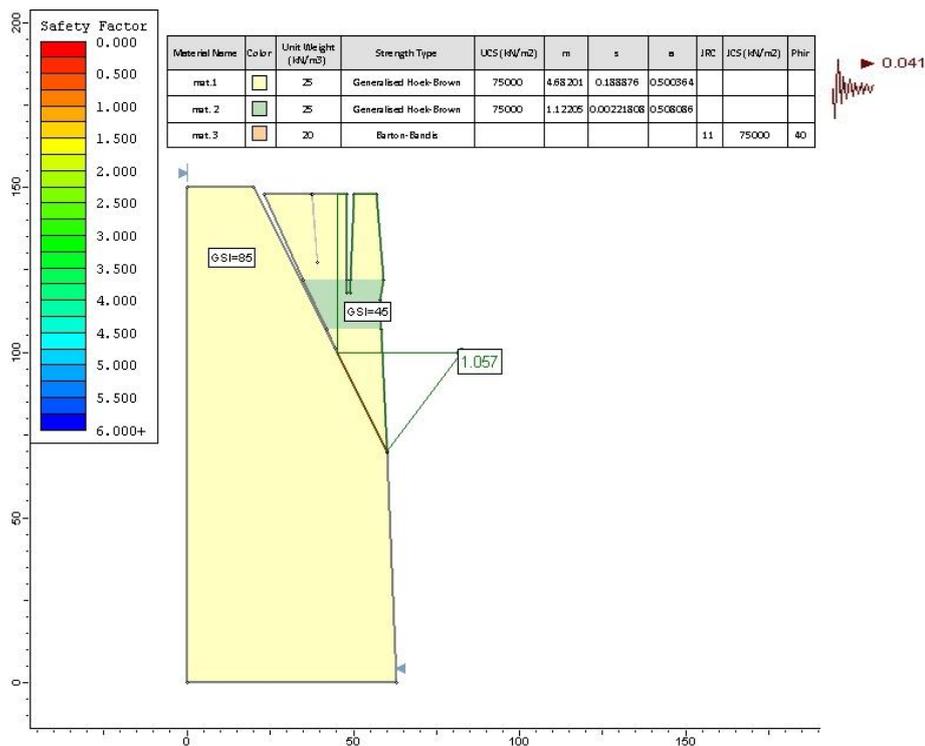
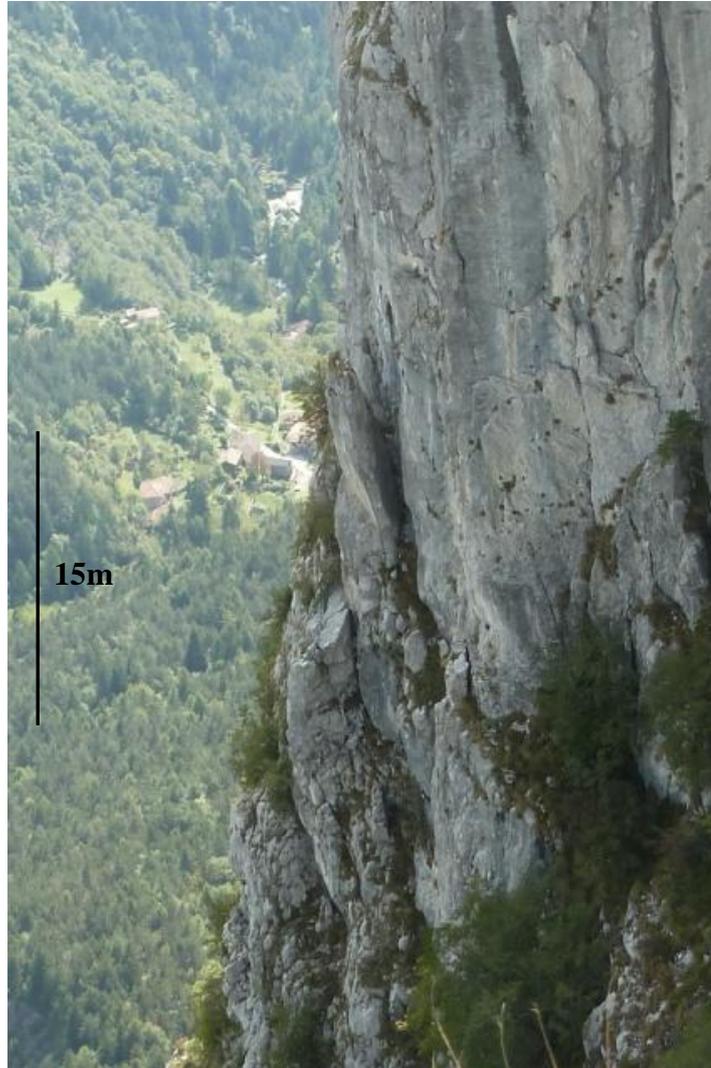


Figura 75 – Rappresentazione dell'interpretazione dell'analisi di stabilità relativa ad una delle tante combinazioni tra JRC- $\phi_i$  e GSI del mat.2, per il caso 1b, in presenza di una sollecitazione sismica con coefficiente sismico orizzontale pari a 0.041.

Dal confronto tra i risultati ottenuti dalle simulazioni eseguite in assenza e quelle eseguite considerando una sollecitazione sismica avente coefficiente sismico orizzontale pari a 0.041, si è potuto osservare che il valore di FS si abbassa al massimo di 0.1 in quest'ultima situazione.

## Caso 2



*Figura 76 – Vista da nord del sistema di blocchi a forma di pilastro, separati dalla parete da fratture ad alto angolo orientate a reggipoggio secondo la direttrice NW-SE.*

In questo caso viene analizzato il grado di stabilità relativo ad una porzione di roccia caratterizzata dalla presenza di due blocchi a forma di pilastro separati dalla parete da due fratture ad alto angolo orientate a reggipoggio secondo la direttrice NW-SE.

Inizialmente, l'ammasso viene considerato omogeneo ed in seguito viene aggiunto un altro materiale più scadente dal punto di vista geomeccanico.

## 2a. Ammasso omogeneo costituito da 1 materiale: mat.1

Inizialmente, vengono attribuite le proprietà al modello attribuendo il criterio di Hoek-Brown gen. al solo materiale mat.1, in particolare viene considerato variabile il parametro GSI, mantenendo costanti gli altri parametri.

### Interpretazione

In Figura 77 viene riportato il risultato della simulazione nella condizione critica, attribuendo un valore di GSI pari a 23. Inoltre si osservano delle superfici di rottura inclinate di  $70^\circ$

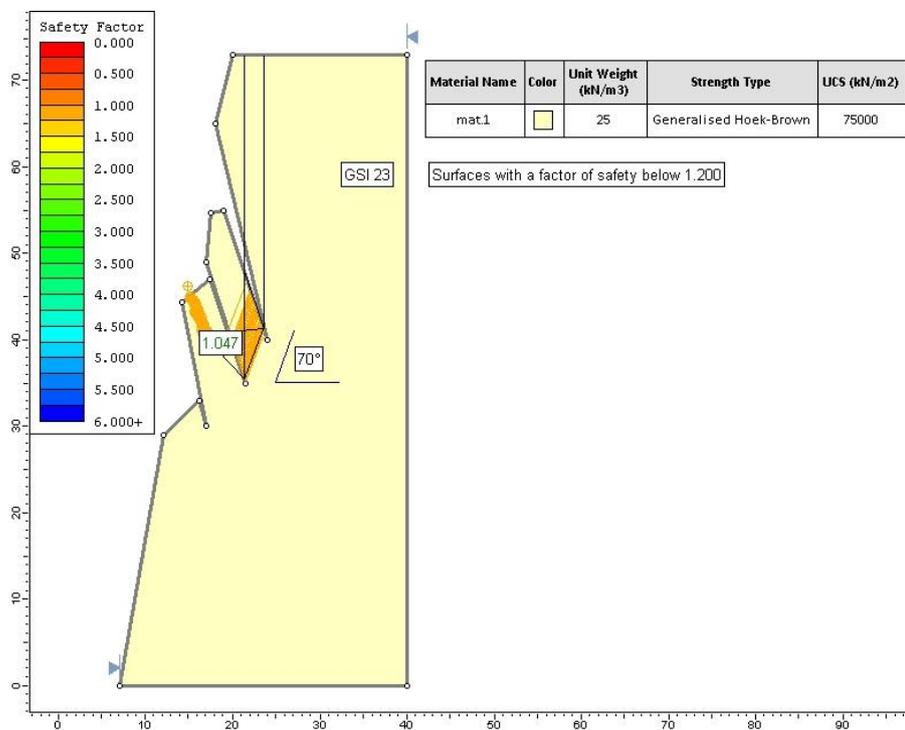


Figura 77 - Interpretazione dell'analisi di stabilità nella condizione di ammasso omogeneo portato alla condizione critica. Vengono indicati il GSI applicato, il FS critico, la pendenza della superficie di rottura stimate e superfici di rottura stimate considerando un FS minore di 2.

Confrontando l'andamento dell'angolo di attrito di base con quello relativo alla pendenza della superficie di rottura lungo tale discontinuità, nella condizione critica di  $FS = 1.047$  e GSI pari a 23, si nota come differiscano marcatamente di 13 gradi, infatti il primo è pari  $57^\circ$  mentre il secondo  $70^\circ$ . Si ribadisce che tale aspetto è comunque necessario per lo scivolamento.

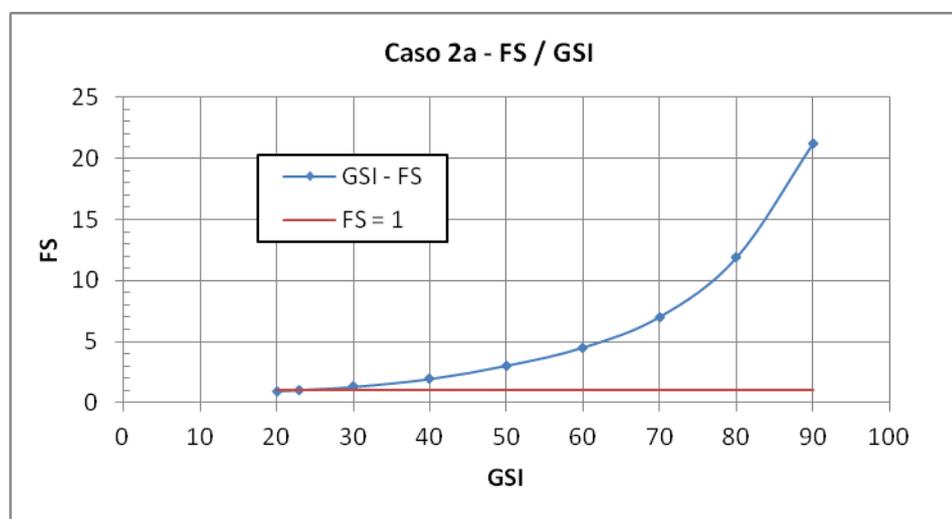


Figura 78 - Andamento del Fattore di Sicurezza rispetto al valore di GSI per l'ipotesi di ammasso omogeneo (caso 2a). Si osserva che il  $Fs$  critico si ottiene per GSI pari a 23.

Dalle Figura 78 si osserva che l'andamento del FS aumenta in modo logaritmico rispetto al valore di GSI.

#### Applicazione di una sollecitazione sismica di progetto

In riferimento a quanto previsto dalla normativa vigente e da quanto ottenuto al capitolo 6.2.2, viene applicata al modello corrente una sollecitazione sismica orizzontale avente coefficiente sismico orizzontale  $k_h$  pari a 0.041, i cui risultati sono riportati in Figura 79.

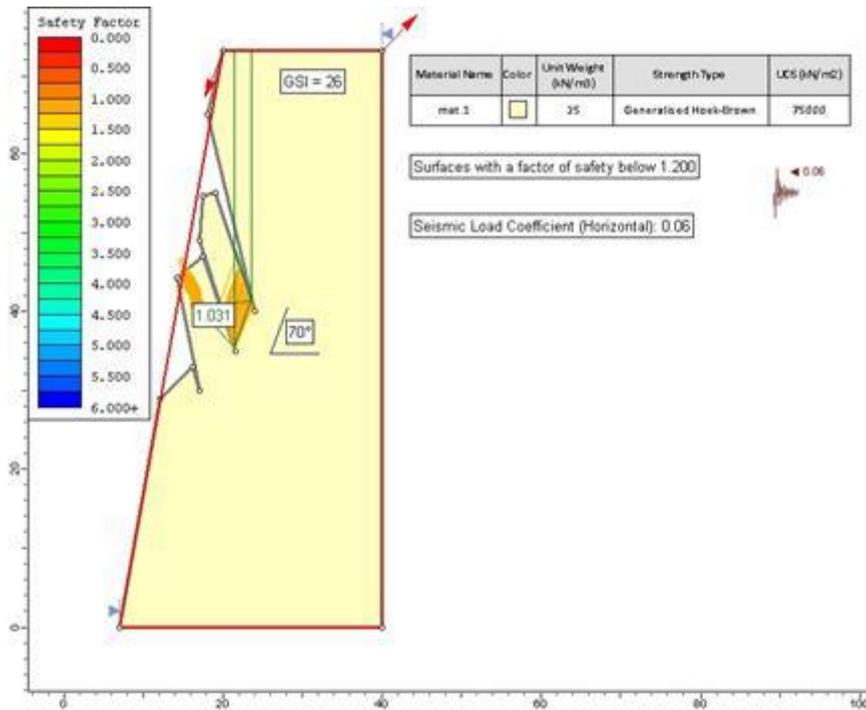


Figura 79 – Rappresentazione dell'interpretazione dell'analisi di stabilità relativa al caso 2° di ammasso omogeneo in presenza di sollecitazione sismica orizzontale. Vengono evidenziate le proprietà adottate dell'ammasso roccioso (UCS, GSI, peso specifico), il valore del coefficiente sismico applicato, le superfici di rottura con FS minore di 2 e la pendenza di quella critica.

Dalla Figura 79 si osserva che applicando un coefficiente sismico pari a 0.041, il sistema entra in condizioni di criticità (FS = 1.031) con un valore di GSI minore rispetto alla condizione asismica del 7 % circa.

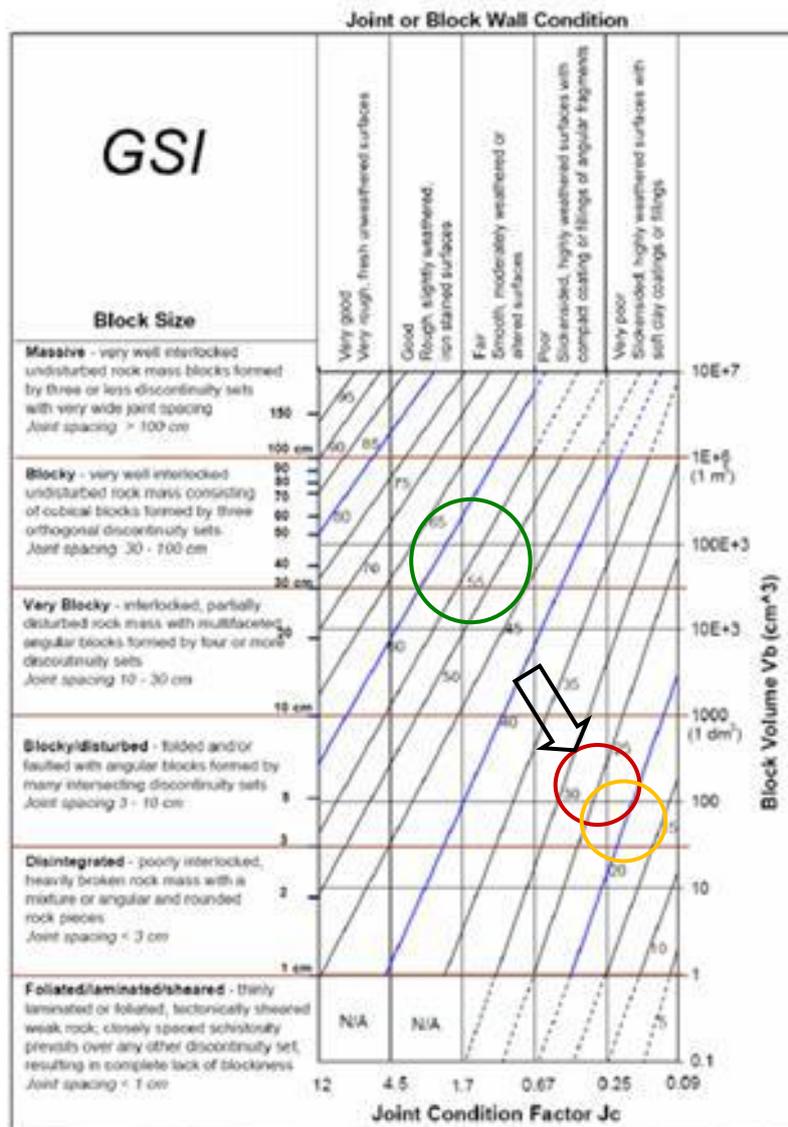


Figura 80 - Localizzazione dei campi di variazione del GSI nella condizione reale (verde) e critica per il caso 2d-2 di ammasso eterogeneo in assenza (in arancio) e presenza (in rosso) di una sollecitazione sismica (Cai et al., 2004).

**Caso 2b. Ammasso eterogeneo costituito da 2 materiali:  
mat.1 buono e mat.2 scadente.**

Poiché la condizione di omogeneità non è adattabile anche in questo caso, il modello è maggiormente rappresentabile adottando due materiali per sopperire ai limiti inevitabili della modellazione. Viene quindi aggiunta una fascia di materiale più scadente (mat. 2) dal punto di vista geomeccanico, maggiormente fratturato rispetto a quello già considerato

(mat. 1) e localizzato nella parte di appoggio dei blocchi colonnari. Tale materiale viene rappresentato in verde mentre quello di migliore qualità in beige.

Anche in questo caso per l'analisi di stabilità viene considerato il criterio gen. Hoek & Brown.

Facendo una media di quanto visto dalle foto, per la condizione reale vengono assegnati dei valori stimati di GSI pari a 70 e 40 rispettivamente per il materiale buono (rosa) e scadente (verde).

In seguito, il blocco viene portato nella condizione critica di rottura mediante la riduzione del parametro GSI per entrambi i materiali fino a valori di GSI pari a 50 e 20 rispettivamente per il materiale buono e scadente.

A titolo di esempio in Figura 81 vengono riportate le interpretazioni di due tra le varie combinazioni per entrambe le situazioni.

Per la situazione reale viene riportata la combinazione di valori di GSI pari a 70 e 40 per un valore di FS pari a 1.938, mentre per quella critica 70 e 23 relativa a un FS pari a 1.047.

### Interpretazione

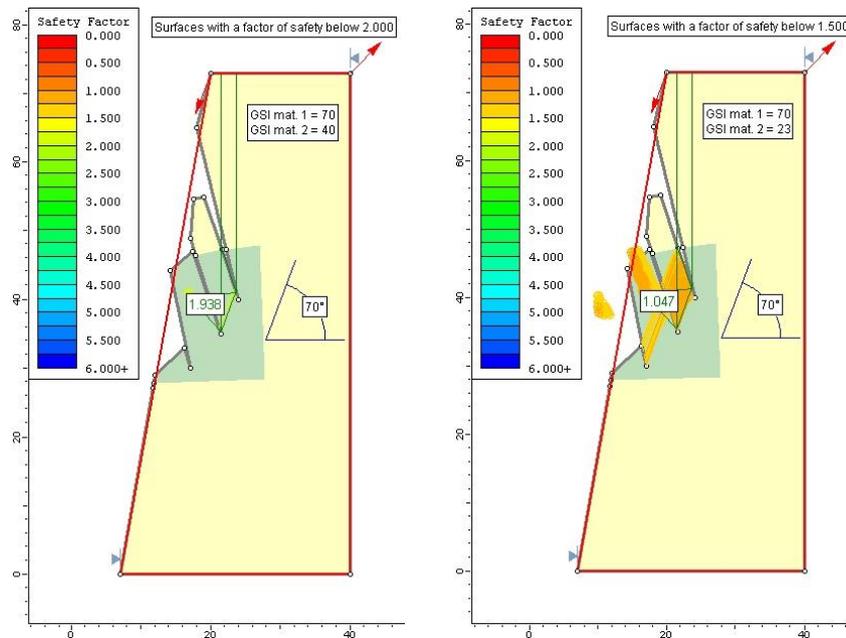


Figura 81 - Rappresentazione delle interpretazioni delle analisi di stabilità per la situazione presunta reale e critica. Si osserva come l'angolo della superficie di rottura sia in entrambi i casi pari a  $70^\circ$ .

Dalle due rappresentazioni si nota che la pendenza della superficie di rottura è in entrambi i casi pari a  $70^\circ$ .

Vengono indicate le superfici di rottura relative a valori di FS rispettivamente minori di 2 e minori di 1.5. Nella situazione critica si osserva che vengono considerate ammissibili anche superfici di rottura poste nel pilastro sottostante.

#### Applicazione di una sollecitazione sismica di progetto

In riferimento a quanto alla normativa vigente e da quanto ottenuto al capitolo 6.2.2, viene applicata al modello corrente una sollecitazione sismica orizzontale avente coefficiente sismico orizzontale  $k_h$  pari a 0.041.

Applicando una sollecitazione sismica orizzontale al modello, che in base alla normativa vigente, corrisponde ad un coefficiente sismico pari a 0.041, si osserva che il valore di GSI tale da portare a rottura il sistema, risulta maggiore del 6% rispetto alla condizione asismica.

Al fine di capire quanto è lontana la condizione di instabilità da quella reale, vengono messi in relazione, mediante il software *Surfer 11*, i valori di GSI per i due materiali adottati con quelli del FS rispettivo ricavati dalla simulazione con il software *SLIDE*. Tale rappresentazione utilizza il metodo di interpolazione *kriging* e viene riportata di seguito in Figura 82.

Allo scopo di rappresentare valori ammissibili per i due materiali adottati, vengono rappresentati i valori di GSI da 50 a 100 e da 20 a 60 rispettivamente per quello buono (mat. 1) e per quello scadente (mat. 2).

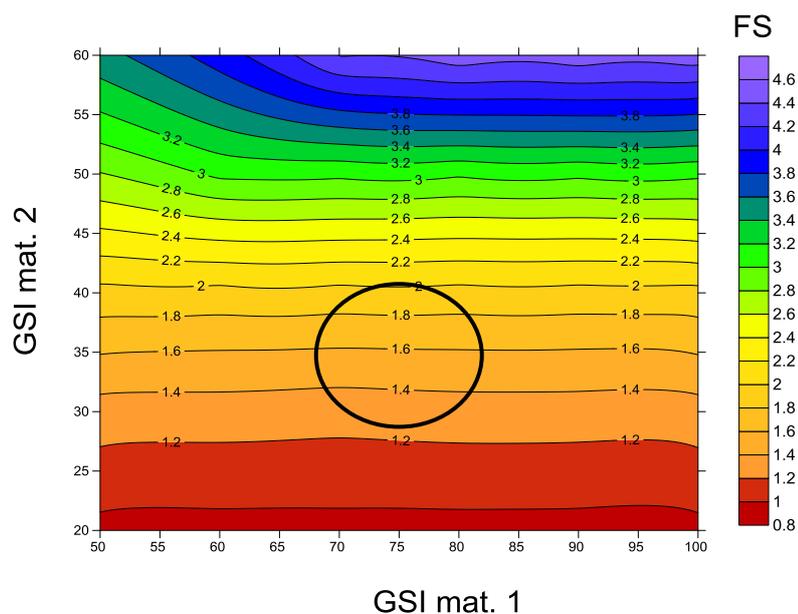


Figura 82 - Campo di variazione del FS in funzione del valore di GSI dei due materiali adottati nel caso 2b di ammasso eterogeneo con la condizione reale (cerchiato in nero).

Dalla Figura 82 si possono dedurre le seguenti osservazioni:

- la variazione del FS segue un andamento molto influenzato dai valori del GSI del materiale più scadente (mat. 2);
- la condizione critica si ha per valori di GSI inferiori a circa 22 del materiale scadente, indipendentemente da quelli del materiale buono;
- il campo di variazione reale del GSI relativo all'ammasso roccioso (indicato da un cerchio nero) si colloca in un intervallo

di valori del FS tra 1.4 a 2 (arancione), ben lontano dalla condizione critica.

Adottando un metodo tradizionale di rappresentazione del GSI (Cai et al., 2004) viene riportato in Figura 83 il campo di variazione per la condizione reale (in verde) e critica (in rosso).

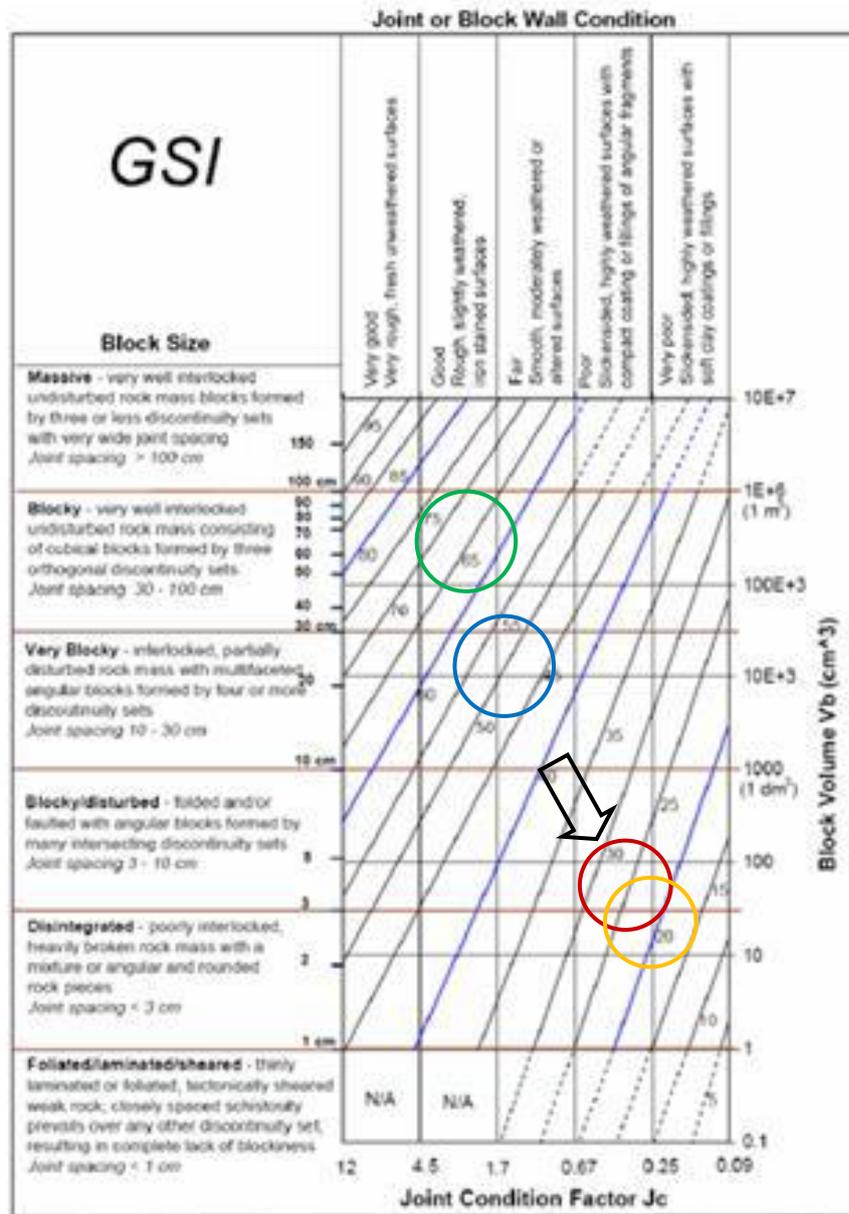


Figura 83 - Localizzazione dei campi di variazione del GSI (Cai et alii, 2004) nella condizione reale (verde buono e blu scadente) e critica (in rosso) per i due materiali adottati per il caso 2b di ammasso eterogeneo, in assenza (in arancione) ed in presenza della sollecitazione sismica (in rosso).

## 6.4 Osservazioni

Dall'analisi fotogrammetrica integrata con osservazioni in loco emerge che nell'intorno delle superfici di taglio venute a giorno (relitti di superfici di taglio basali), la roccia appare fratturata secondo valori di GSI compresi tra 60 e 30; dall'analisi in loco si osserva che tali piani sono inclinati verso valle (est) di circa 60 - 75°.

Le simulazioni numeriche eseguite con il software SLIDE mostrano effettivamente che per valori di resistenza correlabili ai valori GSI compresi tra 20 e 40 il sistema va in crisi su superfici di rottura a 70°.

L'applicazione di una sollecitazione sismica orizzontale ai modelli, legata alla magnitudo ed ai tempi di ritorno degli eventi sismici avvenuti in zona, ed alla normativa vigente, indica una diminuzione del valore di GSI pari a circa il 7 % rispetto alla condizione asismica, in entrambi i casi.

# **Capitolo 7 Analisi e mitigazione della pericolosità da caduta massi**

## **7.1 Introduzione**

Questo paragrafo si propone di descrivere le peculiarità delle traiettorie simulate dal programma Rockyfor3D, confrontandole in maniera critica con le informazioni geomorfologiche e litologiche - strutturali ottenute dal rilevamento di terreno. L'attenzione è quindi focalizzata sulle dinamiche dei crolli successive alla fase di distacco.

Una prima analisi è stata fatta simulando crolli dalla porzione medio - bassa della parete, per verificare la funzionalità delle opere paramassi già installate. Successivamente, l'analisi è stata estesa all'intero versante. In questo modo si riesce a discriminare il condizionamento morfologico sulle traiettorie, dei blocchi provenienti dalle fasce basse, che verrebbero obliterati da quelli provenienti da quelle superiori.

In questo capitolo viene descritta la mitigazione della pericolosità da caduta massi gravante su un tratto della ss 421, mediante l'utilizzo del software Rockyfor3D e applicazione di nuove opere di protezione, quali barriere paramassi.

Inizialmente vengono presentati alcuni metodi per l'analisi del rischio da crolli e in seguito viene descritta la teoria e applicazione del software effettuata nelle condizioni attuali e nelle condizioni finali. Nelle simulazioni numeriche vengono fatti variare alcuni parametri significativi come la risoluzione dei file raster, il tipo di suolo, la dimensione e il numero dei blocchi simulati,.. . Dai risultati ottenuti dalle simulazioni si giunge ad una stima del grado di pericolosità nella condizione attuale mediante analisi qualitativa e quantitativa - statistica delle traiettorie che intersecano la strada ss 421.

In seguito vengono dimensionate ed applicate al modello attuale alcune barriere paramassi. Allo stesso modo adottato per la condizione iniziale, viene effettuata una stima del grado di pericolosità, evidenziando il grado di mitigazione raggiunto.

Infine, in virtù di quanto ottenuto in precedenza, viene fatta una valutazione della mitigazione del grado di pericolosità, considerando la frequenza di passaggi, i valori di energia cinetica e di altezza di volo registrati sulle barriere virtuali poste sulla strada.

### **7.1.1 Cenni teorici del rischio da crolli**

In riferimento alla serietà di questo problema e alla difficoltà di estrarre indagini e analisi dettagliate sui centinaia di chilometri di autostrade di montagna negli USA ed in Canada occidentali, il dipartimento autostrade ha lavorato sull'estrazione di schemi classificativi e sulla indagine e semplici calcoli. La proposta di tali classificazioni è identificare i pendii particolarmente pericolosi e nei quali vi è urgente bisogno di lavori di risanamento o studi maggiormente dettagliati (Hoek, 2000).

Nel mondo sono presenti vari metodi per la valutazione del grado di rischio. Per quanto riguarda il rischio da crolli, molto spesso viene usato il metodo Rockfall Hazard Rating System (RHRS) sviluppato dall'Oregon State Highway Division (Rif.Bibliografico Pierson et al. 1990) e poi rielaborato da altri enti degli Usa (in, Colorado, Ontario, Ohio, Missouri, Vermont, etc.); in Italia invece nella Provincia Autonoma di Bolzano viene usato il metodo VISO il quale è un evoluzione del metodo BUWAL ( [www.provincia.bz.it](http://www.provincia.bz.it) ) pensato e usato dalla Svizzera; in Veneto viene usata la carta della suscettibilità al dissesto idrogeologico ( [www.regione.veneto.it](http://www.regione.veneto.it)).

Il principio generale che accumuna tutti i criteri si basa sulla considerazione del rischio come prodotto del grado di pericolosità per gli elementi a rischio o vulnerabilità.

Ultimamente alcuni autori fra cui Volkvein et al. (2011), Hermanns et al. (2013) e Crosta & Agliardi (2003) propongono interessanti metodi di derivazione del grado di rischio, considerando maggiormente gli aspetti statistici e probabilistici applicabili ai parametri in gioco.

## **7.2 Valutazione del grado di pericolosità iniziale**

In questo lavoro di tesi viene quantificato il grado di pericolosità da caduta massi, in base a quanto previsto dal PGUAP (capitolo 1) ed alle normative UNI per la caduta massi (UNI, 2012). Le classi di pericolosità esplicitate nel PGUAP con “*Area ad elevata pericolosità geologica e idrogeologica*” ed “*Area critica recuperabile*”, vengono in questo lavoro considerate rispettivamente come P4 e P3. In particolare, viene sottolineato che la classe peggiore P4 è considerata come mitigabile, cioè il pericolo può essere solo abbassato ma non eliminato; mentre la classe P3 è appunto considerata recuperabile.

Pertanto, il criterio adottato per l’attribuzione delle classi di pericolosità da caduta massi P3 e P4 si basa sull’analisi statistica delle energie cinetiche, delle altezze di volo e della frequenza di transito dei blocchi simulati, registrati su delle barriere virtuali poste sull’asse stradale e sulla successiva verifica di una delle seguenti condizioni:

- Altezza do volo  $> 5$  m
- Valori di energia cinetica  $> 1500$  kJ
- Rapporto tra numero transiti e numero lanci per cella  $> 20$

Per tutti questi parametri si considera come soglia di probabilità il valore pari al 95 percentile (UNI, 2012).

### **7.2.1 Cenni teorici del software Rockyfor3D**

Rockyfor3D è un modello di simulazione che calcola le traiettorie di singole ed individuali cadute di roccia nelle tre dimensioni. Il modello

combina algoritmi fisici e deterministici con approcci stocastici, nei quali rendono Rockyfor3D un modello dei processi probabilistici-basali delle traiettorie di caduta dei massi, distribuito dall'ecorisQ ([www.ecorisQ.org](http://www.ecorisQ.org)).

Rockyfor3D è stato sviluppato dal 1998 inizialmente sulle basi nei lavori di ricerca di caduta massi (descritti da Guzzetti et al. 2002; Dorren, 2003) e successivamente su basi di osservazioni in situ da F. Berger (Irstea Grenoble) e test con vari algoritmi di modello, fino ad arrivare ai software Rocky3 e RockyFor ed a quello usato per questo lavoro Rockyfor3D v5.1.

La sequenza di operazioni logiche sviluppate dal programma è ben rappresentata di seguito in Figura 84.

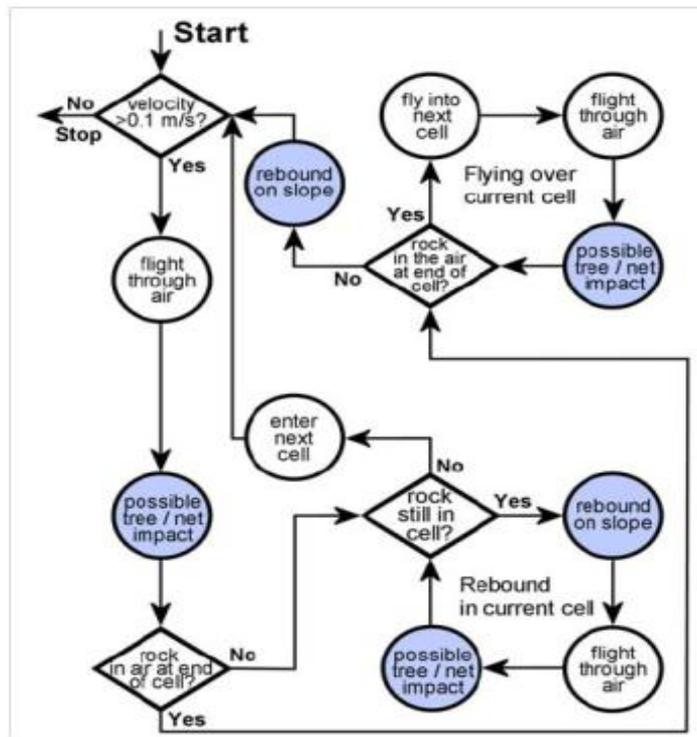


Figura 84 - Diagramma di flusso del software RockyFor3D con indicati i principali step concettuali che caratterizzano i meccanismi di distacco, movimento ed arresto dei blocchi (Dorren, 2012).

Preliminarmente l'utente deve predisporre una serie di file raster (lo spazio XY è suddiviso in una griglia formata da pixel quadrati) che consentono di definire la topografia su cui si muoveranno i blocchi simulati (DTM), la posizione dei punti di distacco, le caratteristiche dei volumi rocciosi unitari distaccati (dimensioni, forma e densità del

materiale) oltre alle informazioni necessarie a descrivere la superficie di movimento (uso del suolo e coefficienti di restituzione).

Rapportando la velocità che il blocco assumerebbe muovendosi lungo la direzione di massima pendenza con una soglia minima di velocità (0.1 m/s) il software individua tra le celle selezionate dall'utente, quelle in cui il blocco può cominciare il proprio cammino. Qualora il movimento risulti possibile, la posizione del blocco e le caratteristiche del suo movimento di caduta libera (l'attrito dell'aria è trascurato), sono determinate seguendo le leggi standard del moto parabolico uniformemente accelerato.

Quando la coordinata Z del blocco e la quota assoluta di un pixel del DTM coincidono, il blocco "impatta" al suolo ed entrano in gioco altre funzioni numeriche che consentono di definire le modalità del rimbalzo; le formule basilari ovvero quelle che consentono la definizione della velocità normale e tangenziale dopo l'impatto, sono riferite al lavoro di Pfeiffer & Bowen (1989). Innovativa risulta invece la modalità con cui è calcolato il coefficiente di restituzione tangenziale ( $R_t$ ), che definisce l'entità della diminuzione di velocità (energia) della componente di movimento parallela al versante. Dorren et al. (2006) hanno proposto la seguente formula:

$$R_t = \frac{1}{1 + ((MOH + D_p) / R)}$$

in cui:

MOH: altezza rappresentativa dell'ostacolo (m)

$D_p$ : massima profondità di penetrazione (m)

R: raggio del blocco (m)

La direzione del blocco dopo il rimbalzo, invece, è legata alla correlazione tra la direzione di massima pendenza in corrispondenza del punto d'impatto con la direzione di movimento del blocco prima del rimbalzo e la velocità dello stesso. Queste grandezze sono state relazionate tra di loro grazie ad una serie di lanci di prova che hanno

consentito la definizione di “classi di frequenza” a cui sono legati degli angoli deviatorici, fino ad un massimo di 55°.

Infine avviene l’arresto del blocco che è calcolato, come il distacco iniziale, in base ad un valore minimo della velocità (1 m/s).

Il programma consentirebbe anche di simulare l’impatto dei blocchi con i tronchi degli alberi, andando a valutare le deviazioni di traiettoria, le perdite di energia, velocità e altezza di volo (Dorren & Berger, 2006); nel caso in esame, comunque a favore della sicurezza, tale aspetto non è stato considerato.

### **Parametri di input**

La taratura dei parametri, necessari a rendere il più possibile aderenti le condizioni del modello con quelle della realtà, è stata possibile grazie ai dati acquisiti nel corso dell’ispezione in corda del versante e dai sopraluoghi eseguiti anche nelle zone basse e intermedie della parete (Capitolo 4); hanno comunque avuto un ruolo fondamentale anche la consultazione di informazioni bibliografiche.

Il programma Rockyfor3D richiede, qualora le simulazioni vengano eseguite senza tenere conto della vegetazione, la preparazione di 10 file raster con formato .ascii, di seguito elencati e successivamente descritti: nr.1 dem.asc, nr.2 rock density.asc, nr.3 d1.asc, nr.4 d2.asc, nr.5 d3.asc, nr.6 blshape.asc, nr.7 rg70.asc, nr.8 rg20.asc, nr.9 rg10.asc, nr.10 soiltype.asc.

Sono state effettuate varie simulazioni numeriche considerando file di input DEM con due differenti risoluzioni ed in entrambi i casi sono stati valutati le condizioni iniziali e finali, cercando di capire l’influenza della posizione, dell’altezza e della resistenza energetica delle barriere.

Escludendo il file dem, tutti i file di input derivano dalla creazione di un file shape di tipo poligonale (polygon), il quale riunisce le varie caratteristiche del suolo presente sul pendio in studio per mezzo dei vari

campi (fields) rispettivi ai file input. Nel paragrafo di applicazione successivo vengono descritti tali file.

Gli autori del software ricordano che per avere dei risultati soddisfacenti e più probabili, non è necessario adottare una risoluzione del Dtm pari a 1m x 1m, bensì un compromesso accettabile legato a varie esigenze (velocità di computazione, estensione dell'area da modellare, grado di accuratezza dei dati di input e dei risultati,...), indicando l'intervallo compreso tra 2m e 5m.

### Dem

Il movimento dei blocchi viene simulato in tre dimensioni e tiene quindi conto delle variazioni locali della topografia, tali però da assumere un'estensione areale che possa condizionare la quota del pixel.

Per la corretta simulazione delle traiettorie di crollo, il modello digitale del terreno con risoluzione al suolo di 1 m consente il riconoscimento e la comprensione di numerose morfologie.

Per l'area in questione sono stati considerati i casi con risoluzione 1m x 1m e 5m x 5m, i cui risultati vengono presentati successivamente.

E' evidente quindi che con una maglia di 1m x 1 m, la superficie su cui si muovono i blocchi riesce a "percepire" ostacoli che abbiano almeno un lato di 1 m circa; ciò significa che, per esempio, blocchi isolati, depressioni morfologiche, canali di scorrimento delle acque meteoriche sono tutti elementi già considerati nel file della topografia, purché di dimensioni superiori al metro. Usando invece una maglia di 5m x 5m, la risoluzione diminuisce, portando allo smussamento degli avvallamenti e rilievi topografici locali, a fronte di una maggiore velocità di computazione della simulazione.

### Densità della roccia.

Nella compilazione del file .shp, qualora questo parametro venga assunto pari a zero, viene considerata dal software come zona di transito,

se è maggiore di zero viene considerata come zona sorgente (source zone) dei distacchi simulati.

#### Diametro dei blocchi

Il volume dei blocchi simulati è rappresentato da 3 file raster che lo costituiscono: d1.asc, d2.asc e d3.asc sono rispettivamente i valori dei tre diametri. Nel caso uno dei tre parametri venga lasciato nullo, le celle interessate non potranno costituire zona sorgente, bensì sono zona di transito dei massi.

#### Forma dei blocchi

Questo parametro, definito dal file blshape.asc., assegna la forma del blocco simulato, per la quale sono disponibili quella sferica, ellissoidale, rettangolare e discoidale.

#### Coefficienti di rugosità

La rugosità della superficie dipende dalla dimensione del masso e dalle irregolarità locali della superficie che incontra il masso in caduta, rappresenta quindi una stima di quanto possa variare l'angolo del versante entro il raggio del masso.

Tale parametro è costituito da 3 file: rg10.asc, rg20.asc e rg70.asc

#### Soiltype

Per definire le caratteristiche del terreno in corrispondenza del punto in cui avviene l'impatto tra il blocco e la topografia, il programma fa riferimento al coefficiente di restituzione dopo l'urto, scomposto in componente restituita parallelamente (Rt) e perpendicolarmente (Rn) al versante. Nel modello il file che definisce l'uso del suolo è direttamente correlato a valori di Rn (Tabella 11) ricavati dalla letteratura specialistica e da prove in sito; i coefficienti utilizzati per le differenti classi di suolo sono riportati nella tabella sottostante.

Soiltype	General description of the underground	mean $R_n$ value	$R_n$ value range
0	River, or swamp, or material in which a rock could penetrate completely	0	0
1	Fine soil material (depth > ~100 cm)	0.23	0.21 - 0.25
2	Fine soil material (depth < ~100 cm), or sand/gravel mix in the valley	0.28	0.25 - 0.31
3	Scree ( $\varnothing < \sim 10$ cm), or medium compact soil with small rock fragments, or forest road	0.33	0.30 - 0.36
4	Talus slope ( $\varnothing > \sim 10$ cm), or compact soil with large rock fragments	0.38	0.34 - 0.42
5	Bedrock with thin weathered material or soil cover	0.43	0.39 - 0.47
6	Bedrock	0.53	0.48 - 0.58
7	Asphalt road	0.35	0.32 - 0.39

Tabella 11 - Tipi di suolo (soiltypes) usati dal software Rockyfor3D con i relativi range e medie dei valori del coefficiente di restituzione ( $R_n$ ) (Dorren, 2012).

E' ragionevole identificare come zone a minor dissipazione di energia le classi "roccia affiorante" ( $R_n$  medio: 0.43) e "roccia subaffiorante" ( $R_n$  medio: 0.53), rispetto agli accumuli detritici grossolani al piede delle pareti ( $R_n$  medio: 0.33-38) o dei piccoli coni detritici di materiale fine ( $R_n$  medio: 0.28).

Il coefficiente di restituzione tangenziale  $R_t$  è invece ottenuto tramite un algoritmo in cui il fattore da determinare è la MOH (Mean Obstacle Heights) ovvero l'altezza d'ostacolo rappresentativa che il blocco incontra al momento dell'impatto (Figura 85), che rappresenta i file di input nr. 3-4-5. E' evidente come non sia possibile misurare la MOH in dettaglio e per questo si ricorre ad un approccio probabilistico, definendo delle aree omogenee e delle classi di probabilità.

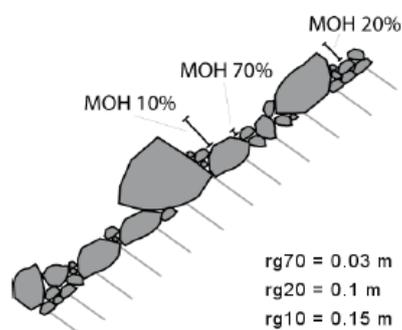


Figura 85 - Visualizzazione della misura della MOH (Dorren, 2012).

Il software permette di applicare sul versante delle barriere paramassi (rockfall nets) e per fare ciò è necessario costruire 3 ulteriori file di input di seguito presentati:

- net\_number.asc : rappresenta il numero cardinale di barriera;
- net\_energy.asc : rappresenta il valore della resistenza energetica in quel punto della barriera;
- net\_height.asc : rappresenta il valore dell'altezza di volo del masso in quel punto della barriera.

Essi vengono creati attraverso la sovrapposizione del file DTM riclassificato con valori nulli.

### **File di output**

Ogni volta che un blocco simulato sorpassa o rimbalza in una data cella raster, viene registrato nei rispettivi file raster il valore massimo delle diverse variabili simulate. Essi hanno la stessa dimensione di cella, coordinate di riferimento, estensione e formato dei file raster di input.

Di seguito vengono elencati i file raster di output creati dal software, con particolare riguardo a quelli adoperati per l'interpretazione dei risultati:

- *E\_mean.asc*: media del massimo valore dell'energia cinetica (traslazionale + rotazionale, misurata in kJ) di tutti i blocchi simulati di una data cella.
- *E\_50.asc*, *E\_90.asc*, *E\_95.asc*, *E\_98.asc*, *E\_99.asc*: questi raster rappresentano rispettivamente la mediana, il 90°, 95°, 98° e 99° percentile dell'energia cinetica per cella dei massi simulati.
- *E\_95Cl.asc*: intervallo di confidenza del 95% del massimo di tutti i valori di energia cinetica registrati in ogni cella ( $95\%Cl = E\_mean + 2 * dev.std$  del massimo valore in una cella, assumendo una distribuzione normale). I valori dell'intervallo di confidenza del 95% possono essere considerate come il massimo valore di energia registrato in una data cella. Per dimensionare le misure di mitigazione del rischio, viene raccomandato di usare i valori del 95° percentile dei valori di energia e delle altezze di passaggio, raccolti in una finestra di calcolo (calculation screens).
- *Ph\_mean.asc*: la media delle massime altezze di passaggio per cella (riferito al baricentro del blocco). Tali valori sono degli interi e sono limitati alle seguenti classi di altezze:  $\leq 0.5$ , 1, 2, 3, 4, 5, 10, 20,  $> 20$  (in m).

- *Ph\_50.asc, Ph\_90.asc, Ph\_95.asc, Ph\_98.asc, Ph\_99.asc*: questi raster rappresentano rispettivamente la mediana, il 90°, 95°, 98° and 99° percentile delle altezze di passaggio simulate.
- *Ph\_95CI.asc*: il 95% cl dei valori massimi di altezza di volo registrata per ogni cella (in m; misurata in direzione normale alla superficie del pendio).
- *Nr\_passages.asc*: numero di transiti dei blocchi attraverso ogni cella.
- *Nr\_sourcecells.asc*: il numero di celle sorgenti da cui partono i blocchi giunti in una data cella.
- *Reach\_probability.asc*: rapporto (Numero passaggi\*100) / (Numero simulazioni per cella sorgente \* Numero celle sorgenti) [%]. La relativa mappa mostra la probabilità (alti valori) o meno (bassi valori) di arrivo dei blocchi in una data cella.
- *Nr\_deposited.asc*: numero dei blocchi depositati in ogni cella. E' un ottimo mezzo per delineare le zone relative ai percorsi di caduta massi come base per la mappa del pericolo.
- *Rvol\_deposit.asc*: Massimo volume dei blocchi (in mc) depositati in ogni cella.
- *EL\_angles.asc*: raster con i valori minimi dell'angolo lineare di energia ricalcolato per cella [°]. Rappresenta l'angolo del pendio di una linea virtuale diretta tra il punto sorgente e quello di deposito di un blocco caduto.
- *Traj\_time.asc*: tempo minimo di caduta di un blocco da un'area sorgente definita verso una data cella raster [s].
- *V\_max.asc*: velocità massima assoluta simulata per cella raster [m/s]. the absolute maximum simulated velocity per raster cell (m.s-1).

Nel caso di simulazione considerando il contributo “forestale”, vengono prodotti i seguenti file raster:

- *Tree\_impact\_heights.asc*: altezza massima di impatto contro l'albero per cella raster [m];
- *Nr\_tree\_impacts.asc*: numero di impatti contro l'albero per cella raster [-].

Alla fine di ogni simulazione il software crea anche due file di testo chiamati:

- *Rockyfor3D\_v50\_logfile\_dd-mm-yyyy\_HHhMM.txt* il quale contiene informazioni relative ai massi simulati (nr totale, lanci per cella, ecc..) ed all'angolo di impatto sulle barriere
- *Rockyfor3D\_V5.1\_CalC\_SCR\_ dd-mm-yyyy \_HHhMM.txt* il quale contiene informazioni relative ai valori medii di energia cinetica, velocità massima, angolo di impatto e altezza di volo per ogni barriera.

Tali file di output sono stati utilizzati per effettuare l'analisi statistica presentata nei successivi paragrafi.

Per la comprensione migliore di tali file vengono riportati, di seguito in Figura 86 e Figura 87, due esempio relativi alla simulazione effettuata per la situazione iniziale con un dtm con maglia di 1m x 1m e 1 lancio per cella.

```

Rockyfor3D_V5.1_logfile_29-10-2013_15h34.txt - Blocco note
File Modifica Formato Visualizza ?
Rockyfor3D v5.1 - simulations completed on Tue Oct 29 15:34:01 2013
simulation started on Tue Oct 29 15:28:58 2013

simulation settings:
- rock volume variation = +/- 20
- nr. of simulations per source cell = 1
- nr. of simulated falling rocks (total nr. simulations) = 88092
- additional initial fallheight = 0.000000 m
- simulation without forest and with nets
Overall simulated block volumes:
- min = 0.020000 m3
- mean = 0.990000 m3
- max = 1.200000 m3

Overall simulated energy values:
- maximum of the mean energy values = 6525.100000 kj
- maximum energy value = 9607.800000 kj

Statistics on Energy Line Angles recalculated from simulated tra
EL_angle[°] frequency[-] frequency[%]
0.00 218.00 0.34
1.00 42.00 0.06
2.00 28.00 0.04
3.00 41.00 0.06
4.00 33.00 0.05
5.00 42.00 0.06
6.00 34.00 0.05
7.00 28.00 0.04
8.00 35.00 0.05
9.00 63.00 0.10

```

*Figura 86 – Esempio del file di testo logfile relativo alla simulazione numerica nella situazione iniziale considerando un DTM con maglia pari a 1m x 1m e un lancio per cella.*

Rockyfor3D_V5.1_CalC_SCR_29-10-2013_15h34.txt - Blocco note							
File Modifica Formato Visualizza ?							
scr_nr	n	E_50	E_90	E_95	E_98	Ph_50	Ph_90
1	4350	1143.0	2381.0	2644.0	2964.0	1.0	10.6
2	7494	1698.0	3120.0	3430.0	3703.0	4.0	23.1
3	2559	13.1	2929.1	3260.1	3579.1	1.1	18.4
4	1369	943.1	2314.1	2662.1	3024.1	0.9	16.4
5	2604	694.8	2445.8	2858.8	3254.8	0.6	11.2
6	1246	411.1	2033.1	2599.1	3086.1	0.7	9.8
7	691	274.2	1675.2	2150.2	2572.2	0.6	11.1
8	2527	296.1	1349.1	2114.1	2779.1	1.1	6.6
9	11012	514.1	1641.1	2106.1	2639.1	0.7	7.6
10	355	644.7	1377.7	1563.7	2046.7	1.0	18.0
11	1958	648.2	1432.2	1643.2	1940.2	1.0	3.8
12	5708	2128.4	3127.4	3383.4	3615.4	3.9	12.0
13	3293	923.9	2495.9	2893.9	3311.9	1.0	12.2
14	6553	1645.6	2805.6	3098.6	3388.6	1.3	8.5
15	1432	9.0	3217.0	3439.0	3735.0	1.7	20.5
16	685	1032.0	2649.0	3001.0	3335.0	1.1	18.0
17	258	689.2	2301.2	2827.2	3098.2	2.4	25.2
18	387	402.3	1085.3	1236.3	1601.3	0.9	8.7
19	1638	1172.0	2422.0	2764.0	3167.0	1.4	5.8
20	2925	1046.4	2015.4	2336.4	2729.4	0.9	3.2
21	1513	883.7	2507.7	2871.7	3221.7	1.6	17.5
22	978	1177.9	3002.9	3329.9	3613.9	1.2	23.1
23	885	803.5	2793.5	3141.5	3381.5	1.1	17.9
24	1512	1760.7	2944.7	3222.7	3558.7	5.1	18.2
25	1480	1394.1	2725.1	3023.1	3440.1	2.9	10.8
26	1088	1052.6	2609.6	2929.6	3246.6	1.4	18.7
27	2161	1323.5	2864.5	3155.5	3468.5	2.0	18.6

Sim_data					
scr_nr	V	E	Ph	vrot	Imp_a
1	13.3	278.6	3.3	24.3	-51.9
1	37.4	2020.3	3.8	62.5	-41.3
1	8.4	76.6	0.6	2.0	-1.6
1	4.3	23.1	0.5	-2.7	-4.8
1	22.0	1403.6	0.6	51.6	0.6
1	6.0	74.0	0.5	-10.0	0.4
1	2.5	10.2	0.5	3.0	-4.4
1	10.1	116.8	0.5	-1.6	-8.0
1	9.7	210.6	1.3	20.3	10.3
1	10.0	230.2	0.6	28.9	0.8

Figura 87 - Esempio del file di testo CalcScreen relativo alla simulazione numerica nella situazione iniziale considerando un DTM con maglia pari a 1m x 1m e un lancio per cella.

## 7.2.2 Opere di protezione per la caduta massi

La progettazione degli interventi di stabilizzazione per i pendii in roccia, richiede, alle tradizionali competenze proprie dell'ingegneria geotecnica, anche una buona conoscenza degli aspetti di tipo ambientale, dei problemi legati alla sicurezza, dei metodi costruttivi, dei costi e delle procedure contrattuali (Tanzini, 2001).

In letteratura troviamo numerose classificazioni in merito alle diverse tipologie di interventi, ma le più diffuse sono quelle che distinguono gli interventi in:

- opere ATTIVE che intervengono all'origine del problema provvedendo ad impedire il distacco degli elementi lapidei dal versante. Tra gli interventi di difesa attiva possiamo elencare:
  - interventi che modificano la geometria del versante;
  - interventi che modificano la resistenza meccanica;
  - interventi che modificano le condizioni piezometriche;
  - interventi che agiscono sulla superficie dell'ammasso roccioso per proteggerlo contro l'alterazione.
- opere PASSIVE che intercettano o deviano i massi che si siano mobilizzati con interventi localizzati prevalentemente alla base dei pendii o delle pareti rocciose. Le difese di tipo passivo si distinguono invece in:
  - riprofilatura del versante con la creazione di berme intermedie;
  - installazione di barriera paramassi a rete con diverse tecnologie di smorzamento dell'energia cinetica dei blocchi;
  - muri di protezione;
  - gallerie artificiali;
  - trincee;
  - rilevati in terra (rinforzata o non rinforzata), scogliere, terre armate, muri cellulari;
  - reti in aderenza e rafforzamenti corticali.

### **Barriere paramassi**

Le barriere paramassi a rete si collocano tra gli interventi di difesa passivi e stanno diventando l'intervento più frequentemente utilizzato, questo grazie alla notevole evoluzione tecnologica dovuta ad una maggiore attenzione degli studiosi ai problemi di carattere progettuale e costruttivo. Esse possono essere installate anche in versanti molto inclinati, ed i livelli energetici di applicazione vanno da 100 kJ a 5000 kJ.

In funzione del loro comportamento fisico, dei materiali e delle modalità costruttive si possono distinguere due tipi principali di strutture: *barriere paramassi rigide* e *barriere paramassi elastiche*. Di norma ai bordi delle strade vengono poste quelle rigide.

Le barriere paramassi a rete esplicano la loro funzione arrestando un blocco roccioso in movimento lungo un versante mediante l'azione combinata di tutti gli elementi strutturali che le costituiscono e trasferendo alle fondazioni dei controventi e dei montanti le forze di arresto. I connessi fenomeni meccanici sono stati ampiamente indagati con sperimentazioni in vera grandezza realizzate in vari campi prova. Al riguardo, recentemente è stata approvata in sede europea una linea guida di Benestare Tecnico Europeo ETAG 027 sulle barriere paramassi a rete che descrive le procedure e le prove in vera grandezza che devono essere realizzate per la marcatura CE di questi prodotti (Oggeri et al., 2006).

Tra le varie cose la ETAG 027 definisce (Rockfalldefence, 2009):

- i componenti di una barriera paramassi, distinti in:
  - struttura d'intercettazione: **rete** che sostiene l'impatto del blocco
  - struttura di supporto: **montanti** che mantengono eretta la rete
  - elementi di connessione: **funi e freni** che trasmettono le forze alle strutture di fondazione, assorbono energia e mantengono la rete in posizione
- l'utilizzo previsto di una barriera paramassi
- la classificazione energetica di una barriera paramassi la quale afferma quanto di seguito. Il livello di Energia di una barriera paramassi è definito come l'energia cinetica di un blocco omogeneo e regolare che impatta la rete della barriera considerata. Tale livello energetico è quantificato in:
  - **SEL** (Service Energy Level – Livello di Energia di Servizio);
  - **MEL** (Maximum Energy Level – Massimo Livello di Energia).

La norma impone le seguente  $MEL \geq 3 \times SEL$

- la categorizzazione secondo l'altezza residua
- l'esatta metodologia di test in scala 1:1

Tra i vari studi effettuati dai vari dipartimenti di ricerca italiani, svizzeri e francesi, per uno studio dettagliato sulla tecnologia ed i criteri progettuali relativi alle barriere paramassi, vengono indicati i lavori di Peila & Oggeri (2006), Gentilini et al. (2013) e Mignelli et al. (2013)

Per quanto riguarda la parete in studio in questo lavoro di tesi, le barriere attualmente presenti sono di tipo elastico e rigido a seconda della relativa posizione e funzione. Di seguito, in Tabella 12 vengono riportate le caratteristiche di tali opere di protezione e sintetizzate in Figura 88.

Numero	Energia cinetica [kJ]	Altezza [m]	Lunghezza [m]
10	500	2	28.9
11	500	2	41.5
12	500	2	48.5
13	2000	4	50.6
14	2000	4	51.5
15	500	2	16.9
16	500	2	23.4
17	500	2	24.4
18	500	2	47.2
19	2000	5	48.2
20	2000	5	30.4
21	500	2	45.6
22	500	2	39.9
23	500	2	34.6
24	2000	5	26.8
25	2000	4	58.3
26	2000	4	28.9
27	2000	4	39.5

*Tabella 12 - Caratteristiche delle barriere paramassi attualmente presenti con i relativi valori geometrici (altezza e lunghezza) e di resistenza energetica.*

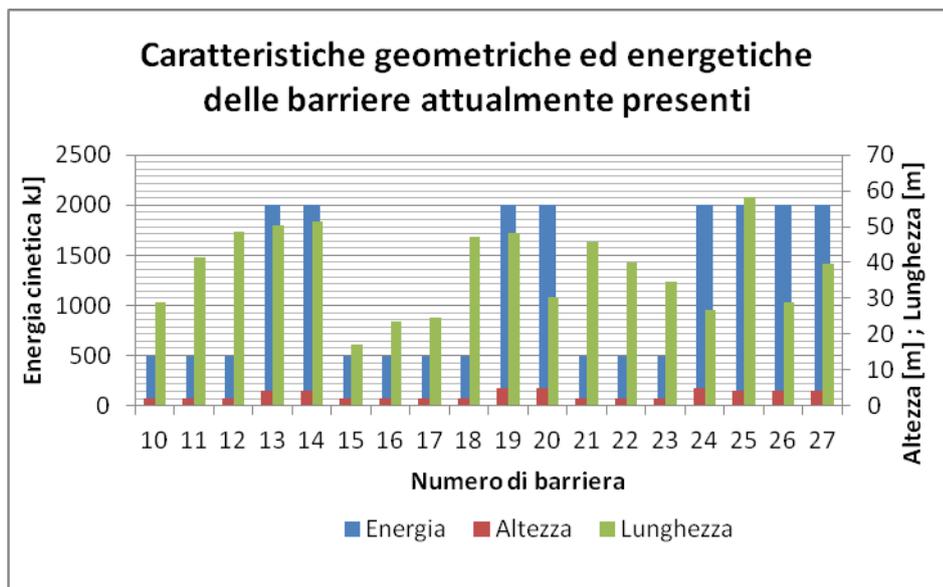


Figura 88 – Sintesi delle caratteristiche geometriche ed energetiche delle barriere attualmente presenti. Nel grafico vengono riuniti i valori di resistenza energetica (ordinata sinistra) e quelli di altezza e lunghezza (ordinata destra) in due scale diverse.

Dalla Tabella 12 e dalla seguente Figura 88 si osserva che gran parte delle barriere attualmente presenti sono caratterizzate prevalentemente da una resistenza energetica di 500 kJ ed altezza rispettivamente pari a 2m.

In seguito, a titolo di esempio in Figura 89 viene riportata un'immagine delle barriere nr. 10, 11, 13, 14 poste appena sopra all'entrata della galleria, rispettivamente di tipo rigido ed elastico.



Figura 89 – Visione di alcune barriere paramassi attualmente presenti in prossimità dell'entrata in galleria della strada statale. Si distinguono le due tipologie di barriere: rigide (davanti) ed elastiche (dietro).

## **7.2.3 Simulazione caduta massi nella condizione iniziale**

### **7.2.3.1 Caratteristiche dei file di input e output**

Sulla base di quanto scritto ai capitoli precedenti sono state effettuate delle simulazioni di caduta massi dalla parete orientale del Monte Prada verso la strada statale 421 nel tratto di studio attraverso il software Rockyfor3D, descritto precedentemente.

Data l'elevata distribuzione di aree ammalorate, nell'ambito del versante è stato deciso di considerare un'omogenea possibilità di distacco sull'intero versante, mentre la definizione delle zone di distacco sono state inserite nel modello sulla base delle informazioni raccolte durante i sopralluoghi.

Sulla base dei rilievi in parete, sono stati valutati i volumi caratteristici per ogni zona sorgente, ridotti adeguatamente per tenere in considerazione quanto appena descritto.

Sono esclusi dallo scopo di questo lavoro le occasioni di distacco straordinarie con tempi di ritorno centenari o maggiori, riferite a volumi importanti (maggiori di 20 mc circa).

Di seguito vengono presentate le caratteristiche dei file di input e di output adottati nelle simulazioni numeriche.

#### Dem

Come accennato al capitolo 4, come file di input per le simulazioni numeriche di caduta massi è stato usato il DTM fornito dalla PAT, scaricabile dal sito [www.territorio.provincia.tn.it](http://www.territorio.provincia.tn.it).

In prima analisi è stata scelta la dimensione della cella elementare (pixel) di 1m x 1m di lato, la quale determina la risoluzione massima dell'informazione ottenibile dalla simulazione numerica ed in seguito sono state effettuate simulazioni variando solamente la risoluzione del pixel, adottando una maglia di 5m x 5m, cercando di capire l'influenza di tale fattore, a parità degli altri.

### Densità della roccia

Il valore di densità utilizzato nei file di input è pari a 2500 kg/mc. Per motivi computazionali le celle sorgenti sono state mantenute costanti per tutte le simulazioni. Tuttavia, l'assegnazione delle medesime (sources areas) è stata effettuata considerando il rilievo geomorfologico estratto dall'analisi Laser Scanner Terrestre (Allegato A2), gli appunti di campagna, il materiale fotografico e la carta delle pendenze.

### Diametro dei blocchi

A causa dell'impossibilità di simulare la frammentazione dei blocchi durante una caduta, è necessario valutare una volumetria di compromesso, tra la cella sorgente e quella di arresto. E' ovvio che questo compromesso impone l'utilizzo di volumi inferiori a quanto presente all'origine e superiori a quanto riconosciuto nel deposito.

L'analisi dimensionale sul materiale detritico ha inoltre dimostrato come vi sia una netta predominanza di elementi a spigoli vivi con volumi nettamente inferiori al metro cubo.

Alla luce di quanto detto, è stato scelto di assegnare dei valori unitari ai tre parametri d1, d2, d3 e fare variare del 20% tale valore in sede di simulazione numerica. Va aggiunto che in alcuni settori prospicienti la strada, è stata assegnata una dimensione dei blocchi sorgenti pari a circa un terzo rispetto al resto, giustificato dal grado di fratturazione maggiore cui sono soggette tale aree.

### Forma dei blocchi

Nonostante vi sia un rappresentanza dominante di blocchi spigolosi, la forma dei medesimi scelta è quella sferica (spherical block), poiché permette, rispetto alle altre, una maggiore accelerazione lungo il percorso del masso, mantenendo un riguardo cautelativo.

### Coefficienti di rugosità

I valori di rugosità  $rg_{10}$ ,  $rg_{20}$  e  $rg_{70}$  sono stati considerati costanti per tutte le simulazioni effettuate e vi sono stati assegnati valori variabili da 0.05 m a 0.5 m.

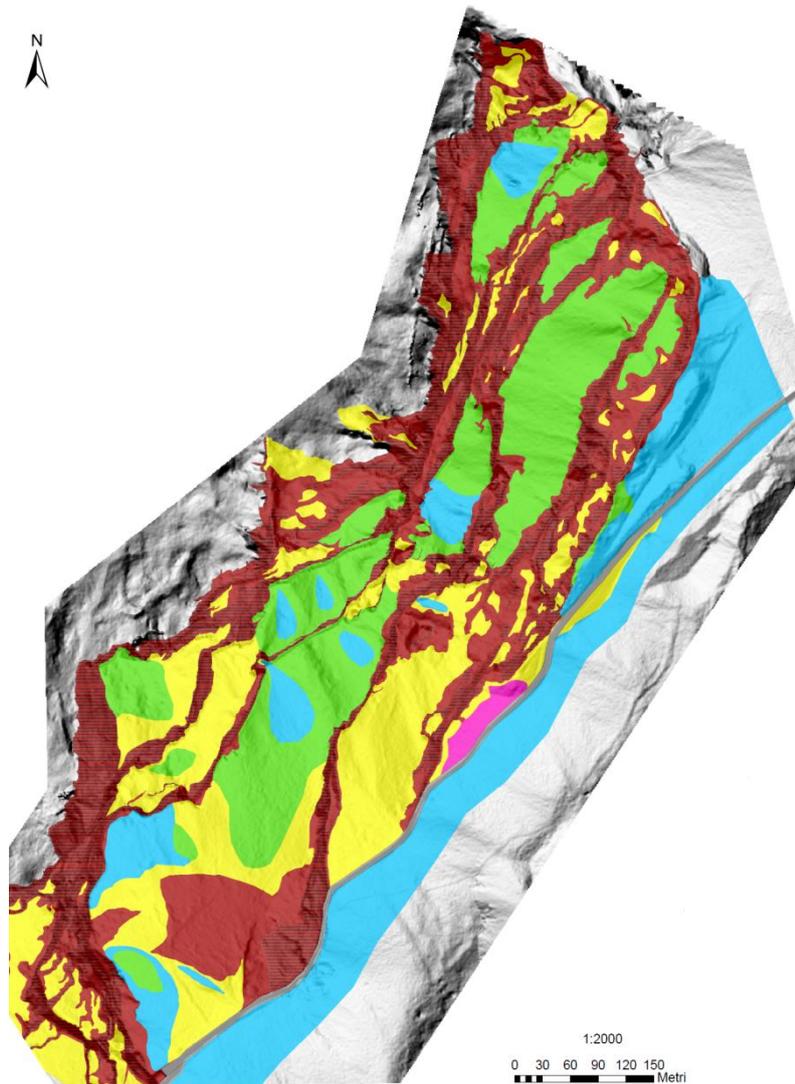
Nei ghiaioni (soiltype pari a 3) viene assegnato un  $rg_{70}$  elevato in quanto la componente grossolana risulta dominante, mentre in alcuni casi sono stati assegnati valori di  $rg$  anche per il suolo di tipo sub-affiorante, per la presenza saltuaria di asperità rocciose.

### Tipo di suolo

Il rilevamento di campagna e le osservazioni fotografiche hanno fornito delle informazioni relative al tipo di suolo presente sulla parete in questione, riportato già nella carta geomorfologica (Allegato A3).

Da tale carta, seguendo i criteri illustrati in Tabella 11 Tabella 11 - Tipi di suolo (soiltypes) usati dal software Rockyfor3D con i relativi range e medie dei valori del coefficiente di restituzione ( $R_n$ ) (Dorren, 2012), è stata creata la carta dell'uso del suolo quale input nr. 10 per la simulazione numerica, riportata in Allegato A3. Tale carta conferma quanto detto in precedenza a riguardo della presenza di corpi detritici alla base delle varie cenge della parete.

Allo scopo di fornire un'indicazione sulla localizzazione delle aree sorgenti, nella carta dell'uso del suolo tali zone vengono rappresentate in rosso "a strisce" essendo roccia affiorante potenzialmente soggetta a crolli.



*Figura 90 - Carta dell'uso del suolo (Allegato A3) adottata per le simulazioni numeriche. La legenda è rappresentato dalla Tabella 11.*

### **File di output**

Tra i file di output prodotti dal software Rockyfor3D, vengono considerati quelli che rappresentano i valori al 95° percentile del livello di confidenza (95° cl) sia in fase di dimensionamento delle barriere sia in fase di assegnazione delle classi di pericolosità. Per la valutazione grafica attraverso il software Statistica, invece, vengono presi in considerazione i valori medi da una curva gaussiana di fitting.

Gli autori consigliano di preferire il parametro di output Reach\_probability.asc al parametro Nr\_passing, in quanto fornisce delle informazioni più accurate e considera maggiormente l'aspetto

probabilistico. A tale scelta tuttavia è necessario associare una condizione molto importante senza della quale perde di significato, ovvero l'adottare un numero di lanci per cella che sia almeno pari a 100. In virtù di ciò, e per l'enorme mole di dati da elaborare da parte del programma che non permette tale computazione, si ritiene inadeguato adoperare il file output Reach\_probability.

### **7.2.3.2 Applicazione del software**

L'esecuzione di molte simulazioni numeriche di caduta massi, seguendo quanto consigliato degli autori, ha fornito chiare informazioni sull'influenza di alcuni parametri in gioco.

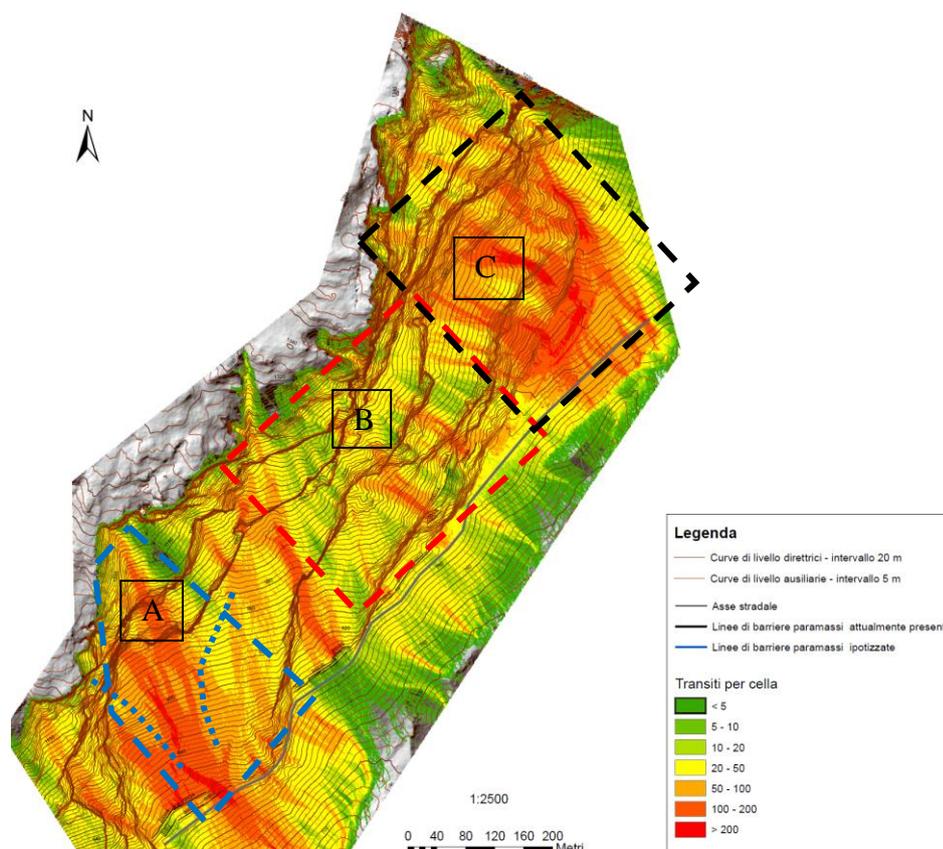
Allo scopo di fornire delle informazioni importanti sul dimensionamento delle barriere paramassi da applicare (quale opera scelta in accordo con il committente), sono stati valutati i risultati delle simulazioni quali: transiti, altezze di volo ed energie cinetiche totali (traslazionale e rotazionale) riferiti alla cella unitaria. Pertanto la scelta ottimale della posizione e delle caratteristiche di resistenza energetica delle barriere ipotizzate, rappresenta un punto accordo tra quelle ottenute nei singoli parametri. Tali rappresentazioni, vengono riportate in Tavola S1, S2 ed S3, associate a quelle relative alla situazione in presenza delle medesime opere di protezione.

Le analisi sulle altezze di volo permettono di individuare delle zone, all'interno delle quali, si esplicano traiettorie inferiori ad un certo valore soglia. Questo in genere è relazionato all'altezza di intercettazione delle opere che consentono di arrestare blocchi che posseggono contenuti energetici desumibili dall'Allegato A2. Con il continuo confronto tra le due immagini è dunque possibile individuare la posizione, l'altezza delle barriere e la loro classe energetica MEL.

Il passo successivo è la verifica del modello con la simulazione delle barriere stesse.

A titolo di esempio, in Figura 91 viene riportato l'effetto della morfologia sulle traiettorie dei massi simulati, attraverso l'analisi dei

transiti sul pendio. In questo caso è stato utilizzato un DTM con risoluzione della maglia pari a 1m x 1m, sono stati simulati 88092 blocchi con una frequenza unitaria per cella e variazione del volume pari al 20%.



*Figura 91 - Condizionamento morfologico sulle traiettorie in presenza delle sole opere di mitigazione già posizionate.*

La Figura 91, presente anche in Tavola S1, evidenzia abbastanza bene le zone maggiormente soggette al transito potenziale di massi. In virtù di ciò l'area è stata suddivisa in tre settori detti A, B e C.

Con un primo sguardo si osserva un buon condizionamento della morfologia sulle traiettorie, che porta a convogliare un gran numero di transiti all' interno di due canali, entrambi con andamento nord-ovest sud-est. Al di fuori di questi due collettori si nota una distribuzione piuttosto omogenea dei transiti, favorita in questo dalla presenza di elementi morfologici costituiti da superfici inclinate poco articolate.

Con l'aiuto delle rappresentazioni relative alle altezze di volo ed alle energie cinetiche per cella (Tavola S2 ed S3), vengono ricavate informazioni relative al dimensionamento delle barriere paramassi distinte nei tre settori individuati, di seguito riportate.

Va ricordato tuttavia che, in virtù di quanto evidenziato dai rilievi sul campo e dalle analisi di stabilità, nella parte medio - alta di tutta la parete vi è una elevata possibilità di crolli, anche se di dimensioni non ragguardevoli.

#### Zona A

Questa zona nella parte medio – bassa presenta un'estesa superficie nella cui parte basale le traiettorie convergono, evidenziate nelle rappresentazioni dal colore rosso (come maggior frequenza di passaggi). In particolare si osserva che le barriere rigide, di vecchia concezione, pur efficaci con massi di piccole dimensioni, vanno in crisi con volumi più consistenti, anche se minori di un metro cubo. Pertanto l'area pare essere ben predisposta per accogliere opere paramassi capaci di limitare molto i passaggi verso la sede stradale.

#### Zona B

Nella zona B la presenza di barriere deformabili di classe energetica MEL 2000 kJ alte 5 metri, risultano in grado di trattenere efficacemente i volumi simulati. Gli unici superamenti si registrano in presenza della barriera rigida alta solo 2 metri e posta all'estremità inferiore dell'area.

#### Zona C

Area nella quale le traiettorie interessano una porzione di parete più verticale, rispetto a i due settori appena analizzati. Questa particolarità rende più complesso il posizionamento di linee di difesa. Fortunatamente la presenza di un'area di cava dismessa consente di intercettare e arrestare un buon numero di traiettorie, per la presenza di argini artificiali atti a intercettare i crolli. Le simulazioni dimostrano l'efficacia di tali opere. Si riporta inoltre la presenza (riportato in Figura 35) a bordo strada di un accumulo di materiale detritico di piccola pezzatura con elementi più grossi (diametri fino a 60-70 cm). I distacchi

possono provenire da un'altezza massima di 10-15 metri, ma verticalmente al piano stradale.

Adottando una diversa maglia del raster DTM, il quale fornisce la risoluzione dalla quale si sviluppano tutti gli altri file di input ed output, non si osserva una grande differenza. In particolare, effettuando le simulazioni numeriche mediante un DTM 1x1 re-classificato ad una maglia 5m x 5m ed allo scopo di mantenere una proporzione con quelle effettuate in precedenza, sono stati simulati 88750 massi con una frequenza di 25 lanci per cella. Il numero più elevato di massi rafforza l'aspetto statistico, tuttavia, come accennato in precedenza, si hanno dei svantaggi sulla qualità delle traiettorie.

### **7.2.3.3 Analisi statistica dei risultati**

Come accennato in precedenza, dalle simulazioni numeriche effettuate con il software Rockyfor3D, mediante l'uso del software ArcGIS 10.1, sono stati estratti due file di testo e alcune rappresentazioni in formato raster per definire l'andamento dei parametri studiati relativi alla singola cella restar, ovvero la frequenza di transito, l'energia cinetica e l'altezza di volo.

Poiché l'elemento in pericolo in questo lavoro di tesi è rappresentato dalla strada statale, la medesima viene considerata come una rete virtuale, adeguatamente suddivisa per apprezzare la variabilità locale dei parametri studiati. Pertanto, il tratto stradale è stato suddiviso in 9 tratti, indicati in Allegato A11 e A12 da un indice numerico, dall'1 al 9, che si riferisce a quello presente nel DB GIS.

Allo scopo di attribuire un grado di pericolosità cui sono soggetti i tratti stradali in studio, sono state valutate le condizioni risultanti dalle simulazioni rispetto a quelle definite in precedenza per distinguerne le classi. In virtù di ciò sono stati individuati, per ogni tratto stradale, i valori corrispondenti ai seguenti parametri:

- numero transiti nel tratto stradale (Nr transiti);

- percentuale del Nr transiti rispetto al totale (%);
- numero di transiti con energia cinetica massima superiore a 1500kJ (Nr transiti con en. cin. > 1500 kJ);
- percentuale di quest'ultimo rispetto al numero transiti in quel tratto (%);
- numero di transiti con energia cinetica massima superiore a 1500kJ (Nr transiti con en. cin. > 1500 kJ);
- percentuale di quest'ultimo rispetto al numero transiti in quel tratto (%);
- rapporto tra il numero transiti per cella su quel tratto stradale ed il numero di lanci per cella (Nr transiti/Nr lanci per cella).

Sono state eseguite simulazioni attribuendo un carattere variabile ai parametri:

- numero lanci per cella in funzione della risoluzione del DTM;
- tipo di suolo (considerando)

Al fine di ottenere stime statisticamente sufficienti, gli autori del software consigliano di attribuire il valore del parametro *lanci per cella* almeno pari a 100, tuttavia a causa della notevole mole di dati da elaborare vista la dimensione dell'area, tale soglia è stata attribuita solo ai casi in cui veniva usata una risoluzione del DTM pari a 5m x 5m.

Allo scopo di ottenere un confronto ragionevole dal punto di vista della frequenza di lanci in funzione della risoluzione del DTM adottato, in questa tesi vengono presi in considerazione solo i seguenti casi:

- situazione iniziale con risoluzione del DTM pari 1m x 1m e 1 lancio per cella;
- situazione iniziale con risoluzione del DTM pari 5m x 5m e 25 lanci per cella;
- situazione finale con risoluzione del DTM pari 1m x 1m e 1 lancio per cella;
- situazione finale con risoluzione del DTM pari 5m x 5m e 25 lanci per cella.

Per tutte le situazioni i parametri mantenuti fissi sono i seguenti:

- variazione del volume dei blocchi pari al 20%;
- caratteristiche del file .shp soiltype (tipo di suolo, densità, rugosità, forma dei blocchi ), comprese le zone sorgente;

Vengono così riportati in Tabella 13 ed in Tabella 14 valori relativi alla situazione iniziale adottando una risoluzione del DTM pari a 1m x 1m e 5m x 5m per i 9 tratti stradali studiati per i quali sono stati simulati rispettivamente 88092 e 88750 massi.

<b>ID tratto</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
<b>Nr transiti</b>	4350	7494	2559	1369	2604	1246	691	2527	11012
<b>%</b>	4.9	8.5	2.9	1.6	3.0	1.4	0.8	2.9	12.5
<b>Nr transiti con alt. volo &gt; 5m</b>	1143	3402	795	434	436	188	107	342	1322
<b>%</b>	26.3	45.4	31.1	31.7	16.7	15.1	15.5	13.5	12.0
<b>Nr transiti con en. cin. &gt; 1500 kJ</b>	1594	4171	937	417	670	226	94	221	1351
<b>%</b>	36.6	55.7	36.6	30.5	25.7	18.1	13.6	8.7	12.3
<b>Nr transiti / Nr lanci per cella</b>	4350	7494	2559	1369	2604	1246	691	2527	11012

*Tabella 13 - Risultati dell'analisi statistica dei transiti residuali sui 9 tratti stradali (reti virtuali) per la situazione iniziale adottando un DTM con maglia pari a 1m x 1m. In riferimento ad ogni rete virtuale vengono evidenziati i transiti totali e percentuali, quelli con altezza superiore ai 5m e con energia cinetica superiore a 1500 kJ e il rapporto tra il numero di transiti e il numero di lanci per cella.*

ID tratto	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Nr transiti</b>	5978	8467	2659	1719	3010	2302	963	3754	15204
<b>%</b>	6.7	9.5	3.0	1.9	3.4	2.6	1.1	4.2	17.1
<b>Nr transiti con alt. volo &gt; 5m</b>	1676	2968	885	657	446	172	266	215	2278
<b>%</b>	28.0	35.1	33.3	38.2	14.8	7.5	27.6	5.7	15.0
<b>Nr transiti con en. cin. &gt; 1500 kJ</b>	3642	5951	1303	894	1243	512	375	418	2366
<b>%</b>	60.9	70.3	49.0	52.0	41.3	22.2	38.9	11.1	15.6
<b>Nr transiti / Nr lanci per cella</b>	239	339	106	69	120	92	39	150	608

*Tabella 14 - Risultati dell'analisi statistica dei transiti residuali sui 9 tratti stradali (reti virtuali) per la situazione iniziale adottando un DTM con maglia pari a 5m x 5m. In riferimento ad ogni rete virtuale vengono evidenziati i transiti totali e percentuali, quelli con altezza superiore ai 5m e con energia cinetica superiore a 1500 kJ e il rapporto tra il numero di transiti e il numero di lanci per cella.*

Questi dati, vengono poi analizzati e confrontati nel capitolo 7.4 con quelli relativi alla situazione finale, in presenza delle opere di protezione.

## **7.3 Valutazione della pericolosità finale**

### **7.3.1 Applicazione del software con le opere di protezione**

In virtù di quanto appreso dalle simulazioni numeriche relative alla condizione iniziale e dalle richieste del committente, sono state adottate le disposizioni delle barriere indicate in fase di dimensionamento.

Le caratteristiche di tali opere, riportate in Tabella 15 sono state assegnate considerando quindi i valori di transito, di energia cinetica e di altezza di volo relativi ai risultati ottenuti.

Numero	Energia cinetica [kJ]	Altezza di volo [m]	Lunghezza [m]
28	5000	6	110.7
29	3000	5	69.9
30	3000	5	120.7
31	2000	5	40.2
32	3000	5	60.7
33	3000	6	59.7
34	2000	6	24.3
35	3000	6	41.2
36	3000	6	53.3
37	3000	4	65.9
38	3000	5	37.6
39	3000	5	26.6
40	3000	4	40.2
41	3000	4	71.2
42	3000	5	53.5

Tabella 15 - Caratteristiche delle barriere paramassi ipotizzate con i relativi valori geometrici (altezza e lunghezza) e di resistenza energetica.

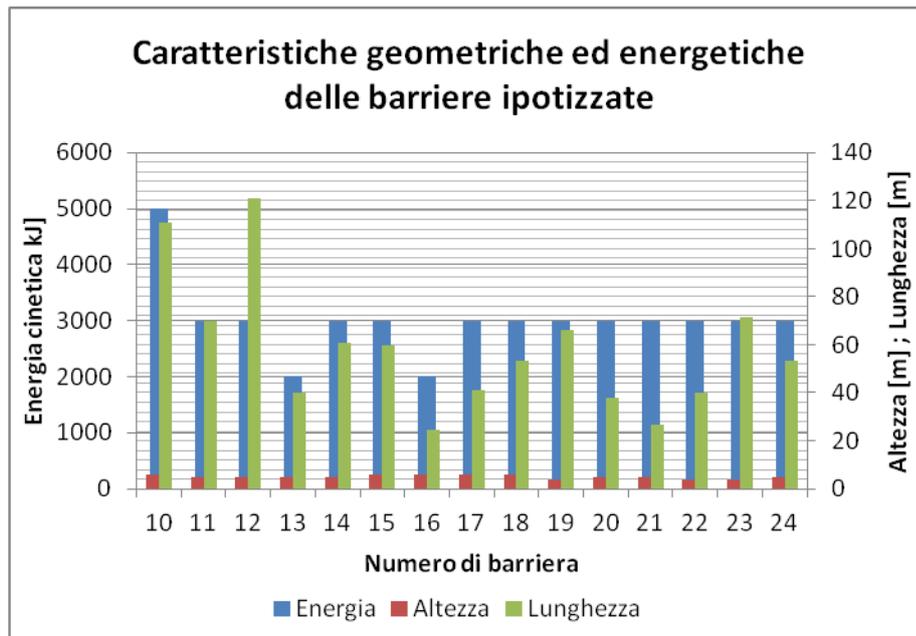


Figura 92 - Sintesi delle caratteristiche geometriche ed energetiche delle barriere attualmente presenti. Nel grafico vengono riuniti i valori di resistenza energetica (ordinata sinistra) e quelli di altezza e lunghezza (ordinata destra) in due scale diverse.

Dalla Tabella 15 e dalla Figura 92 si osserva che gran parte delle barriere ipotizzate sono caratterizzate prevalentemente da una resistenza energetica di 3000 kJ ed altezza rispettivamente pari a 5m.

Per la visualizzazione dell'influenza della morfologia sul numero di transiti confronto si rimanda alla visione delle Tavole S1, S2 ed S3 nelle quali si osserva il grado di mitigazione avvenuto tra le due condizioni dal punto di vista qualitativo.

### 7.3.2 Analisi statistica dei risultati

Per l'analisi della situazione finale è stato utilizzato lo stesso criterio statistico adottato per quella iniziale. Vengono così riportati in Tabella 16 e Tabella 17 i valori relativi alla situazione iniziale adottando una risoluzione del DTM pari a 1m x 1m e 5m x 5m per i 9 tratti stradali studiati

Anche per questi due casi sono stati simulati rispettivamente 88092 e 88750 massi.

ID tratto	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Nr transiti</b>	1080	1949	1485	415	1115	639	583	1538	3104
<b>%</b>	1.2	2.2	1.7	0.5	1.3	0.7	0.7	1.7	3.5
<b>Nr transiti con alt. volo &gt; 5m</b>	293	431	169	66	86	89	85	161	180
<b>%</b>	27.1	22.1	11.4	15.9	7.7	13.9	14.6	10.5	5.8
<b>Nr transiti con en. cin. &gt; 1500 kJ</b>	425	203	32	64	145	116	90	136	303
<b>%</b>	39.4	10.4	2.2	15.4	13.0	18.2	15.4	8.8	9.8
<b>Nr transiti / Nr lanci per cella</b>	1080	1949	1485	415	1115	639	583	1538	3104

Tabella 16 - Risultati dell'analisi statistica dei transiti residuali sui 9 tratti stradali (reti virtuali) per la situazione finale adottando un DTM con maglia pari a 1m x 1m. In riferimento ad ogni rete virtuale vengono evidenziati i transiti totali e percentuali, quelli con altezza superiore ai 5m e con energia cinetica superiore a 1500 kJ e il rapporto tra il numero di transiti e il numero di lanci per cella.

ID tratto	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Nr transiti	1171	1989	1344	325	1192	1059	662	2186	4636
%	1.3	2.2	1.5	0.4	1.3	1.2	0.7	2.5	5.2
Nr transiti con alt. volo > 5m	343	121	61	57	46	67	92	72	227
%	29.3	6.1	4.5	17.5	3.9	6.3	13.9	3.3	4.9
Nr transiti con en. cin. > 1500 kJ	583	76	26	62	232	156	134	117	715
%	49.8	3.8	1.9	19.1	19.5	14.7	20.2	5.4	15.4
Nr transiti / Nr lanci per cella	46.84	79.56	53.76	13	47.68	42.36	26.48	87.44	185.44

*Tabella 17 - Risultati dell'analisi statistica dei transiti residuali sui 9 tratti stradali (reti virtuali) per la situazione finale adottando un DTM con maglia pari a 5m x 5m. In riferimento ad ogni rete virtuale vengono evidenziati i transiti totali e percentuali, quelli con altezza superiore ai 5m e con energia cinetica superiore a 1500 kJ e il rapporto tra il numero di transiti e il numero di lanci per cella.*

## **7.4 Mitigazione della pericolosità da caduta massi**

Questo paragrafo ha lo scopo di evidenziare, da un punto di vista quantitativo, il grado di pericolosità da caduta massi attuale ed in presenza di opere di protezione cui è soggetto l'asse e di valutarne la mitigazione.

In particolare vengono considerati due tipi di risoluzione del DTM, introdotti nel capitolo 7.2 e 7.3, mediante l'analisi dei valori di frequenza di transito, altezza di volo ed energia cinetica massima, registrati lungo l'asse stradale. I risultati delle simulazioni sono sintetizzati nelle 9 tabelle in Tavola S4b. Tali tabelle, derivate da quelle riportate nei capitoli 7.2.3.3 e 7.3.1, sono state organizzate in funzione del numero di tratto stradale.

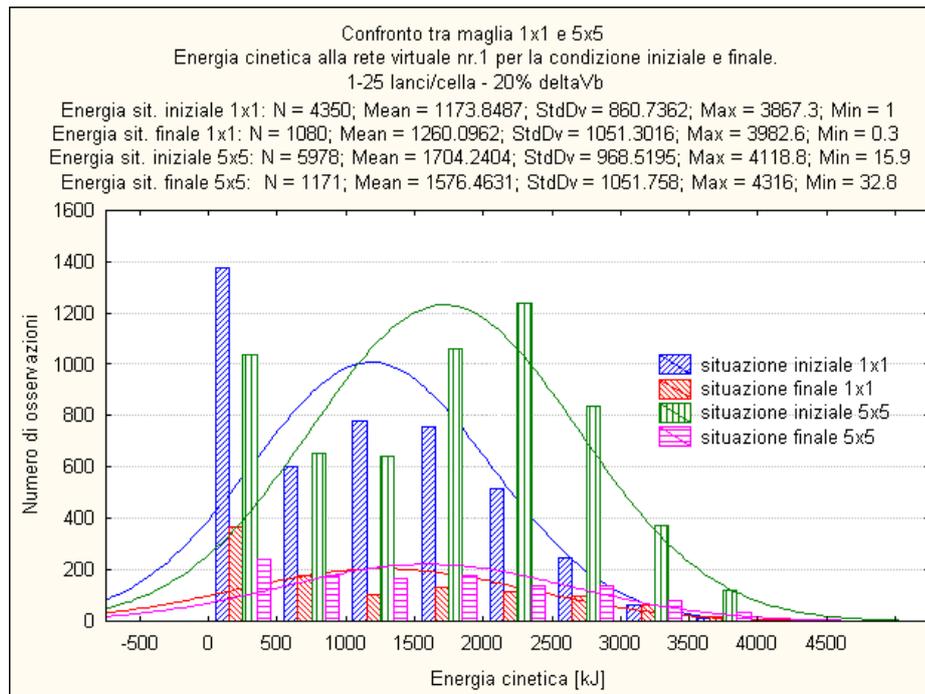
Secondo il criterio descritto in precedenza, la classe massima di pericolosità viene attribuita qualora sia soddisfatta una delle seguenti condizioni:

- altezza di volo  $> 5$  m;
- energia cinetica  $> 1500$  kJ;
- rapporto (nr transiti / nr lanci per cella)  $> 20$

Le 4 situazioni considerate vengono analizzate attraverso due tipi di rappresentazioni di seguito presentate.

- Forma grafica: per ogni settore indagato, viene riportato un istogramma delle altezze di transito e delle altezze di volo, con i relativi valori massimi, minimi, medi e di deviazione standard, creato con il software Statistica; ad ognuno di essi è associato un fitting del tipo normale-gaussiano. In Tavola S4a vengono riportati complessivamente 18 grafici.
- Forma tabellare: per ogni settore indagato, viene riportata una tabella costituita dagli stessi parametri analizzati nella forma grafica, tuttavia valutando la variazione analitica e percentuale di tali valori che rappresenta la mitigazione della pericolosità.

In seguito, a titolo di esempio, in Figura 93 e e in Tabella 18 vengono riportati i grafici e la tabella relativo all'andamento dell'energia cinetica e dell'altezza di volo registrate alla rete virtuale nr. 1 posta in prossimità dall'entrata della galleria, per la situazione iniziale e finale, considerando un DTM con maglia di 1m x1m e di 5m x 5m.



*Figura 93 – Confronto dell'andamento dell'energia cinetica massima relativo alla rete virtuale nr.1 per la condizione iniziale e finale adottando un DTM con risoluzione di 1m x 1m e 5m x 5m. Vengono evidenziati i valori medi, massimi e minimi e la deviazione standard. Come fitting viene utilizzato quello di tipo normale.*

Dalla Figura 93 è possibile dedurre le seguenti informazioni:

- l'andamento dei valori di altezza di volo sembra seguire un trend esponenziale
- i valori medi per la situazione finale (1260kJ e 1576kJ) rispetto a quella iniziale (1173kJ e 1704kJ), non sono di molto minori, tuttavia il numero di osservazioni è di circa un quinto inferiore.
- la situazione iniziale avente un DTM con risoluzione pari 5m x 5m presenta dei valori di energia cinetica maggiore rispetto a quella avente DTM con risoluzione pari a 1m x 1m.

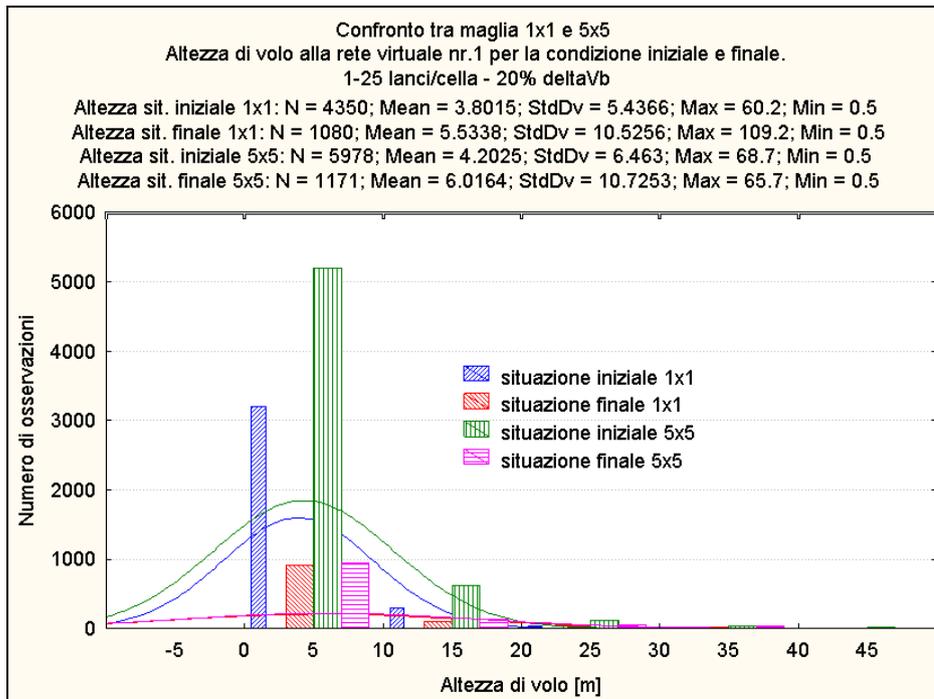


Figura 94 - Confronto dell'andamento dell'altezza di volo relativo alla rete virtuale nr.1 per la condizione iniziale e finale adottando un DTM con risoluzione di 1m x 1m e 5m x 5m. Vengono evidenziati i valori medi, massimi e minimi e la deviazione standard. Come fitting viene utilizzato quello di tipo normale.

Dalla Figura 94 è possibile dedurre le seguenti informazioni:

- l'andamento dei valori di altezza di volo sembra seguire un trend esponenziale;
- i valori medi per la situazione finale (6m e 5m) rispetto a quella iniziale (3.8m e 4.2m), non sono di molto minori, tuttavia il numero di osservazioni è di circa un quinto inferiore.
- I valori corrispondenti alla situazione con risoluzione del DTM pari a 5m x 5m sono in genere maggiori di quelli con risoluzione pari a 1m x 1m.

<b>Rete virtuale nr 1</b>				
<b>Situazione</b>	<b>Iniziale 1x1</b>	<b>Finale 1x1</b>	<b>Iniziale 5x5</b>	<b>Finale 5x5</b>
<b>Nr lanci totale</b>	88092	88092	88750	88750
<b>Nr transiti</b>	4350	1080	5978	1171
<b>Soglia 5%cl nr transiti</b>	218	54	299	59
<b>Nr transiti con altezza di volo &gt; 5m</b>	1143	293	1676	343
<b>%</b>	26.3	27.1	28.0	29.3
<b>Variazione</b>	850.0		1333.0	
<b>Classe Pericolosità 5%cl</b>	P4	P4	P4	P4
<b>Nr transiti con energia cinetica &gt; 1500 kJ</b>	1594	425	3642	583
<b>%</b>	36.6	39.4	60.9	13.4
<b>Variazione</b>	-1169.0		-3059.0	
<b>Classe Pericolosità 5%cl</b>	P4	P4	P4	P4
<b>Nr transiti / Nr lanci per cella &gt; 20</b>	4350	1080	239.12	46.84
<b>Variazione</b>	-3270		-192.28	
<b>Classe Pericolosità 5%cl</b>	P4	P4	P4	P4

Tabella 18 - Risultati della mitigazione del grado di pericolosità relativi alla rete virtuale nr 1.

Dalla Tabella 18 è possibile dedurre le seguenti informazioni:

- i valori di soglia dei transiti considerando un 95% percentile sono rispettivamente 218, 54, 299 e 59;
- la soglia del 95% di massi trattenuti è stata passata per tutti i parametri, pertanto al tratto numero 1 viene attribuita la classe di massima pericolosità;
- in tutti i casi c'è stata una diminuzione dei valori dei parametri;
- il parametro che si avvicina di più alla soglia di passaggio alla classe P3 - Area critica recuperabile è l'energia cinetica, in particolare nella situazione finale in cui viene adottato un DTM con risoluzione pari a 5m x 5m.

Complessivamente, osservando le Allegati A11e A12, l'applicazione delle nuove barriere paramassi sulla parete est del monte Prada, aventi le caratteristiche geometriche ed energetiche attribuite, permette un minore numero di transiti sull'asse stradale e quindi una mitigazione della pericolosità da caduta massi. Tuttavia, la notevole soglia del 95° percentile, non ha permesso la declassazione di alcuni tratti stradali da P4 a P3 caratterizzati da un'esigua quantità di transiti rispetto ad altri, come ad esempio il tratto nr. 4.

Inoltre si osserva che il fitting di tipo normale-gaussiano non si adatta bene all'andamento dell'energia e soprattutto a quello dell'altezza di volo; infatti spesse volte sarebbero più adeguati fitting di tipo binomiale oppure esponenziale.

## Capitolo 8 Conclusioni

Questo lavoro di tesi ha avuto lo scopo di stimare il grado di pericolosità da caduta massi dalla parete est del monte Prada su di un tratto della ss 421 tra San Lorenzo in Banale e Molveno, mediante analisi geomorfologica – strutturale, valutazioni geomeccaniche, analisi di stabilità e simulazioni numeriche di caduta massi nella condizione attuale. Successivamente si è cercato di verificare quali interventi di mitigazione del rischio fossero maggiormente adatti al caso.

Il rilevamento geologico – strutturale – geomorfologico e geomeccanico di campagna, referenziato su base Laser Scanner Terrestre, ha permesso di definire i settori della parete più ammalorati e soggetti a crolli attivi e probabili; definire le orientazioni e spaziature prevalenti delle discontinuità quali piani di strato, fratturazione e di taglio; indicare una stima dell'intervallo di variabilità dei volumi rocciosi unitari.

In particolare, l'analisi geomorfologica, condotta dapprima con l'aiuto del LiDAR e poi mediante rilevamento di campagna, ha portato alla definizione delle morfologie e dei tipi di depositi presenti sulla parete est del monte Prada. Tali indicazioni sono poi state utilizzate in sede di simulazione numerica per capire l'effetto di condizionamento delle traiettorie di caduta massi.

L'analisi strutturale, effettuata sia alla macroscale che alla mesoscale sempre nella formazione dell'Oolite di Massone, sulla base delle considerazioni di inquadramento tettonico regionale, ha messo in luce alcuni elementi tettonici quali fattori predisponenti cinematismi di diverso genere e determinanti la complessa evoluzione tettonica subita dall'area.

L'analisi di stabilità effettuata con il software SLIDE 6.0 ha permesso di dare un'indicazione quantitativa del grado di stabilità di

alcuni blocchi rocciosi posti in prossimità del ciglio della parete. Tra i vari casi analizzati, sono stati evidenziati due situazioni tipo caratterizzanti di tale insieme: la prima in cui il blocco roccioso è svincolato da una superficie di rottura e la seconda in cui il blocco roccioso è coeso al resto della parete. I criteri usati sono rispettivamente quello di Barton-Bandis e gen.Hoek & Brown e in entrambi i casi è stato considerato l'ammasso roccioso omogeneo (un materiale) e eterogeneo (due materiali).

Considerando i vari limiti del programma e le assunzioni fatte, sono state operate le seguenti conclusioni:

- l'angolo delle superfici di rottura è risultato generalmente nell'ordine dei 60°-70°;
- la condizione geomeccanica dell'ammasso roccioso attualmente e mediamente riscontrata è lontana da quella critica in quanto il FS critico si ha per valori di GSI pari a 20-25 mentre quelli assunti come reali sono pari a 40-70.

In conclusione si è osservato che generalmente i blocchi di grandi dimensioni (maggiori di 20 mc) non hanno i requisiti per poter crollare, tuttavia, dai medesimi, in virtù delle condizioni locali molto fratturate (VRU), possono svilupparsi fenomeni di crollo di minori dimensioni, capaci di spaccarsi ulteriormente. Le grandi nicchie di distacco hanno permesso di fotografare i residui della passata condizione limite e di stimare la non attualità di una nuova condizione di innesco di criticità nelle zone retrostanti, almeno per tempi di ritorno centenari.

Dalle simulazioni numeriche di caduta massi effettuate con il software Rockyfor3D si è potuto notare il grado d'influenza della variabilità dei parametri di input sulle traiettorie di crollo, valutandone la frequenza di transito, i valori di energia cinetica e di altezza di volo sulle barriere virtuali disposte sulla strada statale. In particolare sono stati considerati variabili la risoluzione della maglia dei raster derivante dal Dtm da 1m x 1m a 5m x 5m, l'uso del suolo dapprima corretto e poi

il numero di lanci per cella sorgente da 1 a 100 in funzione della risoluzione usata.

Tali aspetti hanno permesso di quantificare il grado di pericolosità da caduta massi, secondo il criterio adottato nella situazione attuale e in quella finale in seguito al dimensionamento di alcune barriere paramassi con adeguate caratteristiche geometriche (posizione, lunghezza ed altezza) e di resistenza energetica.

Infine, in virtù dei risultati ottenuti dalle simulazioni numeriche e dalle analisi statistiche, emerge la reale possibilità di operare una certa mitigazione della pericolosità da caduta massi, pur individuando in una ulteriore galleria l'elemento chiave di un approccio di recupero definitivo del rischio. Dalle analisi prodotte, basate su un DTM di massima risoluzione e inserendo adeguati elementi di controllo delle traiettorie nei punti evidenziati dall'analisi e caratteristici per altezza di volo contenuta, per frequenza di passaggi e per valori di energia traslazionale sostenibili, si ritiene tuttavia di potersi raggiungere un buon grado di mitigazione della pericolosità da crolli relativamente a masse di volume contenuto nell'ordine dei 3-5 mc. E' evidente che per masse di volume maggiore le gravose condizioni cinematiche risultanti pongono fuori gioco il ricorso alle barriere deformabili e indicano quale unica soluzione vincente il ricorso alla galleria artificiale o, auspicabilmente naturale e in prosecuzione di quella recentemente realizzata. E' tuttavia innegabile che in valutazioni di tale ordine, tenendo conto delle disponibilità economiche del momento, va considerato ragionevolmente anche il tempo di ritorno di un crollo di volume eccezionale. Un contributo a valutazioni di questo tipo deriva dall'analisi delle condizioni di stabilità attuali dei grandi corpi rocciosi semidislocati osservati in parete e per i quali è stata stimata una condizione di stabilità ancora distante dalle condizioni limite.

## Bibliografia

ABRAMSON, L.W., LEE, T.S., SHARMA, S. AND BOYCE, G.M. (2001) *Slope Stability and Stabilization Methods*, 2nd edition, John Wiley & Sons.

ADHYKARY D. P., MUHLHAUS H. B. & DYSKIN A.V. (2000) *A numerical study of flexural buckling of foliated rock slopes*.

APAT - Dipartimento difesa del suolo - Servizio Geologico d'Italia (2005) *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 – Foglio 059 TIONE DI TRENTO*.

AYDIN, A. & BASU, A. (2005) *The Schmidt hammer in rock material characterization*. *Engineering Geology* 81, pp. 1 –14.

BARONI C., CAVALLIN A., OROMBELLI G. & SAURO U. (1990) *Guida all'escursione B2 "Geomorfologia e tettonica recente dell'area benacense"*. 75° Congr. Soc. Geol. It., 25pp.

BARTH G.A., KLEINROCK M.C. & HELZ R.T. (1994) *The magma body at Kilauea Iki lava lake: Potential insights into mid-ocean ridge magma chambers*. *Journal of Geophysical Research* 99: doi: 10.1029/93JB02804. issn: 0148-0227.

BARTON, N., LIEN, R. & LUNDE, J. (1974) *Engineering classification of rock masses for the design of tunnel support*. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 6 (4), 189-236.

BARTON, N. & CHOUBEY, V. (1977) *The shear strength of rock joints in theory and practice*. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 10 (1-2), 1-54.

BERTOLO P., OGGERI C. & PEILA G. (2009) *Full-scale testing of draped nets for rock fall protection*. Canadian Geotechnical Journal, NCR Research Press, pp. 12, 2009, Vol. 46 , pp. 306-317, ISSN: 0008-3674, DOI: 10.1139/T08-126.

BIENIAWSKI, Z.T. (1976) *Rock mass classification in rock engineering*. In: Proceedings of the Symposium on Exploration for Rock Engineering, Johannesburg, A. A. Balkema Publication, Volume 1, 97-106.

BIENIAWSKI, Z.T. (1989) *Engineering Rock Mass Classifications*. John Wiley & Sons.

BISHOP A.W. (1955) *The Use of the Slip Circle in the Stability Analysis of Slopes*. Geotechnique, Great Britain, Vol. 5, No. 1, Mar., pp. 7-17.

BORSATO A., FRISIA S., CORRADINI F., LONGINELLI A., ARTIOLI G., SANTULIANA E., GIALANELLA S., SELMO E., ANGELI P., LUTTEROTTI L., LAURO C. & AVANZINI M., (2000) *Acquiferi carsici in Trentino: caratteristiche chimico-fisiche, vulnerabilità e inquinamento*. Provincia Autonoma di Trento. Rapporto interno, 270.

BOSELLINI A. & BROGLIO LORIGA C. (1971) *I "Calcari Grigi" di Rotzo (Giurassico Inferiore, Altopiano di Asiago) e loro inquadramento nella paleogeografia e nella evoluzione tettono - sedimentaria delle Prealpi Venete*. Annali dell'Università di Ferrara, sez.IX, 5 (1), pp. 1-61, Ferrara.

BRESSAN G., SNIDARCIG A. & VENTURINI C. (1998) *Present state of tectonic stress of the Friuli area (Eastern Southern Alps)*. Tectonophysics, 292, 211-227.

BRUSCHI A. (2004) *Meccanica delle rocce nella pratica geologica ed ingegneristica*. Dario Flaccovio Editore.

CAI M., P.K. KAISER, TAsAKA Y., MAEJIMA T., MORIOKA H., & MINAMI M. (2004) *Generalized crack initiation and crack damage stress thresholds of brittle rock masses near underground excavations*. Int J Rock Mech Min Sci 41: 5, 833-847.

CASTELLARIN A. A., CANTELLI L., FESCE A.M., MERCIER J., PICOTTI V., PINI, G.A., PROSSER G. & SELLI L. (1992) *Alpine compressional tectonics in the southern Alps. Relations with the N-Apennines*. Ann. Tect 6, 62±94

CASTELLARIN A., NICOLICH R., FANTONI R., CANTELLI L., SELLA M. & SELLI M. (2006a) - *Structure of the lithosphere beneath the Eastern Alps (southern sector of the TRANSALP transect)*. Tectonophysics 414, 259–282.

CASTELLARIN A., VAI G.B. & CANTELLI L. (2006b) - *The Alpine evolution of the Southern Alps around the Giudicarie faults: A Late Cretaceous to Early Eocene transfer zone*. Tectonophysics 414, 203–223.

CASTELLARIN A. SELLI L., PICOTTI V., CANTELLI L. (1998b) *La tettonica delle Dolomiti nel quadro delle Alpi Meridionali Orientali*. Mem. Soc. Geol. It. 53, 133±143.

CASTELLARIN A. (2009) *Basic stratigraphy and tectonics of the Southern Alps around the Giudicarie Lineament (Southern Alps, Italy)*. Ital.J.Geosci. (Boll.Soc.Geol.It.), Vol. 128, No. 2 (2009), pp. 409-417.

CAVERS D. S. (1981) *Simple methods to analyze buckling of rock slopes*. Rock Mechanics and Rock Engineering, 14.

CHIARABBA C., JOVANE, L. & DI STEFANO R. (2005) *A new view of Italian seismicity using 20 years of instrumental recordings*. *Tectonophysics*, 395, 251–268.

CHINAGLIA N. & FORNERO E. (1995) *Ipotesi sulla possibile evoluzione cinematica di un movimento profondo di versante: l'esempio del M. Soran (Trentino meridionale)*. *Mem. Soc. Geol. It.*, 50, 101-108.

C.N.R. (1991) *Structural Model of Italy. Scale 1:500.000, I-VI sheets*. Selca Publisher (Firenze).

CSPL – Consiglio Superiore per il Lavori Pubblici (2008) NTC - Norme tecniche per le costruzioni. [www.cslp.it](http://www.cslp.it)

CPTI Working Group (1999) *Catalogo parametrico dei terremoti italiani*. GNDT – ING – SGA - SSN (Editors) pp.88, printed by Tipografia Compositori, Bologna July 1999, available also from <http://emidius.itim.mi.cnr.it/CPTI>.

CRUDEN D.M. & VARNES D.J. (1996) *Landslide types and processes. in landslides investigation and mitigation*. Turner a.k. & schuster r.l. (eds), transportation research board, national research council, special report n. 247.

DAL PIAZ, G.V., BORTOLOTTI V., CASTELLARIN A., CITA M.B., D'ARGENIO B., PRATURLON A. & VANOSSI M. (1990) *Inquadramento strutturale e schema evolutivo della catena alpina, in Alpi dal M. Bianco al Lago Maggiore*. Guide Geologiche Regionali a cura della Società Geologica Italiana, pp. 30-46, edited by BE-MA editrice, via Teocrito 50 Milano.

D'AMICO C., DEL MORO A., FREDDO A. & PALDINI G. (1980) *Studio radiometrico delle ignimbriti riolitiche atesine*. Rend. Soc. It. Miner. Petrol., 36 (2), 70J-716.

D'AMICO e DEL MORO (1988) *Permian and Triassic Rb-Sr dating in the Permian rhyodacitic ignimbrites of Trentino (Southern Alps)*. Rend. Soc. It. Miner. Petrol., Vol. 43, pp. 180.

DEERE, D.U. (1963) *Technical description of rock cores for engineering purposes*. Felsmechanik und Ingenieurgeologie, Volume 1, No. 1, 16-22.

DEERE D.U. & MILLER R.P. (1966) *Engineering classification and index properties of rock*. Tech. Report Air Force Weapons Lab., New Mexico, 65-116.

DOGLIONI & BOSELLINI (1987) *Eoalpine and mesoalpine tectonics in the Southern Alps*. Geol. Rundschau, 76, 735-754, Stuttgart.

DORFMANN J., GASPARI A., NOSSING L., STRADA C.,(2006) *Analisi geomeccanica e di caduta massi tramite l'utilizzo di laser scanner terrestri per la realizzazione di opere di protezione lungo la SP 48 per Riva di Tures*. 10a Conferenza Nazionale ASITA 14-17 novembre 2006 Fiera di Bolzano.

DORREN L.K.A. (2003) *A review of rockfall mechanics and modelling approaches*. Progr. Phys. Geog. 27(1): 69-87

DORREN L.K.A. & BERGER F. (2006) *Stem breakage of trees and energy dissipation at rockfall impacts*. Tree Physiology 26, 2006, p. 63-71.

DORREN L.K.A., BERGER F. & PUTTERS U.S. (2006) *Real size experiments and 3D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes*. Nat. Haz. Earth Syst. Sci. 6: 145-153.

DORREN L.K.A. (2012) *Rockyfor3D (v5.1) revealed – Transparent description of the complete 3D rockfall model*. ecorisQ paper ([www.ecorisq.org](http://www.ecorisq.org)): 31 p.

DUNCAN, J.M. (2000) *Factors of safety and reliability in geotechnical engineering*. *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 126(4), 307–316.

EPOCH – EUROPEAN COMMUNITY PROGRAMME (1993) *Temporal occurrence and forecasting of landslides in the European Community*. Contratto No. 90 0025, J-C. Flageollet editore.

EOTA (2008) *ETAG – Guida per il benessere tecnico europeo di sistemi di protezione paramassi*. B - 1040 BRUSSELS, 54.

FRANCESCHI, M., G. TEZA , N. PRETO, A. PESCI , A. GALGARO & S. GIRARDI (2009), *Discrimination between marls and limestones using intensity data from terrestrial laser scanner*. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64, p.522-528.

GALADINI F., GALLI P., CITTADINI A., & GIACCIO B. (2001), *Late Quaternary fault movements in the Mt. Baldo-Lessini Mts. Sector of the Southalpine area (northern Italy)*. *Neth. J. Geosc.*, 80, 187-208.

GALADINI F., POLI M.E. & ZANFERRARI A. (2005) *Seismogenic sources potentially responsible for earthquakes with  $M > 6$  in the eastern Southern Alps (Thiene-Udine sector, NE Italy)*. *Geophysical Journal International*, 161, 739-762.

GALADINI F. & GALLI P. (1999) *Palaeoseismology related to the displaced Roman archaeological remains at Egna (Adige Valley, northern Italy)*. TECTONOPHYS, 308(1-2), 1999, pp. 171-191.

GARBIN M., PERUZZA L., SARAO' A. & PRIOLO E. (2011) *La sequenza sismica di Ala-Avio del 29 ottobre 2011: analisi preliminare dei dati sismologici*. INOGS, Centro Ricerche Sismologiche, Udine e Trieste. Poster.

GENTILINI C., GOVONI L., GOTTARDI G., MENTANI A. e UBERTINI F. (2013) *Design of falling rock protection barriers using numerical models*. Engineering Structures 50, 96-106.

GUZZETTI F., CROSTA G., DETTI R. & AGLIARDI F. (2002) *STONE: a computer program for the three-dimensional simulation of rock-falls*. Comp. & Geosc. 28: 1079–1093.

FERRETTI A., PRATI C. & ROCCA F. (2001) *Permanent Scatterers in SAR Interferometry*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 39(1), 10–20.

FERRETTI A., MONTI-GUARNIERI A., PRATI C., ROCCA F. & MASSONET D. (2007) *InSAR Principles: guidelines for SAR Interferometry Processing and Interpretation*. Karen Fletcher, European Space Agency - TM-19. The Netherlands, 234.

FUGANTI A.(1969) *Studio geologico di sei grandi frane nella regione Trentino Alto Adige (Marco, Molveno, Prà del Finonchio, Malgrè, Sasso Englar, Rasciera)*. Mem. Mus. Tr. Sci. Nat. 17, 5-69.

HERMANN S. R., OPPIKOFER T., ANDA E., BLIKRA L. H., BÖHME M., BUNKHOLT H., CROSTA G. B., DAHLE H., DEVOLI G., FISCHER L., JABOYEDOFF M., LOEW S., SÆTRE S. & YUGSI MOLINA F. X (2013)

*Hazard and risk classification for large unstable rock slopes in Norway.*  
International Conference Vajont 1963-2013, ijge, 245-254.

HOEK, E. (2000) *Rock Engineering, short course.*  
[www.rocscience.com](http://www.rocscience.com).

HOEK, E. & BRAY J.W. (1981) *Rock slope engineering.* 3rd edn.  
London: Instn Min. Metall., 402.

HOEK E. & BROWN E.T. (1980a) *Underground Excavations in Rock .*  
London: Institution of Mining and Metallurgy, 527 pages.

HOEK, E. & BROWN E.T. (1980b) *Empirical strength criterion for rock masses.* Journal of the Geotechnical Engineering Division, 106 (9), p. 1013-1035.

HOEK, E. & BROWN E.T. 1997. *Practical estimates or rock mass strength.* Intl. J. Rock Mech. & Mining Sci. & Geomechanics Abstracts. 34(8), 1165-1186.

HOEK, E., CARRANZA-TORRES, C. & CORKUM, B. (2002) *Hoek-Brown failure criterion - 2002 edition.* In: Proceedings of the 5th North American Rock Mechanics Symposium, Toronto, Volume 1, 267-273.

HOEK E., KAISER P.K. & BAWDEN W.F. (1995) *Support of underground excavations in hard rock.* Rotterdam: Balkema.

ISCHIA, N. (1991) *Il complesso carsico delle Moline (S. Lorenzo in Banale, Gruppo di Brenta).* 9° Convegno Regionale di Speleologia del Trentino-Alto Adige, Rovereto, 13-19 novembre 1989. Natura alpina, 42: 79-90.

ISRM (1978b) *Suggested methods for quantitative description of discontinuities in rock masses*. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 15, 319-368.

JAMBU N. (1973) *Slope Stability Computations. Embankment Dam Engineering - Casagrande Volume*, R.C. Hirschfeld and S.J. Poulos, eds., John Wiley and Sons, New York, pp 47-86.

MAGRI G. & MOLIN D. (1986) *I terremoti del 3 gennaio 1117 e del 25 dicembre 1222*. ENEA internal report, RTI PAS-ISP-GEOL LO (86)2: 9pp.

MARCHESONI V. (1958) *Il Lago di Molveno e la foresta riaffiorata in seguito allo svaso*. Studi Trentini Sci. Nat. 31, 9–24.

MARINOS P. & HOEK E. (2000) *GSI: a geologically friendly tool for rock mass strength estimation*. In: Proceedings of the GeoEng 2000 Conference, Melbourne.

MASETTI D., CLAPS M., AVANZINI M., GIACOMETTI A. & PIGNATTI P. (1996A) *I Calcari Grigi della Piattaforma di Trento (Lias inferiore e medio, Prealpi Venete)*. *Geologia delle Dolomiti*. Guida alla 78 a Riunione Estiva della S.G.I., 19-21 Settembre 1996, 48 pp., San Cassiano (Bz).

MASETTI D., CLAPS M., GIACOMETTI A. & PIGNATTI P. (1996B) *I Calcari Grigi della Piattaforma di Trento (Lias inferiore e medio, Prealpi Venete)*. Atti Tic. Sc. Terra, v. 40, pp. 139-183, Pavia.

MASSIRONI, M., ZAMPIERI D., BIANCHI M., SCHIAVO A., FRANCESCHINI A. (2009) *Use of PSInSAR™ data to infer active tectonics: Clues on the differential uplift across the Giudicarie belt (Central-Eastern Alps, Italy)*. Tectonophysics 476, p. 297–303.

- MATHESON G.D. (1983) *The collection and use of field discontinuity data in rock slope design*. Quarterly Journal of Engineering geology, 22.
- MIGNELLI C., POMARICO S., PEILA D. (2013) *Multi-criteria model to compare devices for the protection of roads against rockfall*. Environmental & Engineering Geoscience, 19(3):289-302.
- MILLER, R.P. (1965) *Engineering classification and index properties for intact rock*. Ph.D. Thesis. University of Illinois, Chicago, U.S..
- MIORANDI R., BORSATO A.,FRISIA S., ZANDONATI M. (2005) *Monitoraggio di aria e acqua di percolazione in alcune grotte del Trentino*. Studi Trent. Sci. Nat., Acta Geol., 82 (2005): 151-164
- MORGENSTERN N.R. (1991) *Limitations of stability analysis in geotechnical practice*. Geotecnica, 5-19.
- MORGENSTERN N.R., & PRICE V.E. (1967) *A numerical method for solving the equations of stability of general slip surfaces*. Computer Journal, 9: 388–393.
- NEWMARK N.M. (1965) *Effects of earthquakes on dams and embankments*. Geotechnique 15, 139-160.
- OGGERI C., PEILA D. & VALFRE' A. (2006) *Dimensionamento di barriere paramassi*. SAFE, la Flaccola, le Strade, 8.
- PALMSTROM, A. (1995) *RMi – a rock mass characterization system for rock engineering purposes*. PhD thesis, Oslo University, Norway, 400 .

PASUTO A. & SOLDATI M. (1996) *The use of landslide units in geomorphological mapping: an example in the Italian Dolomites*. GEOMORPHOLOGY, 30(1-2), 1999, pp. 53-64

PEILA D. & OGGERI C. (2006) - *Barriere paramassi a rete: tecnologia e criteri progettuali*, GEAM, Quaderni di studio e documentazione. N. 25, Torino, pp.102.

ROMANA, M (1985) *New adjustment ratings for application of Bieniawski's classification to slopes*. In: International Symposium on the Role of the Rock Mechanics, ISRM, Zacatecas, 49-53.

PAT - Servizio Geologico (2010) "*MIB "Monitoraggio idrogeologico e geochimico Dolomiti di Brenta 2007-2009*". [www.protezionecivile.tn.it](http://www.protezionecivile.tn.it), 43.

PIERSON L.A., DAVIS S.A. & VAN VICKLE R. (1990) *Rockfall Hazard Rating System Implementation Manual*. Federal Highway Administration (FHWA) Report FHWAOR - EG-90-01. FHWA, U.S. Department of Transportation,.

PONDRELLI S., SALIMBENI S., EKSTROM G., MORELLI A. & BOSCHI E. (2007) *European-Mediterranean regional centroid moment tensor catalog: solutions for years 2003 and 2004*. Phys. Earth Planet. Inter., 164, 90-112.

PFEIFFER e BOWEN (1989) *Computer simulation of rockfalls*. Bull. Ass. Eng. Geol. XXVI: 135-146.

ROCKFALLDEFENCE (2009) *Per chi mette in sicurezza i versanti rocciosi. EOTA-ETAG 027*. Presentazione. [www.rockfalldefence.com](http://www.rockfalldefence.com) .

RUSSO G. (2009) A new rational method for calculating the GSI. *Tunnelling and Underground Space Technology* 24, 103-111.

RUSSO G. & GRASSO P. (2006) *Un aggiornamento sul tema della classificazione geomeccanica e della previsione del comportamento allo scavo*. *Gallerie e Grandi Opere in sotterraneo* n.80-Dec.2006, pp.56-64.

SARMA S. K. (1973) *Stability analysis of embankments and slopes*. *Géotechnique* 23, 423–433, 1973.

SCARASCIA & CASSINIS (1997) *Crustal structures in the central-eastern Alpine sector: a revision of the available DSS data*. *Tectonophysics* 271, 157–188.

SARMAP s.a. (2007) *The SAR Guidebook* . CREASO GmbH Svizzera, pp. 265.

SGREZZAROLI, M. & VASSENA, P.M. (2007) *Tecniche di rilevamento tridimensionale tramite laser scanner. Volume 1 - Introduzione generale*. Starrylink Editrice Brescia, pp. 95.

SHAN J. & TOTH C.K. (2009) *Topographic laser ranging and scanning : principles and processing*. CRC Press. ISBN-13: 978-1-4200-5142-1 (alk. paper), 593.

SLEJKO D., CARULLI, G.B., NICOLICH, R., REBEZ, A., ZANFERRARI, A., CAVALLIN, A., DOGLIONI, C., CARRARO, F., CASTALDINI, D., ILCETO, V., SEMENZA, E., & ZANOLLA, C. (1989) *Seismotectonics of the Eastern Southern-Alps: a review*. *Boll. Geofis. Teor. Appl.* 31, 109–136.

SPENCER E. (1967) *A method of analysis of the stability of embankments assuming parallel interslice forces*. *Géotechnique*, 17(1): 11–26.

TEZA G., PESCI A., GENEVOIS R. & GALGARO A. (2008) *Characterization of landslide ground surface kinematics from terrestrial laser scanning and strain field computation*. *Geomorphology* 97, p.424–437.

VIERO, A., M. MASSIRONI, M. JABOYEDOFF & A. GALGARO (2010) *Laser scanning-based recognition of rotational movements on a deep seated gravitational instability: The Cinque Torri case (North-Eastern Italian Alps)*. *Geomorphology* 122, p.191–204.

TANZINI M. (2001) *Fenomeni franosi e opere di stabilizzazione*. Flaccovio Dario Editore - Collana di geotecnica e ingegneria geotecnica. 9788877584120, 292.

TREVISAN L. (1939) *Il Gruppo di Brenta (Trentino occidentale)*. Mem. Ist. Geol. Univ., Padova, **13**, 1-128.

TWISS R.J. & MOORES E.M. (1992) *Structural Geology*. ISBN 0-7167-2252-6. W.H. Freeman and Company, USA, pp.532 .

UNI (2012) *UNI 11211-4. Opere di difesa dalla caduta massi. Parte 4; Progetto definitivo ed esecutivo*. Milano, gennaio 2012, 40.

VOLKVEIN A., SCHELLENBERG K., LABIOUSE V., AGLIARDI F., BERGER F., BOURRIER F., DORREN L. K. A., GERBER W. & JABOYEDOFF M. (2011) *Rockfall characterisation and structural protection – a review*. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 11, 2617–2651.

VIGANO A., BRESSAN G., RANALLI G. & MARTIN S. (2008) *Focal mechanism inversion in the Giudicarie–Lessini seismotectonic region (Southern Alps, Italy): Insights on tectonic stress and strain*. *Tectonophysics* 460, 106–115.

WORKING GROUP CPTI (1999) *Catalogo parametrico dei terremoti italiani*. ING, GNDT, SGA SSN, Bologna: 92 pp.

ZAMBOTTO P. (2008) *Bibliografia di speleologia e carsismo del Trentino-Alto Adige : aggiornamento 1995-2008*. Trento : Società degli alpinisti tridentini. Biblioteca della montagna, 2008, 157.

ZAMPIERI D. & MASSIRONI M. (2007) *Evolution of a poly-deformed relay zone between fault segments in the eastern Southern Alps, Italy*. Geological Society, London, Special Publications 2007; v. 290; 351-366.

ZAMPIERI D. & SAURO U. (2001) Evidence of recent surface faulting and surface rupture in the Fore-Alps of Veneto and Trentino (NE Italy). *Geomorphology* 40, p.169–184

ZANFERRARI A., BOLLETTINARI G., CAROBENE L., CARTON A., CARULLI G. B., CASTALDINI D., CAVALLIN A., PANIZZA M., PELLEGRINI G. B., PIANETTI F. & SAURO U. (1982) *Evoluzione neotettonica dell'Italia nord-orientale*. *Mem. Sc. Geol.*, 35, 355-376.

## **Web bibliografia**

[www.climatrentino.it](http://www.climatrentino.it)

[www.meteotrentino.it](http://www.meteotrentino.it)

[www.protezionecivile.tn.it](http://www.protezionecivile.tn.it)

[www.provincia.bz.it](http://www.provincia.bz.it)

[www.regione.veneto.it](http://www.regione.veneto.it)

[www.rockfalldefence.com](http://www.rockfalldefence.com)

[www.territorio.provincia.tn.it](http://www.territorio.provincia.tn.it)

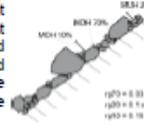
[www.urbanistica.provincia.tn.it](http://www.urbanistica.provincia.tn.it)

## Appendici

- Appendice A1** Panoramica della parete - scala 1:2000
- Appendice A2** Planimetria rilievo laser scanner - scala 1:1000
- Appendice A3** Uso del suolo - scala 1:2000
- Appendice A4** Carta geologica - scala 1:2000
- Appendice A5** Rilievo 3D laser scanner con plot - scala 1:2000
- Appendice A6** Rilievo geomeccanico laser scanner - scala 1:2000
- Appendice A7** Scheda di rilevamento per definire l'uso del suolo
- Appendice A8** Transiti per cella: situazione iniziale e finale - scala 1:3000
- Appendice A9** Altezze di volo per cella: situazione iniziale e finale - scala 1:3000
- Appendice A10** Energie cinetiche massime per cella: situazione iniziale e finale - scala 1:3000
- Appendice A11** Analisi statistica delle traiettorie residue sull'asse stradale: transiti, altezze di volo e energie cinetiche - confronto tra DTM con risoluzione 1m x 1m e 5m x 5m nella situazione iniziale e finale per la mitigazione della pericolosità etria rilievo laser scanner - scala 1:2000
- Appendice A12** Analisi statistica delle traiettorie residue sull'asse stradale: confronto tra DTM con risoluzione 1m x 1m e 5m x 5m nella situazione iniziale e finale per la mitigazione della pericolosità – scala 1:2000

## Appendice A7

Scheda di rilevamento per definire l'uso del suolo per una simulazione numerica con Rockyfor3D (Dorren, 2012).

General			
Date*		Nr. Polygon*	
Location*	Slope angle*	( ° / % )	
Name*	Zone*	<input type="checkbox"/> start / source	<input type="checkbox"/> transit <span style="margin-left: 20px;"><input type="checkbox"/> deposit</span>
Polygon characteristics			
1. Dominating rock (deposited in the polygon or potentially falling from release area)			
Block shape	<input type="checkbox"/> 1. rectangle <input type="checkbox"/> 2. ellipsoid <input type="checkbox"/> 3. Sphere <input type="checkbox"/> 4. Disc		
Block dimensions (d1, d2, d3):      ..... (m)    x    ..... (m)    x    ..... (m)			
Rock density (kg.m <sup>-3</sup> ):			
2. Soil / underground type in the polygon			
Material constituting the underground	<input type="checkbox"/> river / swamp / other material in which a rock could penetrate completely	<input type="checkbox"/> fine soil material (depth > ~100 cm)	<input type="checkbox"/> fine soil material (depth < ~100 cm) / sand/gravel mix in the valley
	<input type="checkbox"/> scree (Ø < ~10 cm) / medium compact soil with small rock fragments / forest road	<input type="checkbox"/> talus slope (Ø > ~10 cm) / compact soil with large rock fragments	<input type="checkbox"/> bedrock with thin weathered material or soil cover
(soiltype) values needed for Rockyfor3D	0	1	2
	3	4	5
	6	7	
3. Surface roughness in the polygon			
MOH: typical obstacle height normal to the slope surface (m) that block encounters in 70%, 20% and 10% of the cases during a rebound on the slope surface. <b>Should be measured looking down the slope!</b>		MOH for 70% of the sample area (rg70)	0 - 100 (m)
		MOH for 20% of the sample area (rg20)	0 - 100 (m)
		MOH for 10% of the sample area (rg10)	0 - 100 (m)
Lying tree stems*	Mean height =	m	Area covered = %
4. Forest*			
Representative plot size:      ..... m    x    ..... m			
DBH* (cm)	* DBH: Tree diameter at breast height (usually measured 1.3 m above ground upslope from the stem)		
	Record all the DBH ≥ 5 cm measured in the plot: e.g., 8, 31, 17, 13, ...		
Stems / ha			
Mean DBH (cm)		Coniferous (%)	
Stddev DBH (cm)			
Species*			
5. Rockfall activity indicators / silent witnesses*			
Mean nr. of rockfall impacts on trees*		Height(s) of rockfall impacts on trees (m)*	
Depth impact craters (m)*		Fresh, deposited rocks in Polygon*	Yes / No
6. Remarks / sketch*			
* optional fields; these are not required for Rockyfor3D			