



**INTERVENTO DI RIDUZIONE DEL RISCHIO IDROGEOLOGICO IN LOCALITÀ  
COLLE DELLE ROCCE NEL COMUNE DI ANTRODOCO (RI)**

**PROGETTO DEFINITIVO**

RELAZIONE GEOLOGICA E GEOSTRUTTURALE

**UFFICIO SPECIALE RICOSTRUZIONE LAZIO**

**Direttore: Ing. Wanda D'Ercole**

**RUP: Arch. Fiorella Giunta**

**PROT:**

**PROGETTISTI:**

**Capogruppo Mandataria:**



**Ing. Paolo Discetti**



C.to Direzionale Is. G1, 80143 - Napoli (NA)  
Tel: 081.7879778 Fax: 081.7870763  
e-mail info@studiodiscetti.com

**Mandante:**

**Geol. Anna Maria Patelli**

A norma di legge il presente elaborato non potrà essere riprodotto né consegnato a terzi né utilizzato per scopi diversi da quello di destinazione senza l'autorizzazione scritta dello STUDIO DISCETTI che ne detiene la proprietà.

COMMESSA		COMMITTENTE		TIPO	FASE	LOTTO	ELABORATO		SCALA	
5 0 8 2 0 2 0		1 5 3		P B	P D	- -	T A V G 0 4			
REVISIONE	DESCRIZIONE	REDATTO	DATA	VERIFICATO	DATA	APPROVATO	AUTORIZZATO	DATA		
A		S.C. A.S. F.P. M.T. S.S.	NOVEMBRE 2020	P.D.	NOVEMBRE 2020	P.D.	E.D.	NOVEMBRE 2020		
B	Nota Prot. 1025553.24 del 24/11/2020	S.C. A.S. F.P. M.T. S.S.	NOVEMBRE 2020	P.D.	NOVEMBRE 2020	P.D.	E.D.	NOVEMBRE 2020		

<b>PREMESSA</b> .....	2
<b>RIFERIMENTI NORMATIVI</b> .....	3
<b>INQUADRAMENTO TERRITORIALE DEL SITO</b> .....	4
<b>LINEAMENTI GEOLOGICI DELL'AREA VASTA</b> .....	5
<b>GEOLOGIA DELL'AREA IN ESAME</b> .....	10
<b>STATO DI FATTO</b> .....	13
<b>FINALITÀ PROGETTUALI E INDAGINI EFFETTUATE</b> .....	21
<b>RILEVO GEOSTRUTTURALE</b> .....	22
<b>Metodologia acquisizione dati</b> .....	22
<b>Classificazione degli ammassi rocciosi</b> .....	24
<b>Cluster analysis</b> .....	33
<b>Clustering gerarchico</b> .....	33
<b>Clustering non gerarchico</b> .....	34
<b>Analisi dei cinematismi potenziali</b> .....	34
<b>Elaborazione delle stazioni geomeccaniche</b> .....	40
<b>Rilievo geostrutturale delle aree di indagine</b> .....	41
<b>Scan line del substrato affiorante</b> .....	52
<b>Stazione S1</b> .....	52
<b>Stazione S2</b> .....	60
<b>INDAGINI REGOLAMENTO REGIONALE N. 14 DEL 13 LUGLIO 2016</b> .....	68
<b>MODELLO GEOLOGICO</b> .....	71
<b>CONCLUSIONI</b> .....	73
<b>BIBLIOGRAFIA CONSULTATA</b> .....	74

## **PREMESSA**

La scrivente dott. Geol. Anna Maria Patelli quale specialista geologo del raggruppamento aggiudicatario dei servizi di progettazione definitiva ed esecutiva dell'intervento di riduzione del rischio idrogeologico in località "Colle delle Rocce" nel Comune di Antrodoco redige il presente studio geologico a supporto della progettazione relativa ai lavori aggiudicati.

Lo studio ha lo scopo di fornire gli elementi per la progettazione delle opere e degli interventi sui sistemi geologici esistenti.

Lo studio realizzato, esposto nella presente relazione, descrive oltre alle caratteristiche geologiche, geomorfologiche e idrogeologiche, anche gli aspetti connessi alla genesi dei diversi litotipi e agli assetti tettonici e strutturali dell'area in studio. Tutte cognizioni utili per prevedere le possibili variazioni delle caratteristiche fisiche e geologiche dei materiali e l'evoluzione morfologica dell'area.

Preliminarmente alla fase di studio è stata eseguita un'ampia indagine bibliografica; le fonti consultate sono indicate nella bibliografia in appendice, mentre alcuni stralci tematici sono riportati in relazione.

Successivamente si è proceduto con una fase di rilevamento geomorfologico dell'area di studio e su una significativa porzione di territorio circostante che ha permesso di redigere un piano di indagini geognostiche, funzione del numero di dati preesistenti, della complessità geologica e geomorfologica locale e della logistica del sito.

Il piano, volto alla caratterizzazione litologica e geometrica del sottosuolo e alla creazione di un modello geologico di riferimento. già calato su un contesto ambientale complesso dal punto di vista morfologico e della copertura boschiva, è stata rimodulato successivamente come illustrato nelle pagine seguenti e nel report specialistico.

Si è, poi, proseguito con le attività geognostiche di campo, al rilevamento geostrutturale e alle indagini in sito, all'elaborazione dei dati e alla costruzione del modello geologico esposto nel lavoro e brevemente sintetizzato al termine del presente lavoro.

Si rimandano agli specialisti, in relazione al modello geologico elaborato, le valutazioni specifiche.

## RIFERIMENTI NORMATIVI

Il seguente documento è stato elaborato sulla scorta della seguente normativa vigente:

- **Circolare del Ministero delle Infrastrutture e dei trasporti 21 gennaio 2019, n. 7.**
- **Norme Tecniche per le Costruzioni 2018.**
- **Regione Lazio - Regolamento regionale 13 luglio 2016 n. 14**
- **DPR 05/06/2001 n. 328** - Modifiche e integrazioni della disciplina dei requisiti per l'ammissione all'esame di Stato e delle relative prove per l'esercizio di talune professioni, nonché della disciplina dei relativi ordinamenti.
- **AGI maggio 1990 "Raccomandazioni sulle prove geotecniche di laboratorio"**
- **D.M. 11 Marzo 1988** "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 fondazioni".
- **Circ. Min. LL.PP. n° 30483 del 24 Settembre 1988** "Istruzioni relative alla 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 fondazioni".
- **AGI, 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 fondazioni".**
- **AGI giugno 1977 "Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche".**

## INQUADRAMENTO TERRITORIALE DEL SITO

L'area di indagine ricade nel territorio comunale di Antrodoco in provincia di Rieti, è collocata in prossimità del Toppo collinare di Colle Frate (815.6 m slm), una delle propaggini sud orientali del Massiccio del Terminillo. L'area in studio è ubicata lungo la Valle del Fiume Velino in corrispondenza della sua sponda destra e a nord del centro storico di Antrodoco in località Colle delle Rocce.

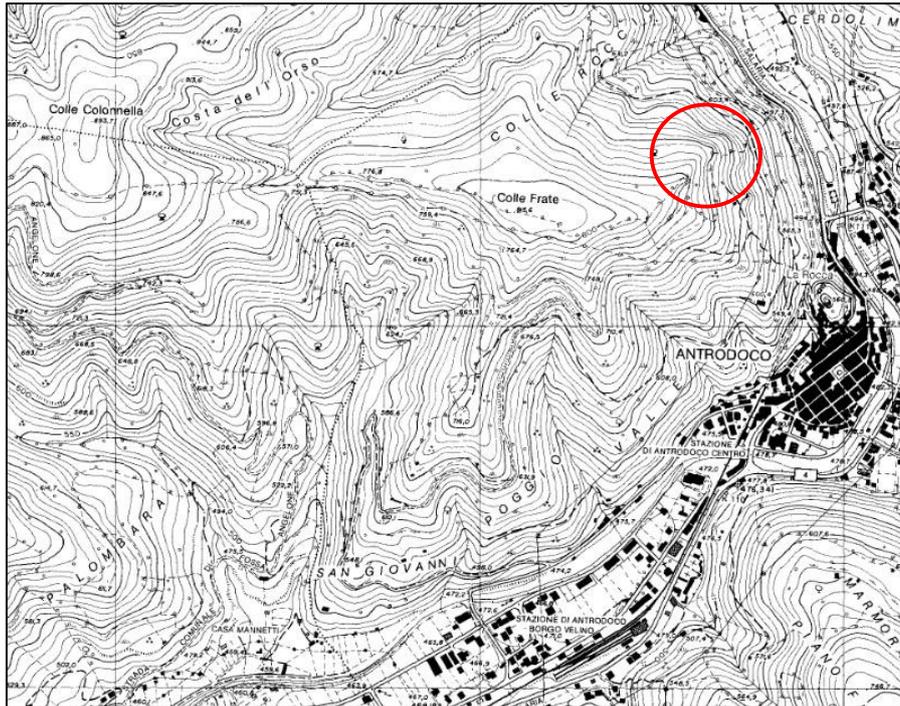


Figura n.1 - Stralcio cartografico con ubicazione dell'area in esame

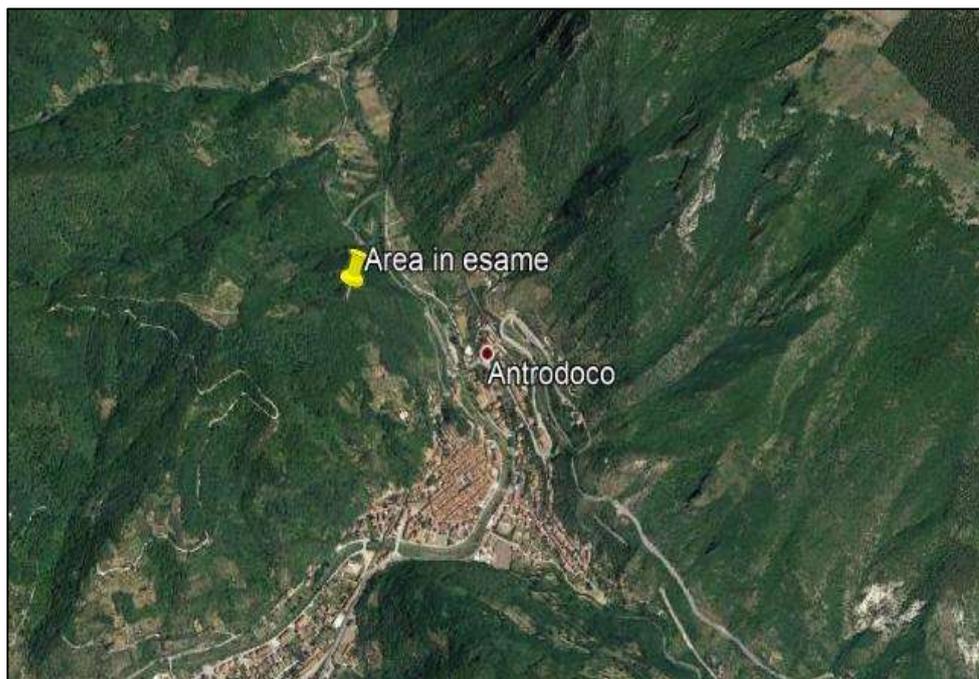


Figura n. 2 - Ubicazione area in studio su stralcio satellitare

## LINEAMENTI GEOLOGICI DELL'AREA VASTA

Il territorio in cui ricade il comune di Antrodoco è situato al margine occidentale della dorsale appenninica tra il Monte Terminillo e il Gran Sasso d'Italia. L'orografia dell'area, dominata dalla valle del Fiume Velino, è caratterizzata ad ovest e nord ovest dalla dorsale dei Monti Reatini che, allungata in direzione meridiana, raggiunge le quote più elevate con il Monte Elefante (2015 m slm), il Monte Terminillo (2181 m), il Monte Cambio (2081 m) e il Monte Boragine (1824 m). A nord e nord est dai Monti della Laga, a sud, sud est la dorsale dei Monti Nuria (1888 m), Giano (1820 m) e Gabbia (1497 m).

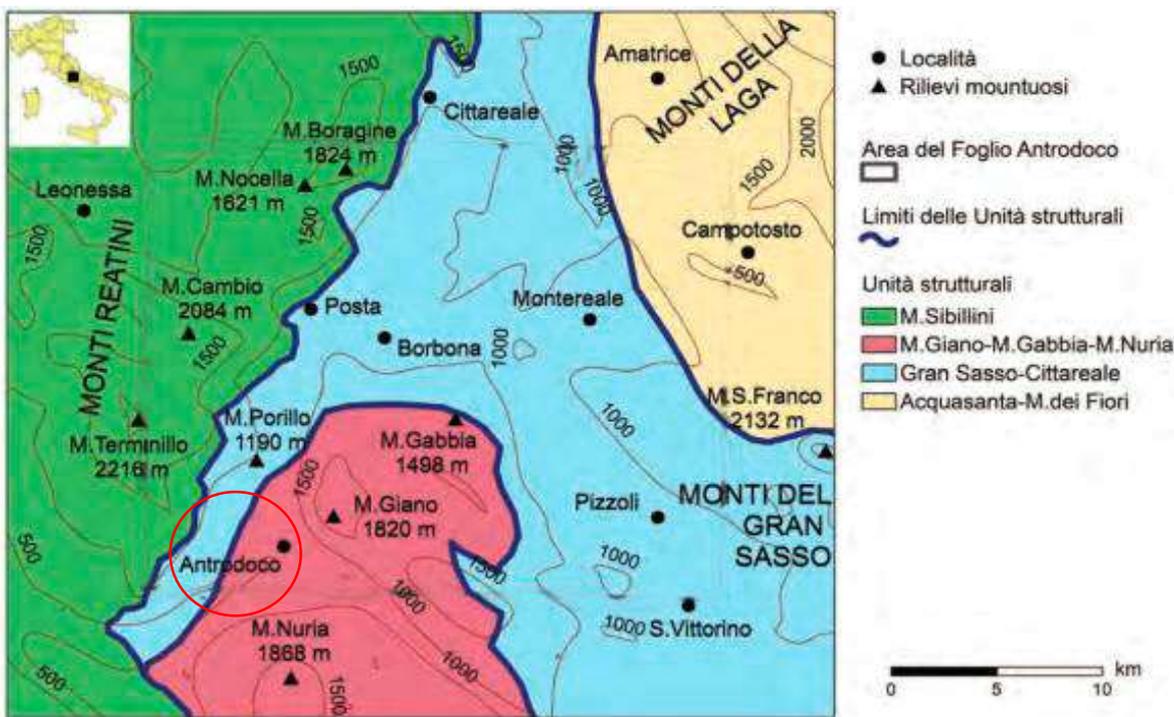
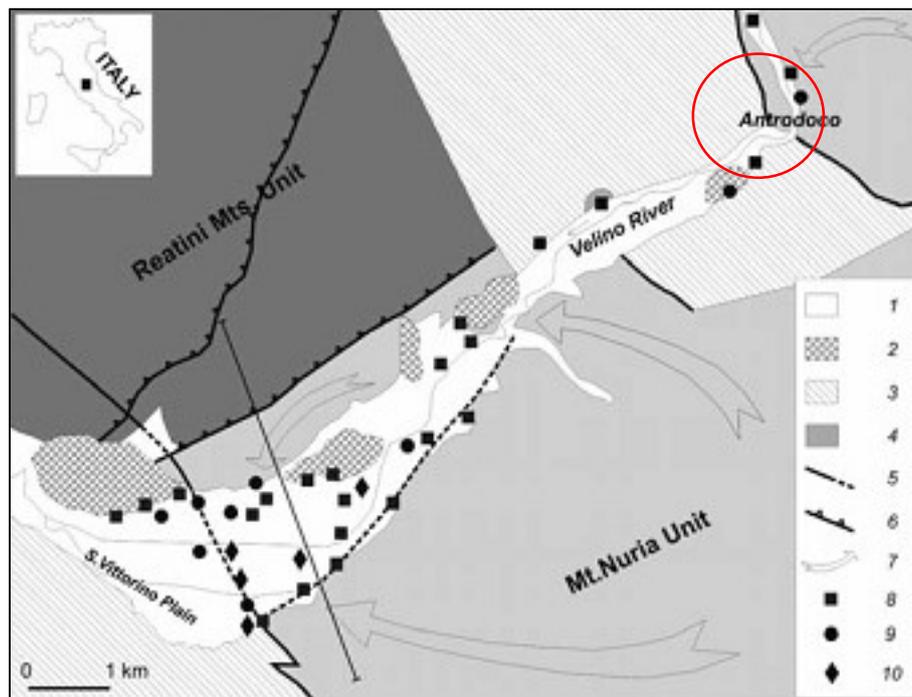


Figura n. 3 - Inquadramento strutturale dell'area

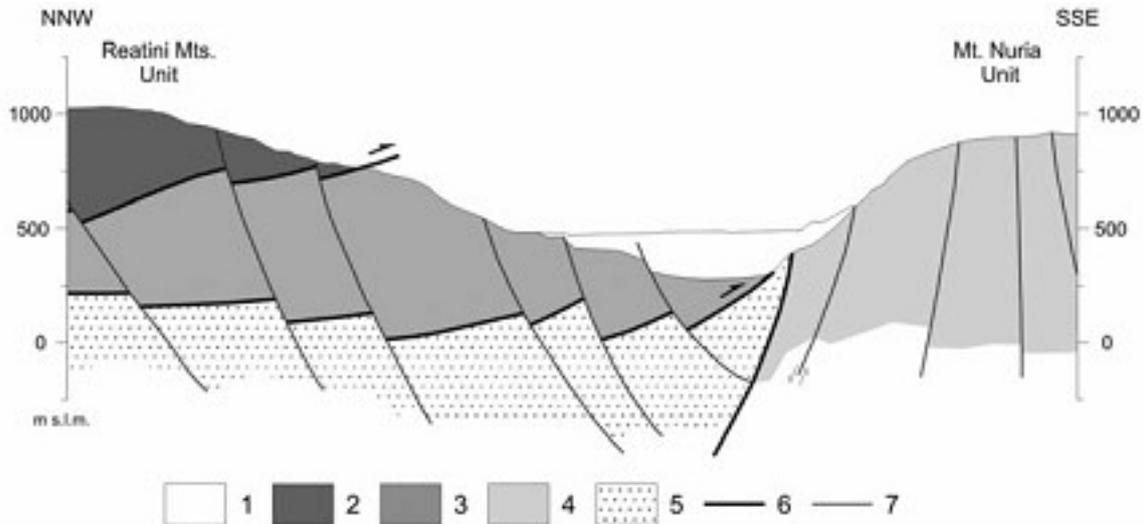
L'orografia nei suoi tratti essenziali è caratterizzata da un paesaggio articolato per la presenza di dorsali e aree collinari che si alternano a conche e valli fluviali.

L'area in studio appartiene ad un settore della catena appenninica caratterizzato da distinte unità tettoniche sovrapposte secondo una principale vergenza adriatica. È ubicata nella zona d'incontro tra l'Appennino carbonatico laziale-abruzzese, rappresentato dalla dorsale M. Nuria-M. Giano e il dominio umbro-marchigiano-sabino, rappresentato dal gruppo montuoso del Terminillo (Fig. 3). I due diversi ambienti geologici sono posti a contatto dalla linea tettonica nota come Olevano-Antrodoco (Ancona-Anzio *auct.*; ACCORDI & CARBONE, 1988; PAROTTO & PRATURLON, 1975), connessa alla tettonica compressiva tardo-miocenica. Lungo questa direttrice l'attività tettonica si sarebbe sviluppata anche in epoche precedenti, durante il processo di separazione del dominio

neritico carbonatico dal dominio pelagico (CASTELLARIN et alii, 1978). Nel settore di Antrodoco (Fig. 3), alla base del M.Giano, l'incisione delle Gole del Fiume Velino interessa il basamento affiorante della serie carbonatica di piattaforma, costituito dalle dolomie triassiche e dai calcari dolomitici liassici. Tra Antrodoco e Canetra affiorano i flysch miocenici, depositatisi in una paleodepressione inglobata tra le dorsali in emersione durante la fase orogenetica. All'altezza di Canetra la valle si stringe nuovamente e il corso del fiume incide ancora per un breve tratto la successione carbonatica. L'orogenesi ha prodotto una struttura ad unità tettoniche sovrapposte, che caratterizzano lo sviluppo dell'elemento tettonico Olevano-Antrodoco sopra citato; questa struttura risulta evidente procedendo dal M. Terminillo sul versante sudorientale verso il M.Paterno, fino al contatto con la piana di S.Vittorino. Lungo il versante del M.Paterno si rinvencono infatti, separate da elementi tettonici compressivi e dislocati da elementi tettonici distensivi, diverse unità tettoniche (CAPOTORTI et alii, 1995; CENTAMORE et alii, 2009; CIOTOLI et alii, 2001) come evidenziato nelle figure sottostanti.



**Figura n. 4 - Assetto geologico e idrogeologico della zona di studio. 1) Depositi quaternari della Valle del Velino e della Piana di S.Vittorino; 2) Travertini; 3) Depositi sinorogenici a bassa permeabilità; 4) Substrato carbonatico, suddiviso tra l'Unità Idrogeologica dei Monti Reatini (più scuro) e quella del M.Nuria (più chiaro), che include il settore di Canetra-M.Paterno; 5) Principali faglie, sepolte ove tratteggiate; 6) Principali sovrascorrimenti; 7) Principali direttrici di deflusso idrico sotterraneo; 8) Principali sorgenti alimentate dall'acquifero carbonatico; 9) Principali sorgenti mineralizzate; 10) Principali sinkholes. La traccia della sezione si riferisce a Fig. 5.**

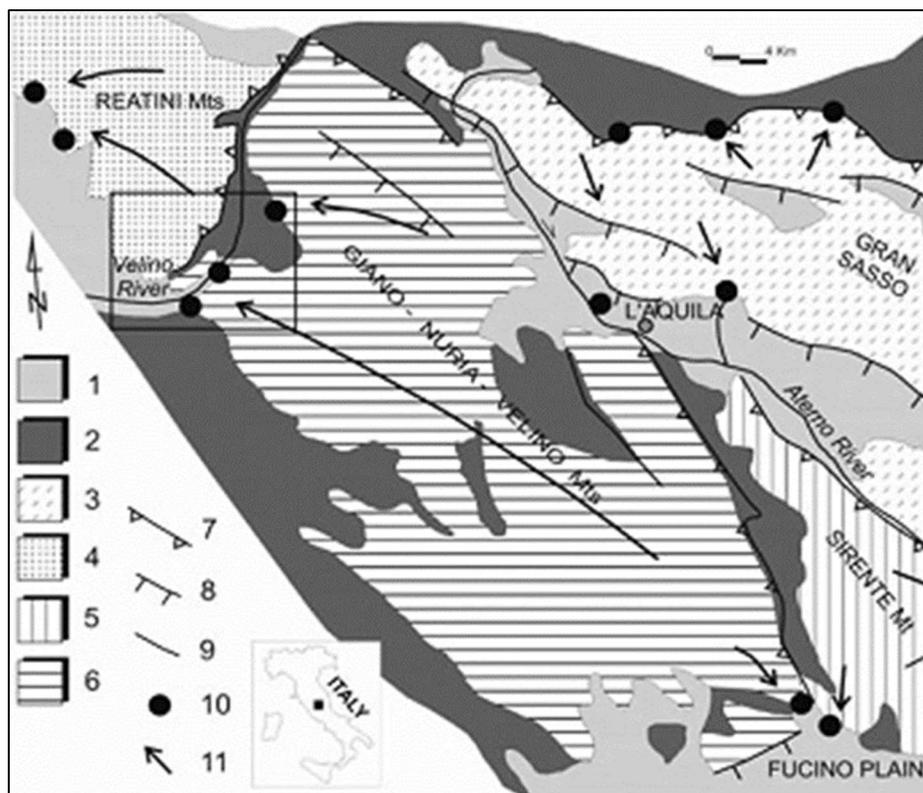


**Figura n.5 - Sezione geologica-idrogeologica (modificata da CENTAMORE et alii, 2009) attraverso la Piana di S.Vittorino. La traccia della sezione è in Fig.4) 1) Depositi della Piana di S.Vittorino; 2) Unità tettonica dei M.Reatini-M.Terminillo; 3) Unità tettonica di Canetra-M.Paterno; 4) Unità del M.Nuria; 5) Unità tettonica dei depositi sin- e pre-orogenici; 6) Sovrascorrimenti principali;7) Faglie principali**

Alle fasi compressive fanno seguito fasi distensive più recenti. L'evoluzione pleistocenica dell'area ha determinato il ribassamento dei carbonati meso-cenozoici nell'area di S.Vittorino, attraverso fasi tettoniche a componente prevalentemente distensiva (FACCENNA et alii, 1993), con conseguente riempimento del settore depresso da parte di sedimenti alluvionali, fluvio-lacustri e provenienti dai versanti in rapida erosione. Gli stessi versanti vengono interessati da detensionamenti e deformazioni gravitative profonde (MARTINO et alii, 2004). La coltre di sedimenti recenti scarsamente o affatto cementata, cui si sovrappongono i depositi attuali del fiume Velino, presenta uno spessore variabile, minimo lungo i margini settentrionale e sud-orientale della piana e più elevato verso il centro della depressione. Da prospezioni geofisiche lo spessore massimo dei sedimenti è stato valutato nell'ordine dei 200 m (FACCENNA et alii, 1993). Il bedrock è costituito, presumibilmente, da carbonati del dominio di piattaforma (Fig. 5), anche se nessun sondaggio diretto ha mai raggiunto il tetto dei carbonati al centro della piana.

L'area, oltre a presentare un elevato grado di sismicità, testimoniato anche da recentissimi terremoti di medio grado, presenta una tettonica attiva molto evidente, i cui caratteri principali evidenziano il pro- seguito di linee tettoniche regionali anche all'interno della piana, secondo direzioni tipiche dell'evoluzione appenninica (FACCENNA et alii, 1993). Queste discontinuità, evidenziate da varie metodologie di prospezione, assumono direzioni prevalenti NW-SE e E-W e rappresentano spesso le linee lungo le quali risalgono i fluidi gassosi profondi le cui manifestazioni sono evidenti nella piana.

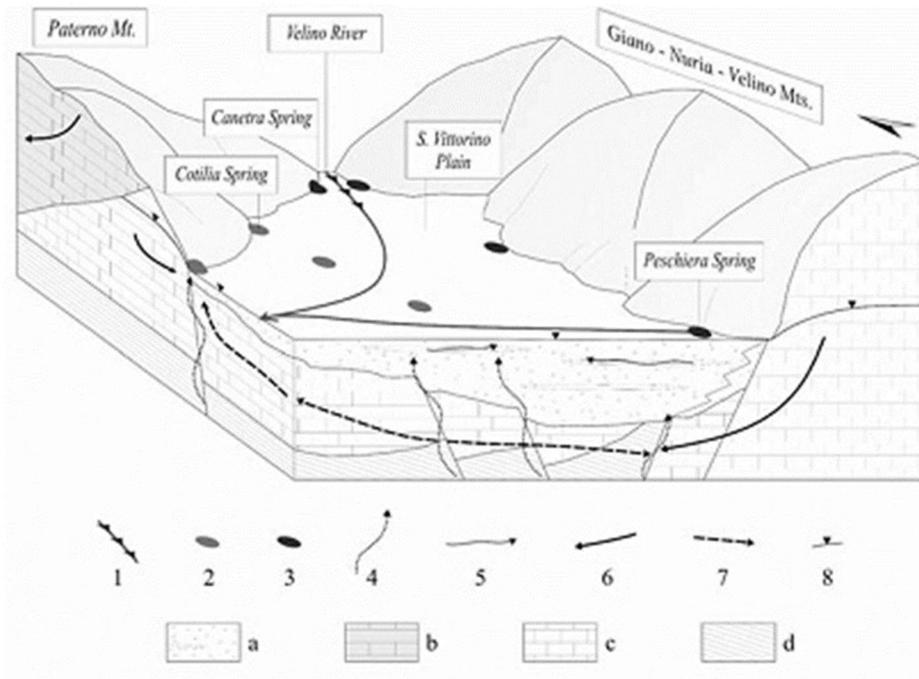
Per quanto attiene al quadro idrogeologico, la media valle del Velino e la Piana di S.Vittorino rappresentano il recapito di importanti acquiferi carbonatici fratturati, comprendenti le dorsali M.Giano-M.Nuria- M.Velino del dominio carbonatico di piattaforma. Altre importanti sorgenti pedemontane sono presenti lungo la valle (anche tramite drenaggio diretto in alveo) e lungo il margine destro, in corrispondenza del limite settentrionale della piana (Fig. 6). La portata totale delle emergenze presenti nella sola piana supera i 20 m<sup>3</sup>/s, che sommati ai contributi presenti nel settore immediatamente a monte, possono raggiungere i 30 m<sup>3</sup>/s.



**Figura n.6-Schema idrogeologico regionale. 1) Depositi quaternari; 2) Depositi sinorogenici; 3) Idrostruttura del Gran Sasso; 4) Idrostruttura del M.Sirente; 5) Idrostruttura dei Montigiano-Nuria-Velino; 6) Idrostruttura dei Monti Reatini (M.Terminillo); 7) Sovrascorrimenti; 8) Faglie dirette; 9 Faglie; 10) Principali sorgenti; 11) Direttrici di deflusso idrico sotterraneo**

Le principali sorgenti, ubicate sul versante meridionale e sul margine settentrionale della piana di S.Vittorino, sono rappresentate innanzitutto dalle note sorgenti del Peschiera (18 m<sup>3</sup>/s), parzialmente captate per l'approvvigionamento idrico di Roma. Le altre principali emergenze dell'area sono le sorgenti lineari di Antrodoco (circa 2 m<sup>3</sup>/s), la sorgente di Canetra (2 m<sup>3</sup>/s), il gruppo di Canetra (4.5 m<sup>3</sup>/s), quello di Vasche (1.5 m<sup>3</sup>/s), di S. Vittorino (0.5 m<sup>3</sup>/s) e da altre sorgenti minori del Peschiera (0.5 m<sup>3</sup>/s) cui si affiancano anche sorgenti ad elevata mineralizzazione, anche di portata elevata (Terme di Cotilia, 0.25 m<sup>3</sup>/s). L'area di alimentazione a

scala regionale è rappresentata dall'idrostruttura dei Monti Giano-Nuria-Velino, avente una superficie di circa 1016 km<sup>2</sup>.



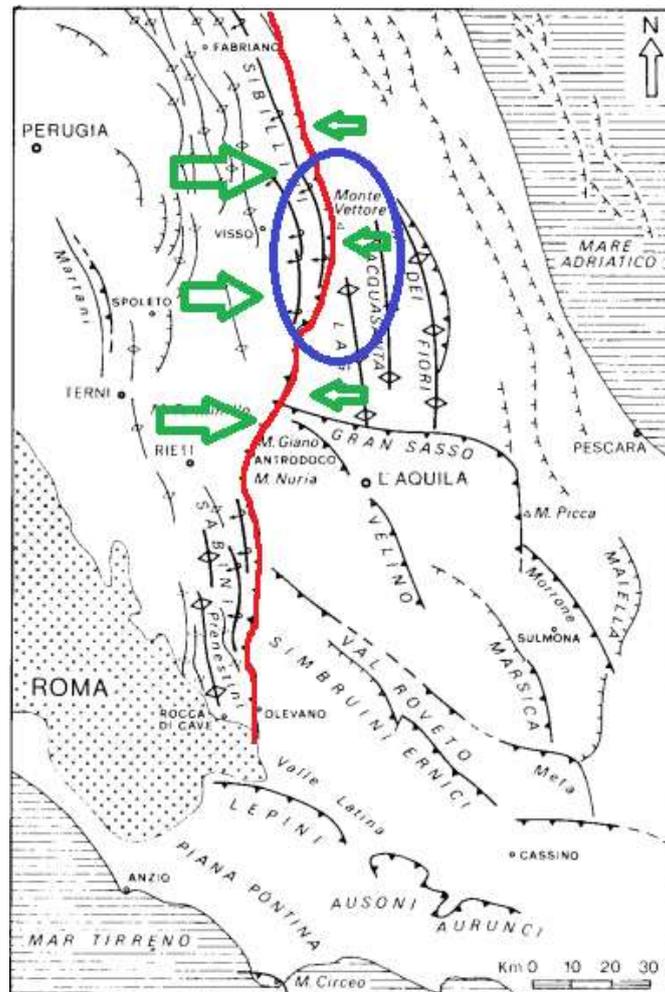
**Figura n.7 - Schema della circolazione idrica sotterranea nella Piana di S.Vittorino. 1) Corsi d'acqua (le frecce identificano la sorgente lineare); 2) Principali sorgenti mineralizzate; 3) Principali sorgenti alimentate dall'acquifero carbonatico; 4) Risalita di fluidi gassosi profondi; 5) Circolazione idrica sotterranea nei sedimenti a maggiore permeabilità della Piana; 6) Principali linee di deflusso sotterraneo dall'acquifero carbonatico; 7) Deflusso idrico profondo nel substrato carbonatico della Piana; 8) Traccia della superficie piezometrica) acquifero della Piana di S.Vittorino; b) acquifero carbonatico dei Monti Reatini; c) acquifero carbonatico regionale del M.Nuria, che include l'unità idrogeologica Canetra-M. Paterno; d) Depositi sinorogenici a bassa permeabilità**

### GEOLOGIA DELL'AREA IN ESAME

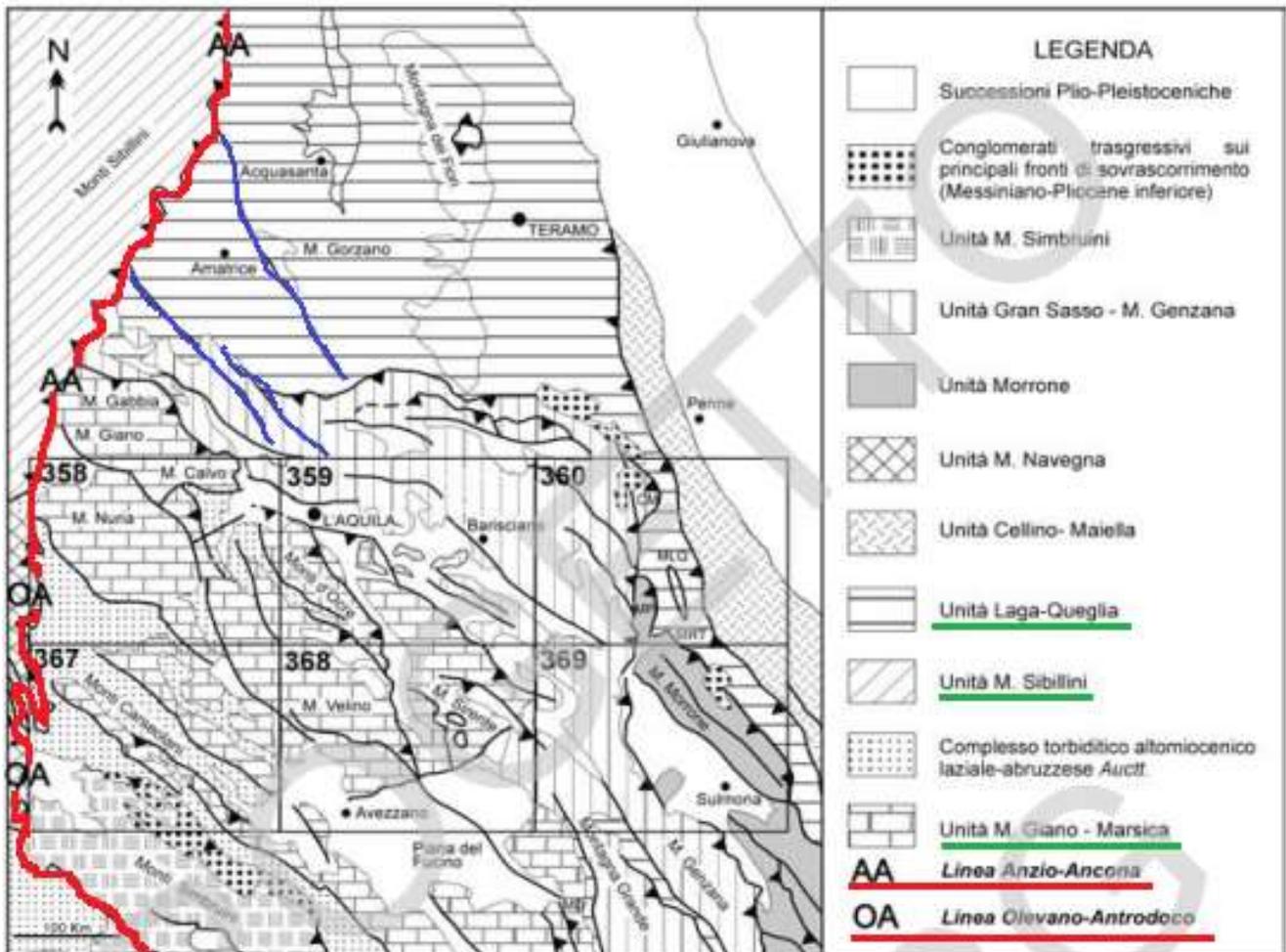
L'area investigata è situata lungo la Valle del Fiume Velino, in prossimità della sua sponda destra, a nord del centro abitato di Antrodoco. Essa è ubicata sul versante orientale di Colle Frate ad una quota di circa 685 m slm, è esposta ad est e immerge verso il fondovalle.

Come già esposto nel paragrafo precedente la geologia dell'area è dominata dal contatto tettonico Olevano-Antrodoco che coinvolge i terreni in una serie di deformazioni tettoniche intense che si manifestano sotto forma di pieghe, sovrascorrimenti faglie e fratture. L'assetto tettonico generale è caratterizzato dalla prossimità del fronte di accavallamento a direzione nord-sud che rappresenta il tratto più orientale di quella fascia di deformazioni orientate in senso meridiano definita Linea Olevano Antrodoco che si rinvia proprio ad ovest dell'abitato di Antrodoco.

Tale contesto controllerebbe anche la sismicità dell'area come recentemente testimoniato dai terremoti che hanno interessato queste zone.



**Figura n. 8 - Linea Ancona Anzio**



**Figura n.9 - Linea Ancona Anzio e Olevano Antrodoco**

Nel settore est del contatto tettonico, dove è ubicata l'area oggetto del presente lavoro, si rinviene la successione carbonatica di piattaforma costituita da dolomie brune, grigie o giallastre talora straterellate di probabile età triassica; queste sono seguite da calcari bianchi del Lias inferiore, talvolta dolomitici, subcristallini, travertinoidi o pisolitici o brecciati, stratificati in banchi con frequenti fossili e una serie di lacune di emersione con depositi continentali riferibili ai periodi Cenomaniano e Paleogene. Nel settore ovest del contatto tettonico si rinvengono, invece, i terreni della serie calcareo-silico-marnosa della serie umbro-marchigiana di età miocenica (cfr. Fig. 10 Carta geologica F. 139 Antrodoco).

Dal punto di vista idrogeologico i calcari dolomitici affioranti nell'area di interesse presentano una permeabilità per fratturazione e carsismo. Sono sede di una falda acquifera sotterranea ubicata a profondità notevoli e quindi non interferente con l'area in esame. Ad ogni modo non si esclude la presenza di falde più superficiali, anche di lieve entità e a carattere discontinuo e/o temporaneo, legate a contatti tettonici o a locali variazioni litologiche.

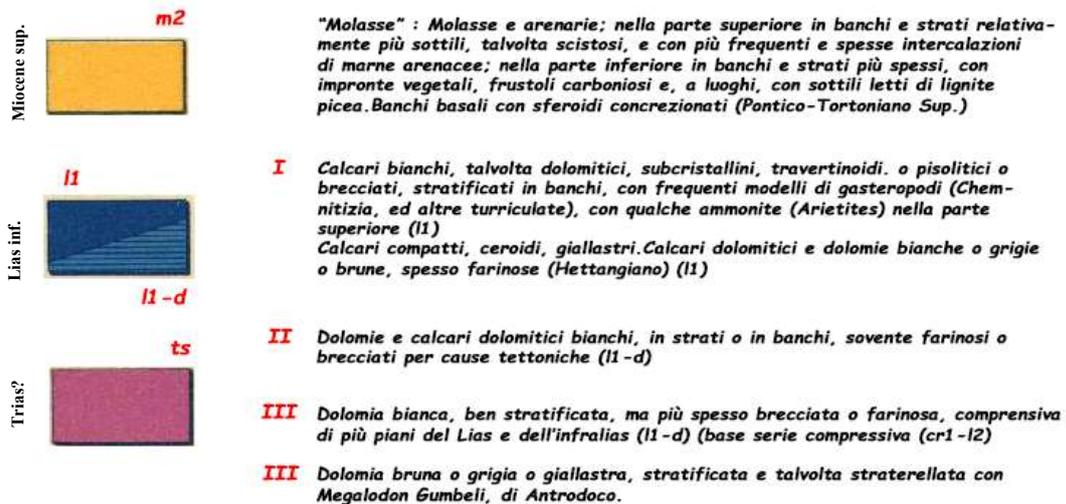


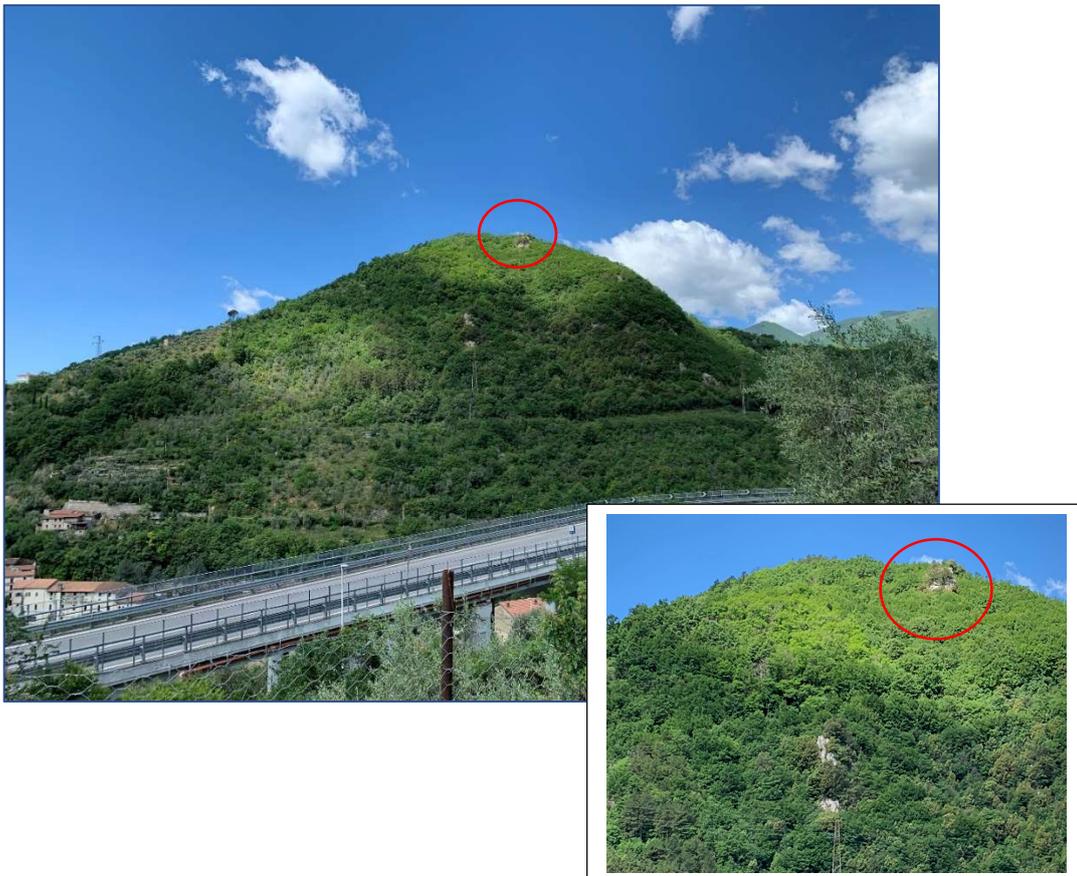
Figura n.10 - Carta geologica d'Italia 1:100.000 - 139 Antrodoco

## STATO DI FATTO

Il progetto "Interventi di riduzione del rischio idrogeologico in località Colle delle Rocce" riguarda la bonifica di un masso posizionato in corrispondenza del versante orientale di Colle Frate lungo una linea di forte pendenza sovrastante la Strada Statale 4 "Salaria, la linea ferroviaria Terni-Sulmona e la Via dei Cinque Confini. La zona a rischio è individuata nell'inventario dei fenomeni franosi e situazioni di rischio da frana del Piano Stralcio per l'assetto idrogeologico del bacino del Fiume Tevere, in zona R4-Rishio molto elevato ed è anche segnalata nell'Atlante delle aree a rischio di frana e valanghe.

Lungo il pendio oltre alla porzione in studio sono presenti ulteriori criticità legate alla presenza di porzioni di roccia ad assetto verticale e subverticale, pseudocolonnare, affette da fratture e lesioni.

Il masso, oggetto del presente lavoro, è ubicato a circa 500 metri in linea d'aria dalla radura che identifica il toppo collinare. Il percorso è carrabile fino ad essa e da questa fino al masso esclusivamente a piedi lungo un percorso montano boschivo, fortemente accidentato.



**Figura n.11 - Ubicazione masso**

I fondi economici stanziati per le attività in progetto non hanno consentito il decespugliamento dell'area circostante il masso in studio dalla fitta vegetazione boschiva e arbustacea di conseguenza non è stato possibile eseguire un rilievo topografico di dettaglio né utilizzare il drone nel pieno delle capacità strumentali. Anche il rilievo geologico e geostrutturale condotto è stato fortemente condizionato dalla logistica locale, pertanto le osservazioni che seguono sono il frutto del rilevamento geologico condotto, nelle aree accessibili, a piedi e delle foto scattate dall'alto dal drone.



**Figura n.12 - Vista del masso dall'alto**

Morfologicamente il masso può essere considerato un elemento di forma pseudocolonnare che emerge rispetto al substrato verosimilmente a causa degli effetti tettonici ed erosivi impostatisi su una roccia facilmente disgregabile. Tale masso ha una forma irregolare, assimilandolo ad uno pseudo prismoide potremmo considerare le sue dimensioni altezza circa 8 m di nel lato monte che aumenta progressivamente fino a circa 15/20 m nel lato valle, il fronte ha una larghezza di circa 10 m, mentre, la parte superiore, pseudorizzontale, calpestabile, ha una lunghezza di circa 20 m.



**Figura n.13 - Vista del masso dall'alto**

È costituito da un calcare dolomitico biancastro a luoghi brecciato, interessato da un complesso sistema di fratture che lo hanno dissecato in più porzioni; quelle più evidenti sono indicate in figura 13 con le lettere B1, B2 e B3. Sostanzialmente il blocco B1 è il più grande e costituisce quasi l'intera volumetria del blocco oggetto di indagine, su di esso appoggiano i blocchi più piccoli B2 e B3.

Esso reca, inoltre i segni evidenti di una intensa erosione provocata sia dagli agenti esogeni, essenzialmente acque dilavanti e fenomeni crioclastici sia da un intenso e pervasivo carsismo.

Di seguito sono riportate le osservazioni puntuali dello stato conservativo del masso nelle parti affioranti e ispezionabili raggiungibili a piedi.



**Figura n.14 - Masso**



**Figura n.15 - Dettaglio masso**

Come evidenziato nelle foto 14 e 15 il masso (cfr. porzione B1 di fig. 13) si presenta privo di piede, scollato dal substrato e con evidenti scavernature legate all'azione erosiva delle acque e a locali intensi fenomeni carsici impostatisi su una roccia già interessata da un'intensa fratturazione.



**Figura n.16 - Dettaglio masso**

La parte retrostante del masso, la radice almeno la parte visibile, si presenta fratturata e disgregata; le lesioni hanno giacitura a franapoggio sfavorevoli alla stabilità (cfr. fig. 16).

I processi erosivi che hanno agito sulla roccia, prevalentemente quelli collegati alla circolazione delle acque, sono stati tali da esaltarne la natura brecciata. Sempre legati ad intensa erosione, si notano sulla superficie del masso, delle cavità rotondeggianti di dimensioni fino a qualche decina di centimetri (cfr. fig. 16). Scendendo lungo il pendio, in corrispondenza della parte latero-anteriore del masso si nota innanzitutto l'assenza del piede (cfr. figg. 14-15), si nota, inoltre, che esso poggia su un calcare brecciato che ha subito evidente erosione da parte dell'acqua di ruscellamento, tale superficie di appoggio a luoghi si presenta liscia con patine residuali depositate dalle acque dilavanti (cfr. figg. 17-18).

Nella parte frontale il blocco manifesta evidenti fenomeni carsici, si notano due cavità rotondeggianti separate da un setto cuneiforme solo appoggiato alla base (cfr. fig. 18). All'interno il blocco si presenta cavo e con frammenti legati a distacchi interni di materiale. Sia i frammenti interni che la parte esterna del blocco si presentano erosi e con patine residuali di colore rosa.

Calcare fortemente  
brecciato



Assenza di piede

Figura n.17- Dettaglio masso angolo

Fenomeni carsici ed  
erosivi delle acque  
dilavanti



Patine residuali

Figura n.18 - Dettaglio masso frontale

Procedendo verso la porzione B3 (cfr. fig. 13) si nota che essa è in parte priva di piede e in parte poggia su scaglie di breccia calcarea fortemente scompaginata, con patine di ossidazione ocracee e con vegetazione arbustiva infestante che favorisce ulteriormente i fenomeni di scomposizione.



**Figura n.19 - Dettaglio base masso B3**

La parte sommitale del blocco presenta un'ampia frattura centrale, ubicata tra la porzione B1 e la B2, percorribile a piedi. La porzione B2, apparentemente isolata dal resto, poggia sostanzialmente sul blocco B1 e ha come piede il blocco B3.



**Figura n.17 - Zona sommitale del masso tra B1 e B2**

## **FINALITÀ PROGETTUALI E INDAGINI EFFETTUATE**

L'obiettivo del progetto è quello di ridurre il rischio idrogeologico legato alla presenza, in località Colle delle Rocce nel Comune di Antrodoco, di un masso in equilibrio instabile.

In considerazione della singolare tipologia di affioramento si è reso necessario effettuare un rilievo geostrutturale che rappresenta il metodo di approccio per lo studio di un ammasso roccioso. La scrivente ha, quindi, realizzato un rilievo geostrutturale del masso ed eseguito n. 2 scan line del substrato affiorante nell'immediato intorno dello stesso, i risultati sono esposti nel paragrafo 7. Come già evidenziato più volte anche il rilievo geostrutturale è stato limitato, condizionato, nel suo svolgimento, dalla folta vegetazione boschiva e arbustiva e dalle condizioni impervie e acclivi dell'area in studio.

In considerazione della sismicità dell'area, classificata zona sismica 1 con pericolosità alta, quindi con un livello di vulnerabilità alto è stata programmata ed eseguita, in ordine al Regolamento Regionale n. 14 del 13 luglio 2016 una campagna di indagini geognostiche realizzata dalla Società Geovit Sondaggi srl di Viterbo su incarico dell'ufficio Speciale Ricostruzioni del Lazio. I risultati delle indagini condotte sono illustrati nella Relazione tecnica elaborato n. 2278/20 datato ottobre 2020 e sintetizzati di seguito. I risultati delle indagini sono esposti nel paragrafo 8.

Il set di indagini sia come tipologia che come ubicazione è stato fortemente condizionato dall'assetto impervio dell'area in studio.

- N. 1 sondaggio geognostico spinto alla profondità di 2.50 m
- N. 1 prelievo di campione di roccia
- N. 1 prova geotecnica di laboratorio
- N. 4 prove penetrometriche dinamiche tipo DPM
- N. 2 prove sismiche Masw
- N. 10 misure sismiche di microtrempi HVSR

### RILEVO GEOSTRUTTURALE

È stato eseguito un rilievo geostrutturale del blocco oggetto di studio, approfondendo l'assetto strutturale e lo stato delle principali fessurazioni visibili (cfr. par. 7.2.1).

Inoltre, al fine di inquadrare la tematica da un punto di vista più generale è stato effettuato uno scan line relativo a due settori ritenuti significativi: sono state eseguite due stazioni geomeccaniche (cfr. par.7.2.2), una a monte e una a valle del masso, realizzate secondo le procedure proposte dall'International Society for Rock Mechanics (ISRM). Sulla base dei dati raccolti con le stazioni geomeccaniche, è stato possibile definire la qualità dell'ammasso roccioso, l'indice di classificazione, il Rock Mass Rating (RMR) di Bieniawski (Bieniawski, 1989), lo Slope Mass Rating (SMR) di Romana (Romana, 1985) e ricavare alcuni parametri geomeccanici significativi, individuare i possibili cinematismi.

### Metodologia acquisizione dati

La metodologia di esecuzione della stazione geomeccanica è consistita nell'esecuzione di due stendimenti ortogonali (orizzontale e verticale) di lunghezza circa 5 m, lungo i quali sono stati acquisiti i dati secondo le procedure proposte dall'International Society for Rock Mechanics (ISRM). È stata utilizzata a tal scopo la scheda di raccolta dati di seguito riportata:

ID	STENDIMENTO		FRONTE			INCROCIO CON VERTICALE			LUNGH.			
	PROGRESSI	TIPO	IMMERSIONE	INCLINAZION	LUNGHEZZA (m)	PERSISTENZA	SCABREZZA	APERTURA (mm)	FORMA	RIEMPIMENTO	ACQUA	
		TIPO S = strato J = joint F = faglia				PERSISTENZA X = non visibile R = roccia D = discontinuità	SCABREZZA 1 = liscia 10 = rugosa			FORMA P = piana O = ondulata S = segmentata	RIEMPIMENTO A = assente C = coesivo I = incoerente	ACQUA A = asciutto U = umido S = stillicidio V = venute

**Figura n.18 - Scheda di rilievo**

Per ogni frattura individuata lungo lo stendimento sono stati misurati i parametri necessari per la definizione della geometria delle discontinuità, per la definizione del meccanismo di trasmissione degli sforzi e per la valutazione della qualità dell'ammasso roccioso (classificazione geomeccanica).

Tali parametri sono (seguendo la scheda sopra riportata):

- la giacitura del fronte, espressa attraverso i valori angolari di immersione ed inclinazione, acquisiti con bussola specifica per rilievi geostrutturali;
- il numero progressivo della discontinuità;
- la progressiva misurata in cm lungo la direzione di svolgimento dello stendimento (orizzontale e verticale), misura che, con le idonee correzioni dovute al diverso orientamento tra la discontinuità e il fronte, determina la spaziatura definita come la distanza tra

discontinuità appartenenti alla stessa famiglia misurata in direzione ortogonale alle discontinuità stesse; questo parametro condiziona le dimensioni teoriche del blocco roccioso che può essere isolato (Volume Roccioso Unitario - VRU) fondamentale per la definizione del blocco di progetto; discontinuità molto ravvicinate determinano modeste proprietà meccaniche dell'ammasso roccioso ma anche dimensioni ridotte del Volume Roccioso Unitario;

- il tipo di discontinuità da individuare tra strati, joint (fratture) e faglie;
- giacitura della discontinuità espressa attraverso i valori angolari di immersione ed inclinazione, acquisiti con bussola specifica per rilievi geostrutturali; l'orientazione delle discontinuità rispetto al fronte roccioso può determinare condizioni di instabilità, in particolare se associato ad altri fattori predisponenti; inoltre l'orientazione relativa delle famiglie individuate determina la forma dei singoli blocchi che possono essere isolati ed il cinematismo di rottura;
- la lunghezza della discontinuità, espressa in metri, determina la significatività della discontinuità ed è fondamentale per la classificazione geomeccanica dell'ammasso roccioso;
- la persistenza definita come la terminazione della discontinuità che può avvenire contro la roccia, contro un'altra discontinuità o non essere visibile; è un parametro fondamentale per la significatività della discontinuità stessa;
- la scabrezza rappresenta la rugosità delle superfici di una discontinuità e l'ondulazione rispetto al piano medio delle discontinuità, misurata mediante il "pettine di Barton"; il parametro scabrezza influenza notevolmente la resistenza al taglio;
- l'apertura è la distanza perpendicolare che separa le pareti di una discontinuità; in stretta connessione con il riempimento è un parametro fondamentale per la significatività della discontinuità stessa;
- la forma della discontinuità ha peso in osservazioni a grande scala del fronte roccioso, e viene generalmente fatto tramite un'osservazione visiva;
- il riempimento indica se presente il tipo di materiale che separa i labbri adiacenti delle discontinuità; la natura del riempimento determina diversi comportamenti per quanto riguarda la resistenza al taglio, deformabilità e permeabilità;
- l'eventuale presenza d'acqua nei giunti, che condiziona fortemente la stabilità dell'ammasso roccioso.

Su ogni stendimento, per le fratture più significative, è stata misurata la compattezza delle superfici di discontinuità tramite prove di resistenza a compressione uniassiale con "sclerometro da roccia" tipo L (Martello di Schmidt).

### Classificazione degli ammassi rocciosi

Sulla base dei dati raccolti alla stazione geomeccanica è stata seguita una classificazione geomeccanica dell'ammasso roccioso, utilizzando le due classificazioni più utilizzate per i versanti in roccia: il Rock Mass Rating (RMR) di Bieniawski (1989) e lo Slope Mass Rating (SMR) di Romana (1985).

Le classificazioni di Bieniawski e Romana (la seconda è derivata dalla prima, che risultava troppo "conservativa") consentono di soddisfare i quesiti richiesti e le problematiche che si presentano. La classificazione Rock Mass Rating (RMR) di Bieniawski considera i seguenti sei parametri, a ciascuno dei quali viene assegnato un punteggio, la cui somma definisce il valore RMR di base (RMRb):

- A1 = resistenza a compressione uniassiale;
- A2 = Rock Quality Designation Index (Indice RQD);
- A3 = spaziatura delle discontinuità;
- A4 = condizioni delle discontinuità;
- A5 = condizioni idrauliche;
- A6 = orientamento delle discontinuità.

Da questi sei parametri si ricava l'Rock Mass Rating (RMR, Bieniawski) e con le dovute correzioni apportate da Romana nel 1985 lo Slope Mass Rating (SMR).

L'RMR, nella pratica, viene differenziato come:

$$\text{RMR di base} = \text{RMRb} = A1 + A2 + A3 + A4 + A5$$

$$\text{RMR corretto} = \text{RMRc} = (A1 + A2 + A3 + A4 + A5) + A6$$

#### **A1 - Resistenza a compressione monoassiale (JCS)**

A1 si può ricavare sia da prove di laboratorio (Point Load Test), sia da prove di campagna mediante sclerometro o da prove speditive (Standard ISRM), definendo la resistenza a compressione uniassiale ( $S_u$ ).

La prova Point Load ha il vantaggio di essere portatile; da essa si deriva l'indice di carico puntuale  $I_s$  che viene correlato alla resistenza alla compressione uniassiale  $S_u$  mediante la relazione:

$$S_u = K I_s$$

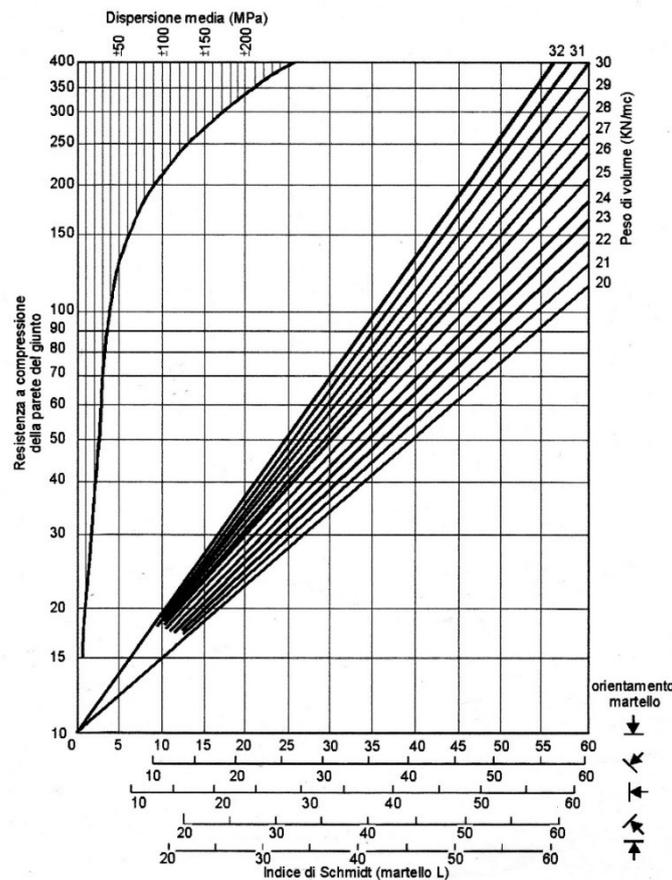
$K$  è un coefficiente moltiplicativo per il quale l'ISRM consiglia il valore 24, ma nella pratica si è evidenziato come tale valore non è univoco ma largamente variabile. Palmström suggerisce di variare  $K$  in funzione di  $I_s$  secondo lo schema seguente:

$I_s$ (MPa)	$K$
< 3,5	14
3,5 - 6,0	16
6,0 - 10,0	20
> 10,0	25

Nelle prove sclerometriche il martello di Schmidt, noto comunemente come sclerometro, è ampiamente utilizzato come prova non distruttiva e volta a misurare la “durezza di rimbalzo” della roccia. Dalla prova si ricava l’indice di rimbalzo R che è possibile correlare alla resistenza alla compressione uniassiale mediante la relazione di Irfan e Dearman (1978):

$$Su = 0,775 R + 21,3$$

oppure è possibile utilizzare il diagramma riportato sotto, assumendo il valore di peso di volume della roccia.



**Figura n.19 - Diagramma indice determinazione indice di rimbalzo**

Definita la resistenza a compressione  $S_u$  è possibile ricavare il valore del primo parametro  $A_1$ .

Se si utilizzano prove Point Load o prove sclerometriche risulta più agevole, rispetto alle tabelle e ai grafici proposte da Beniawsky, ricavare il valore di A1 trasformando i grafici in forma di equazioni:

VALORE DI $S_u$ (MPa)	EQUAZIONE
$\leq 44,5$	$A1 = \frac{4}{44,5} S_u + 1$
$44,5 \div 93,75$	$A1 = \frac{4}{49,25} S_u + 1,368$
$93,75 \div 140$	$A1 = \frac{3}{46,25} S_u + 2,919$
$140 \div 180$	$A1 = 0,0375 S_u + 6,75$
$180 \div 240$	$A1 = 0,025 S_u + 9$
$> 240$	$A1 = 15$

Qualora si utilizzi lo Standard ISRM si usa la tabella proposta da Beniawsky nell'ultima versione del sistema (1989):

$S_u$ (MPa)	$> 200$	$100 - 200$	$50 - 100$	$25 - 50$	$5 - 25$	$1 - 5$	$< 1$
Coefficiente A1	15	12	7	4	2	1	0

### **A2 - Rock Quality Designation (RQD)**

Se si effettuano sondaggi è possibile ricavare il valore di RQD, da cui si ottiene il coefficiente A2, dal recupero di percentuale di carotaggio riferito alla somma degli spezzoni di carota con lunghezza maggiore o uguale a 100 mm:

$$RQD = \frac{\sum L_c}{L_t} \times 100$$

dove:

$L_c$  = somma delle lunghezze degli spezzoni di carota  $> 100$  mm

$L_t$  = lunghezza totale del tratto in cui si è misurata  $L_c$ .

In mancanza di carote di sondaggio, RQD si ricava dal numero di famiglie di discontinuità caratterizzanti l'ammasso roccioso e dalla misura della loro spaziatura. Dalla relazione di Palmström (1982) si ha:

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

dove  $J_v$  è il numero di fratture per metro cubo di roccia

$$J_v = \sum (1/S_i)$$

dove  $S_i$  rappresenta la spaziatura espressa in metri per ciascuna famiglia individuata.

In forma alternativa RQD si può ricavare dalla formula di Priest e Hudson (1981):

$$RQD = 100 e^{(0,1 n)} (0,1 n + 1)$$

con n numero medio di giunti per metro.

Calcolato RQD con uno di questi metodi, si ricava il coefficiente A2 mediante le equazioni, che derivano sempre dai grafici di Beniauskis:

VALORE DI RQD %	EQUAZIONE
$\leq 26,5$	$A2 = \frac{3}{26,6} RQD + 3$
$26,5 \div 39$	$A2 = \frac{2}{12,4} RQD + 1,71$
$39 \div 76,6$	$A2 = \frac{7}{37,6} RQD + 0,739$
$> 76,6$	$A2 = \frac{5}{23,4} RQD - 1,367$

### A3 - Spaziatura delle discontinuità

Una volta calcolata la spaziatura media, cioè la distanza media tra due discontinuità adiacenti, è possibile ricavare il valore del coefficiente A3, mediante le seguenti relazioni:

SPAZIATURA (m)	EQUAZIONE
$\leq 0,2$	$A3 = 15 s + 5$
$0,2 \div 0,4$	$A3 = 10 s + 6$
$0,4 \div 0,66$	$A3 = 7,752 s + 5,9$
$0,66 \div 0,94$	$A3 = 7,067 s + 7,35$
$0,94 \div 1,6$	$A3 = 6,07 s + 8,288$
$1,6 \div 2,0$	$A3 = 5 s + 10$
$> 2,0$	$A3 = 20$

### A4 - Condizioni delle discontinuità

Determinare dalle tavole di classificazione di Beniauskis il valore numerico relativo alla condizione delle discontinuità, invece, risulta molto soggettivo.

Perciò per valutare correttamente A4 conviene procedere sommando alcuni parametri numerici attribuibili alla persistenza del giunto, all'apertura del giunto, alla rugosità dello stesso, all'alterazione delle pareti, e al materiale di riempimento:

$$A4 = V1 + V2 + V3 + V4 + V5$$

I valori da assegnare sono:

V1 - Persistenza del giunto

PERSISTENZA (m)	V1
< 1	6
1 ÷ 3	4
3 ÷ 10	2
10 ÷ 20	1
> 20	0

V2 - Apertura del giunto

APERTURA (mm)	V2
Completamente chiuso	6
< 0,1	5
0,1 ÷ 1	4
1 ÷ 5	1
> 5	0

V3 - Rugosità del giunto

RUGOSITA'	V3
Molto Rugosa	6
Rugosa	5
Leggermente rugosa	3
Liscia	1
Levigata	0

V4 - Alterazione delle pareti

ALTERAZIONE	V4
Non alterate	6
Leggermente alterate	5
Mediamente alterate	3
Molto alterate	1
Decomposte	0

V5 - Riempimento delle discontinuità

RIEMPIMENTO (mm)	RIEMPIMENTO	V5
-	Assente	6
< 5	Compatto	4
> 5	Compatto	2
< 5	Soffice	2
> 5	Soffice	0

**A5 - Presenza di acqua**

Questo valore viene derivato dalle condizioni idrauliche riferite ad un fronte di 10 m. Dalle tabelle fornite da Beniauskis si ottiene:

Venute d'acqua su 10 m di lunghezza	Nessuna	< 10 l/min	10-25 l/min	25-125 l/min	> 125 l/min
Condizione	Asciutta	Umida	Bagnata	Deboli venute	Forti venute
Coefficiente A5	15	10	7	4	0

### **A6 - orientamento delle discontinuità**

Per l'orientamento delle discontinuità si applica un coefficiente di correzione A6, a seconda che si tratti di gallerie o fondazioni.

Applicazione	Molto favorevole	Favorevole	Mediocre	Sfavorevole	Molto sfavorevole
Gallerie	0	-2	-5	-10	-12
Fondazioni	0	-2	-7	-15	-25

Per quanto riguarda i versanti il coefficiente A6 proposto da Beniauskis risulta troppo "conservativo" e pertanto nel calcolo di RMR si utilizza la metodologia proposta da Romana.

*Valore di RMR (Rock Mass Rating) e parametri caratteristici dell'ammasso.*

Attribuiti tutti i coefficienti, sulla base del valore RMRc calcolato si identificano 5 intervalli a cui corrispondono 5 classi di ammasso roccioso e altrettante valutazioni di qualità della roccia:

RMR <sub>c</sub>	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	<= 20
Classe	I	II	III	IV	V
Descrizione	Molto buono	Buono	Mediocre	Scadente	Molto scadente

Dal valore di RMRb si derivano i parametri caratteristici dell'ammasso, che secondo Beniauskis assumono il valore:

- coesione di picco  $c_p$  (kPa) = 5 RMRb
- angolo di attrito di picco  $\phi_p = 0,5 \text{ RMRb} + 5$
- modulo di deformazione E (GPa) = 2 RMRb - 100

I valori della coesione residua e dell'angolo di attrito residuo si ricavano introducendo nelle formule sopra indicate un valore di RMRb modificato secondo la:

$$\text{RMRb} = \text{RMRb}(\text{originario}) - [0,2 \times \text{RMRb}(\text{originario})] \quad (\text{Priest, 1983})$$

La formula di E è però da considerare valida per valori di RMR superiori di 50, mentre per valori inferiori si utilizza la formula di Serafim e Pereira (1983):

$$E \text{ (GPa)} = 10(\text{RMR}_b - 10 / 40)$$

Il valore di GSI (Geological Strength Index) viene ricavato dalla:

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

dove RMR viene calcolato tenendo conto dei punteggi assegnati ai primi quattro parametri e assumendo condizioni idrauliche asciutte (A5 = 15). Tale relazione è da ritenersi valida per RMR > 23.

*Slope Mass Rating (SMR, Romana 1985)*

Romana propone di aggiungere al valore di RMR (di base), alcuni fattori di aggiustamento sulla base dell'orientamento relativo fra discontinuità e fronte del versante e aggiungere un ulteriore fattore che tiene conto del metodo di scavo:

$$SMR = RMR_b + (F1 \times F2 \times F3) + F4$$

Il primo fattore di aggiustamento è il prodotto di tre fattori:

F1 dipende dal parallelismo fra l'immersione del fronte e l'immersione dei giunti.

F2 è riferito all'inclinazione del giunto nell'ipotesi di rottura planare.

F3 mantiene le relazioni proposte da Beniauskas per l'inclinazione fra fronte e giunti.

F4 rappresenta un fattore di correzione legato al metodo di scavo ed è stato fissato empiricamente.

Le condizioni di stabilità verificate sono relative rotture planari e per ribaltamento (toppling); il metodo è stato esteso anche alle rotture a cuneo di recente da Anbalagan et al.

Sulla base della tabella che segue si attribuiscono i valori ai fattori:

CASO		Molto favorevole	Favorevole	Mediocre	Sfavorevole	Molto sfavorevole
Planare Toppling Cuneo	$\alpha_j - \alpha_f$ $\alpha_j - \alpha_f - 180^\circ$ $\alpha_i - \alpha_f$	$> 30^\circ$	$30^\circ - 20^\circ$	$20^\circ - 10^\circ$	$10^\circ - 5^\circ$	$< 5^\circ$
	F1	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
Planare Cuneo	$\beta_j$ $\beta_i$	$< 20^\circ$	$20^\circ - 30^\circ$	$30^\circ - 35^\circ$	$35^\circ - 45^\circ$	$> 45^\circ$
	F2	0,15	0,40	0,70	0,85	1,00
Toppling	F2	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Planare Cuneo	$\beta_j - \beta_f$ $\beta_i - \beta_f$	$> 10^\circ$	$10^\circ - 0^\circ$	$0^\circ$	$0^\circ - (-10^\circ)$	$< -10^\circ$
Toppling	$\beta_j - \beta_f$	$< 110^\circ$	$110^\circ - 120^\circ$	$> 120^\circ$	-	-
	F3	0	- 6	- 25	- 50	- 60

dove:

$\alpha_j$  = immersione del giunto

$\alpha_i$  = immersione della retta di intersezione di due piani per la rottura a cuneo

$\alpha_f$  = immersione del fronte del versante

$\beta_j$  = inclinazione del giunto

$\beta_i$  = inclinazione della retta di intersezione di due piani per la rottura a cuneo

$\beta_f$  = inclinazione del fronte

Il fattore F4 vale invece:

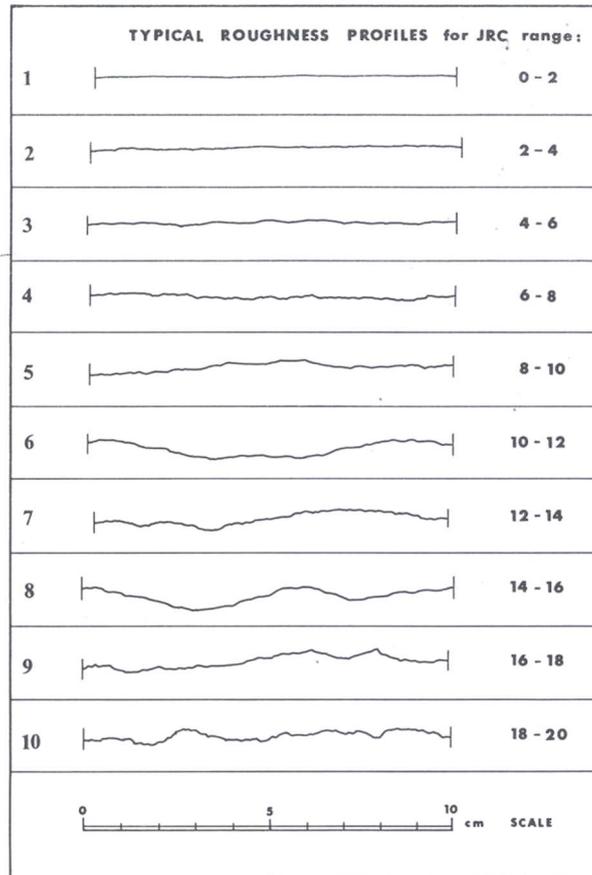
METODO DI SCAVO	F4
Scarpata naturale	15
Abbattimento con pretaglio	10
Abbattimento controllato	8
Abbattimento normale	0
Abbattimento non controllato	-8

Calcolato il valore di SMR, si possono avere indicazioni generali, fornite da Romana, sul grado di stabilità della scarpata, sul tipo di cinematismo di rottura che si può instaurare e su quanto possano pesare eventuali interventi di stabilizzazione:

SMR	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	20 - 0
CLASSE	I	II	III	IV	V
DESCRIZIONE	Molto buona	Buona	Mediocre	Scadente	Molto scadente
STABILITA'	Sicuramente stabile	Stabile	Parzialmente stabile	Instabile	Sicuramente instabile
MODO DI ROTTURA	Assente	Possibili blocchi	Lungo piani o per cunei	Lungo piani o su grandi cunei	Su grandi piani o rototraslazionali
STABILIZZAZIONE	Nessuna	Occasionale	Sistematica	Estesa	Riprofilare la scarpata

Sulla base dei dati raccolti sulla stazione geomeccanica si possono ricavare:

Scabrezza (JRC), corrispondente alle classi derivate dal confronto con i profili standard di rugosità di Barton.



**Figura n.20 - Indice di rugosità**

Il *Volume Roccioso Unitario* (VRU), in m<sup>3</sup>, che rappresenta il volume del blocco roccioso che può essere isolato; per il calcolo si utilizzano varie formule, tra le quali le più utilizzate sono:

$$VRU = 8 / \sum (Jvi)$$

dove *Jvi* rappresenta il numero di giunti per metro cubo di roccia per ogni famiglia, oppure:

$$Vb = (S1 * S2 * S3) / (\text{sen } \alpha * \text{sen } B * \text{sen } \gamma)$$

dove S1, S2, S3 rappresentano le spaziature delle tre famiglie principali e  $\alpha$ ,  $B$ ,  $\gamma$  gli angoli tra i rispettivi piani di orientamento.

### Cluster analysis

La cluster analysis o clustering è un insieme di tecniche di analisi multidimensionale che permette lo studio di un insieme di dati con lo scopo di raggruppare gli elementi all'interno di gruppi con caratteristiche omogenee. La cluster analysis si basa su misure relative alla somiglianza tra gli elementi, in termini di distanza in uno spazio multidimensionale. La bontà delle analisi ottenute con il clustering dipende molto dagli algoritmi di calcolo adottati, quindi da come è calcolata tale distanza. Gli algoritmi di clustering, infatti, raggruppano gli elementi sulla base della loro distanza reciproca e quindi l'appartenenza o meno ad un insieme dipende da quanto l'elemento preso in esame è distante dall'insieme stesso.

Tali tecniche sono valide anche per distanze angolari e pertanto sono comunemente adottate per il raggruppamento in gruppi (cluster) o famiglie dei dati sulla giacitura delle discontinuità raccolti durante indagini geologiche e geostrutturali.

La cluster analysis per applicazioni geologiche e geostrutturali prevede fondamentalmente due tecniche: il clustering gerarchico ed il clustering non gerarchico.

### Clustering gerarchico

Il clustering gerarchico consiste nella costruzione di un albero attraverso un processo di aggregazione. Ogni passo di elaborazione permette di aggregare i due cluster correntemente più vicini in un unico cluster fino a raggiungere un livello di aggregazione soddisfacente. I cluster più isolati rimangono sostanzialmente immutati, mentre per quelli meno definiti avviene una forte frammentazione.

Il processo funziona normalmente in due modi: selezionando un numero minimo di cluster oppure scegliendo una distanza massima accettabile. Pertanto uno dei problemi principali è costituito dalla scelta di un algoritmo da utilizzare per il calcolo della distanza tra i cluster.

Nell'ambito della cluster analysis per applicazioni geologiche e geostrutturali sono utilizzati generalmente tre metodi diversi:

- media di gruppo: consiste nel calcolare la distanza tra le coppie di campioni e quindi calcolarne il valore medio; è una metodologia che restituisce *cluster* piuttosto equilibrati spazialmente, e dà buoni risultati per applicazioni di tipo generico.
- vicino-prossimo: tra tutte le coppie di campioni viene scelta quella la cui distanza è minima, e questa distanza viene utilizzata come distanza tra i *cluster*; questa metodologia permette di riconoscere *cluster* anche molto allungati, in quanto l'aspetto determinante per l'aggregazione è la regolarità della distribuzione lungo l'asse del *cluster*.
- vicino-lontano: tra tutte le coppie di campioni viene scelta quella la cui distanza è massima, e questa distanza viene utilizzata come distanza tra i *cluster*; questa metodologia permette di riconoscere *cluster* piuttosto tozzi, in quanto l'elemento determinante nell'aggregazione non è

tanto la regolarità della distribuzione, quanto il diametro della circonferenza che racchiude i *cluster* da aggregare. Questo metodo risulta essere adatto ad elaborazioni ai fini del calcolo geomeccanico, dove assume importanza la compattezza geometrica del *cluster* piuttosto che la congruenza geologica in quanto minimizza la deviazione delle discontinuità reali dal centroide.

### **Clustering non gerarchico**

L'approccio del clustering non gerarchico è basato sulla iterazione di procedure volte ad ottimizzare la distribuzione dei cluster. Sulla base di una distanza angolare che rappresenta il limite di accettabilità dei singoli campioni all'interno dei cluster, si controlla l'appartenenza dei campioni al cluster. L'operazione viene ripetuta fin quando i cluster non vengono più modificati e si è giunti quindi ad una convergenza.

Il calcolo viene eseguito in parallelo su tutti i cluster, in quanto un campione appartiene potenzialmente al cluster il cui centroide è più vicino, e vi appartiene effettivamente se la distanza angolare da esso è inferiore a quello limite; qualora non sia così è possibile che durante l'iterazione della procedura alcuni campioni vengano esclusi da qualunque cluster oppure semplicemente migrino dall'uno all'altro.

L'importanza di questo approccio, valido in particolare nelle applicazioni geomeccaniche dove un polo può rappresentare un gruppo talora numeroso di discontinuità, consiste nel fatto che mentre il clustering gerarchico è una procedura puramente geometrica e non sono possibili migrazioni dei campioni, quello non gerarchico tiene conto anche della densità dei poli e quindi permette la migrazione dei campioni e quindi del centroide verso le zone più dense.

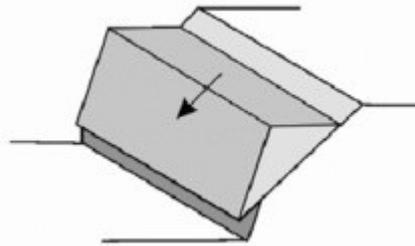
### **Analisi dei cinematismi potenziali**

Al fine di individuare i potenziali cinematismi che possono verificarsi lungo le discontinuità presenti nell'ammasso roccioso è stata eseguita un'analisi dei cinematismi (Kinematic Analysis) mediante il software dips ver.7.0 della Rockscience Inc. Tale software, sulla base di un'ampia bibliografia specifica (Goodman, 1980; Hudson and Harrison, 1997; Markland, 1972), permette di eseguire tramite l'utilizzo di proiezioni stereografiche l'analisi per i principali cinematismi di rottura in roccia (scivolamento planare, ribaltamento e rottura a cuneo) come di seguito descritto. Questi cinematismi stanno alla base del calcolo dell'indice SMR. Chiaramente, dato che questi test dipendono fortemente dall'esposizione del fronte, variazioni di esposizione del fronte possono determinare significativi cambiamenti dei risultati.

Le analisi cinematiche eseguite permettono di condurre, in un secondo momento e se necessario, delle verifiche di stabilità relativamente a casi specifici che riguardano una situazione puntuale che coinvolge una o più masse rocciose instabili laddove, fornendo ulteriori informazioni quali la resistenza al taglio delle discontinuità, le pressioni agenti lungo la superficie, i volumi e le masse coinvolte, derivabili dalle informazioni dedotte dal rilievo tridimensionali, è possibile eseguire l'analisi di stabilità e prevedere un intervento di stabilizzazione.

### Scivolamento planare

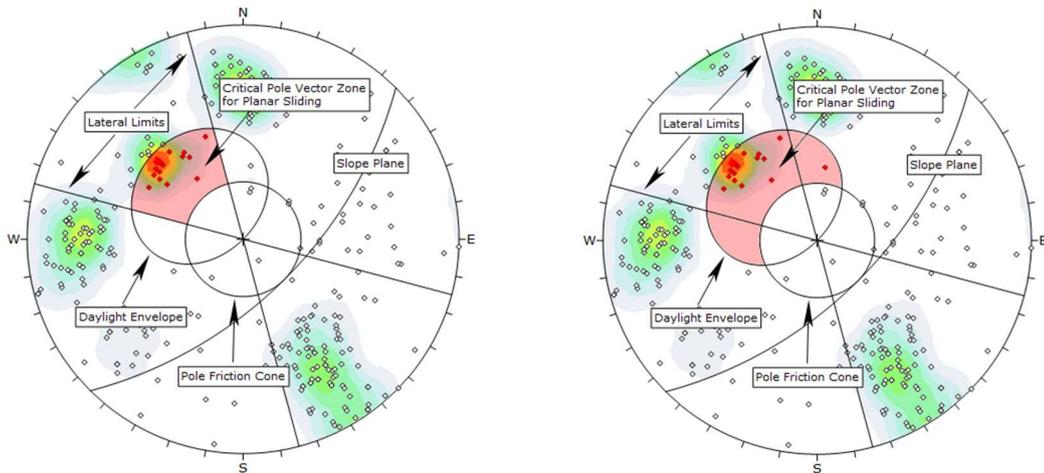
La frana per scivolamento planare avviene per scorrimento del blocco lungo una superficie di discontinuità piana. La condizione predisponente per il verificarsi dello scivolamento planare è che la superficie di scivolamento deve essere affiorante, disposta a franapoggio rispetto al pendio e deve avere un'inclinazione maggiore dell'angolo di attrito.



**Figura n.21 -Block diagram per scivolamento planare**

Nelle proiezioni stereografiche utilizzate nell'analisi i poli delle discontinuità soggette a questo tipo di cinematiso devono ricadere in un'area critica rappresentata dall'intersezione dell'area di daylight envelope, che rappresenta il luogo dei piani paralleli al pendio e quindi potenzialmente in grado di scivolare, e il cerchio rappresentante l'angolo di attrito interno.

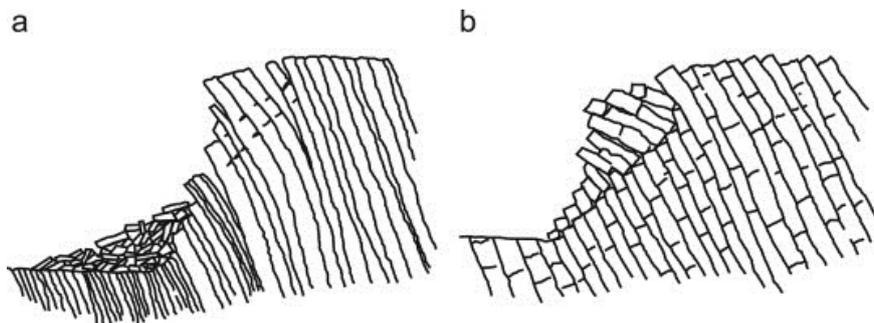
Una limitazione all'area critica è rappresentata dal limite laterale, in quanto si introduce un valore angolare di orientamento oltre il quale lo scivolamento diviene poco probabile. In pratica è stato osservato che lo scivolamento planare tende a verificarsi principalmente per valori di differenza dell'angolo di orientamento della discontinuità rispetto al pendio che rientrano indicativamente nei 30° (Hudson and Harrison, 1997).



**Fig. 22 - Proiezione stereografica per analisi cinematica per lo scivolamento planare, con limite laterale (a sinistra) e senza limite laterale (a destra). L'area in rosso rappresenta l'area di criticità del diagramma dove sono attesi questi cinematismi. I cerchi rappresentano i poli delle discontinuità. L'utilizzo dell'analisi senza limite laterale è maggiormente precauzionale, l'area critica è infatti più ampia**

Ribaltamento

La frana per ribaltamento si verifica in genere nelle rocce lapidee, allorquando un blocco o una colonna di roccia ruota frontalmente e crolla. Il ribaltamento viene distinto in flessurale quando coinvolge una sola discontinuità disposta a reggipoggio rispetto al pendio e diretto quando è presente anche una discontinuità basale disposta a franapoggio rispetto al pendio.

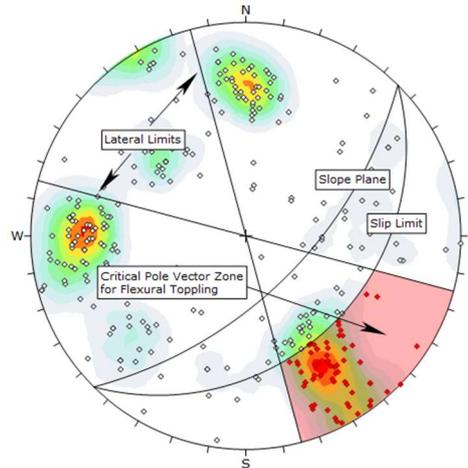


**Figura n. 23 -Block diagram per ribaltamento: flessurale (a) e diretto (b)**

Nelle proiezioni stereografiche utilizzate nell'analisi i poli delle discontinuità soggette a questo tipo di cinematismo devono ricadere in un'area critica. L'area critica però è definita in modo differente per il ribaltamento flessurale e per quello diretto, in quanto per il secondo risulta fondamentale l'intersezione dei piani di discontinuità nello spazio.

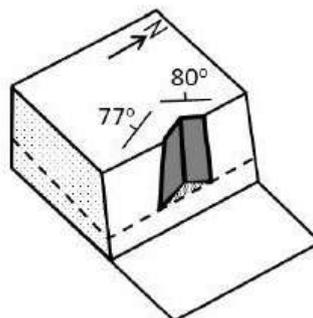
Nel ribaltamento flessurale l'area critica è limitata da un piano limite (slip limit) definito come un piano parallelo al pendio la cui inclinazione è dovuta alla differenza tra la pendenza del pendio e

l'angolo di attrito (Goodman, 1980), e dal limite laterale definito come per lo scivolamento planare (Hudson and Harrison, 1997).



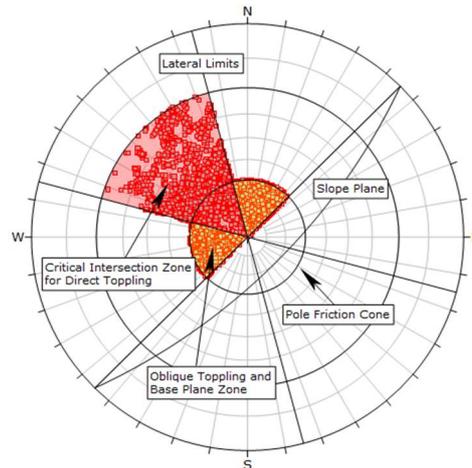
**Figura n.24 - Proiezione stereografica per analisi cinematica per il ribaltamento flessurale. L'area in rosso rappresenta l'area di criticità del diagramma dove sono attesi questi cinematismi. I cerchi rappresentano i poli delle discontinuità**

Nel ribaltamento diretto ci sono delle condizioni per le quali può verificarsi il cinematismo: devono esistere due discontinuità che si intersecano e che creano il blocco in ribaltamento e deve esistere una terza discontinuità che si comporta da piano di rilascio o di scivolamento (generalmente con pendenze sub-orizzontali). Pertanto è fondamentale come si intersecano le discontinuità in riferimento all'orientamento del pendio.



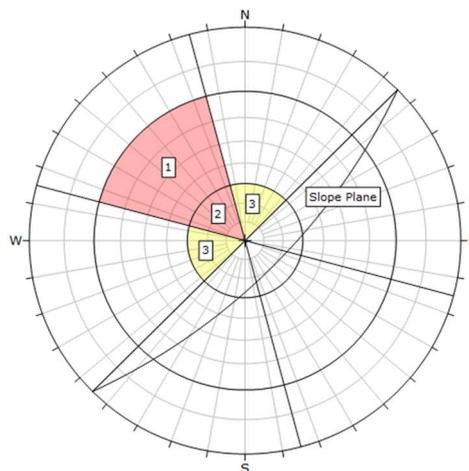
**Figura n.25 - Block diagram per ribaltamento diretto che illustra la situazione descritta**

L'area di criticità è delineata dall'angolo di inclinazione del pendio e dall'angolo di attrito basale, al quale si aggiunge il limite laterale definito come abbiamo visto sopra (Hudson and Harrison, 1997). I poli dei piani di intersezione devono cadere nell'area critica.



**Figura n. 26- Proiezione stereografica per analisi cinematica per il ribaltamento diretto. Esistono due aree critiche, descritte nella figura successiva, dove sono attesi questi cinematismi. I cerchi rappresentano le intersezioni tra i piani delle discontinuità.**

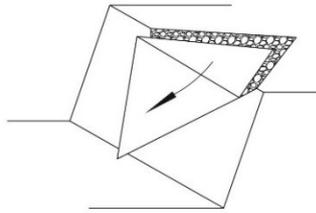
L'area di criticità è inoltre suddivisa in tre zone: la zona 1 e la zona 2 sostanzialmente equivalenti per criticità e la zona 3. La zona 1 rappresenta l'area dove i cinematismi di ribaltamento e scivolamento del blocco possono agire simultaneamente; la zona 2 e la zona 3 rappresentano la zona dove, dato l'angolo di attrito, non è possibile lo scivolamento ma solo il ribaltamento; la zona 3, nello specifico, rappresenta l'area critica per ribaltamento obliquo, che è meno probabile.



**Figura n.27 - Proiezione stereografica per analisi cinematica per il ribaltamento diretto che illustra le zone di criticità così come descritte nel testo.**

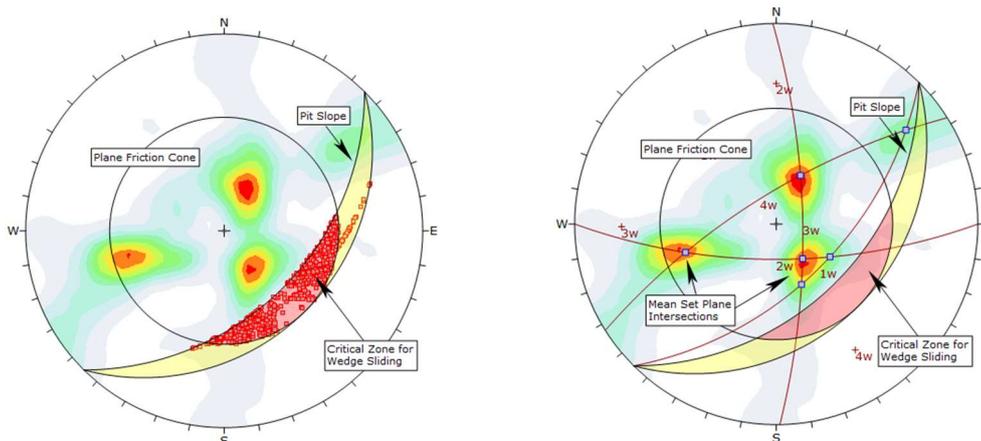
### Scivolamento a cuneo

La frana per scivolamento a cuneo avviene per scivolamento lungo l'intersezione di due superfici di discontinuità. La componente dell'intersezione dei due piani deve trovarsi su una superficie disposta a franapoggio rispetto al pendio e deve avere un'inclinazione maggiore dell'angolo di attrito. Lo scivolamento del cuneo roccioso può avvenire lungo l'intersezione tra i due piani di discontinuità oppure lungo uno solo dei due piani, se questo presenta una giacitura maggiormente favorevole allo scivolamento dell'intersezione. In entrambi i casi sono situazioni di criticità.



**Figura n.28 - Block diagram per rottura a cuneo**

Nelle proiezioni stereografiche utilizzate nell'analisi le intersezioni tra i piani delle discontinuità devono ricadere in un'area critica esterna al piano di giacitura del pendio e compresa nell'angolo di attrito. Si definisce così una zona critica principale dove lo scivolamento del cuneo roccioso può avvenire lungo l'intersezione tra i due piani di discontinuità oppure lungo uno solo dei due piani. Una seconda zona critica, considerata secondaria, è rappresentata dall'area compresa tra il piano del pendio e un piano parallelo al pendio inclinato con angolo di attrito. In questa zona sono possibili scivolamenti a cuneo lungo uno solo dei due piani che ha inclinazione superiore all'angolo di attrito, mentre l'intersezione ha inclinazione minore all'angolo di attrito.



**Figura n.29 -Proiezione stereografica per analisi cinematica per lo scivolamento a cuneo: a sinistra sono riportate le intersezioni tra i piani delle discontinuità, mentre a destra sono evidenziate le intersezioni tra i piani medi delle famiglie; si noti come nel secondo caso la criticità per questo tipo di cinematiso sia sottostimata. In entrambi i grafici sono riportate l'area critica principale (in rosso) e l'area critica secondaria (in giallo).**

### **Elaborazione delle stazioni geomeccaniche**

Sulla base delle famiglie riconosciute con la cluster analysis applicata a tutti i dati raccolti in campo, si è proceduto ad elaborare i dati raccolti sulla stazione geomeccanica, eseguendo un processo di clustering gerarchico vicino-lontano seguito da un clustering non gerarchico con una distanza angolare limite di  $40^\circ$ . Vengono riportati:

1. il diagramma di densità dei poli, dove tutte le giaciture, rilevate nella relativa stazione geomeccanica, sono state rappresentate come poli dei piani su un reticolo stereografico, con proiezione nell'emisfero inferiore, al fine di ottenere una distribuzione su tutto il reticolo che mostra gli addensamenti maggiori in determinate posizioni; sono riportati anche il polo della singola discontinuità rilevata divisa per tipo (stratificazione e fratturazione);
2. il diagramma a rosetta, in cui le direzioni delle discontinuità rilevate sono riportate in un istogramma di frequenza circolare, dove l'azimuth del segmento di arco rappresenta il range di direzione delle discontinuità così raggruppate e la lunghezza del segmento di arco la frequenza cumulativa;
3. risultati del *clustering* tramite proiezione stereografica sul reticolo equiareale equatoriale dei poli di tutte le discontinuità rilevate, rappresentate con colore e simbolo differente per indicare il *cluster* in cui ricadono; sono riportati anche i poli e le ciclografiche del piano rappresentativo dei singoli *cluster* riconosciuti con la *cluster analysis*;
4. una tabella riassuntiva che riporta: l'indicazione di ubicazione della stazione, la giacitura del fronte, le famiglie riconosciute con la *cluster analysis* e la giacitura del polo rappresentativo, un coefficiente di dispersione statistico per ogni singola famiglia (Fisher's K);
5. la proiezione stereografica sul reticolo equiareale equatoriale, noto anche come reticolo di Schmidt, tramite ciclografiche del piano rappresentativo delle famiglie principali; nella rappresentazione è riportata anche la giacitura del fronte (F).
6. i risultati della classificazione (Beniawski 1989 e Romana 1985) con il calcolo dei parametri caratteristici dell'ammasso, con i corrispondenti valori del Rock Mass Rating (RMR) e dello Slope Mass Rating (SMR);
7. una tabella riassuntiva dei risultati ottenuti, riportante i parametri geomeccanici ricavati con le modalità riportate precedentemente ed illustrate nella sezione generale;
8. le con proiezioni stereografiche che riportano i risultati dell'analisi dei cinematismi per i tre cinematismi attesi (ribaltamento, scivolamento planare e scivolamento a cuneo), che stanno alla base del calcolo dell'indice SMR; l'analisi è eseguita sulla base dell'orientamento del fronte per ogni singolo stendimento, delle giaciture della discontinuità rilevate e delle famiglie principali riconosciute con la *cluster analysis*, utilizzando come angolo di attrito

interno quello determinato partendo dal valore RMRb di Bieniawsky; in ogni proiezione stereografica viene individuata l'area critica dove è potenzialmente atteso il cinematismo di rottura;

- una tabella riepilogativa che riporta per ogni famiglia i potenziali cinematismi attesi.

### Rilievo geostrutturale delle aree di indagine

#### Rilievo geostrutturale del blocco

Durante le indagini è stato eseguito un rilievo geostrutturale del masso in oggetto focalizzando l'attenzione sull'assetto strutturale e sullo stato delle fessurazioni principali. Ovviamente essendo i massi di dimensioni notevoli, con esposizione di difficile raggiungimento, non è stato possibile un rilievo completo di tutte le fratture presenti ma soltanto di quelle significative che condizionano lo stato di equilibrio dei massi stessi.

I massi individuati sono stati indicati con le lettere B1, B2 e B3 come nella figura sotto riportata.

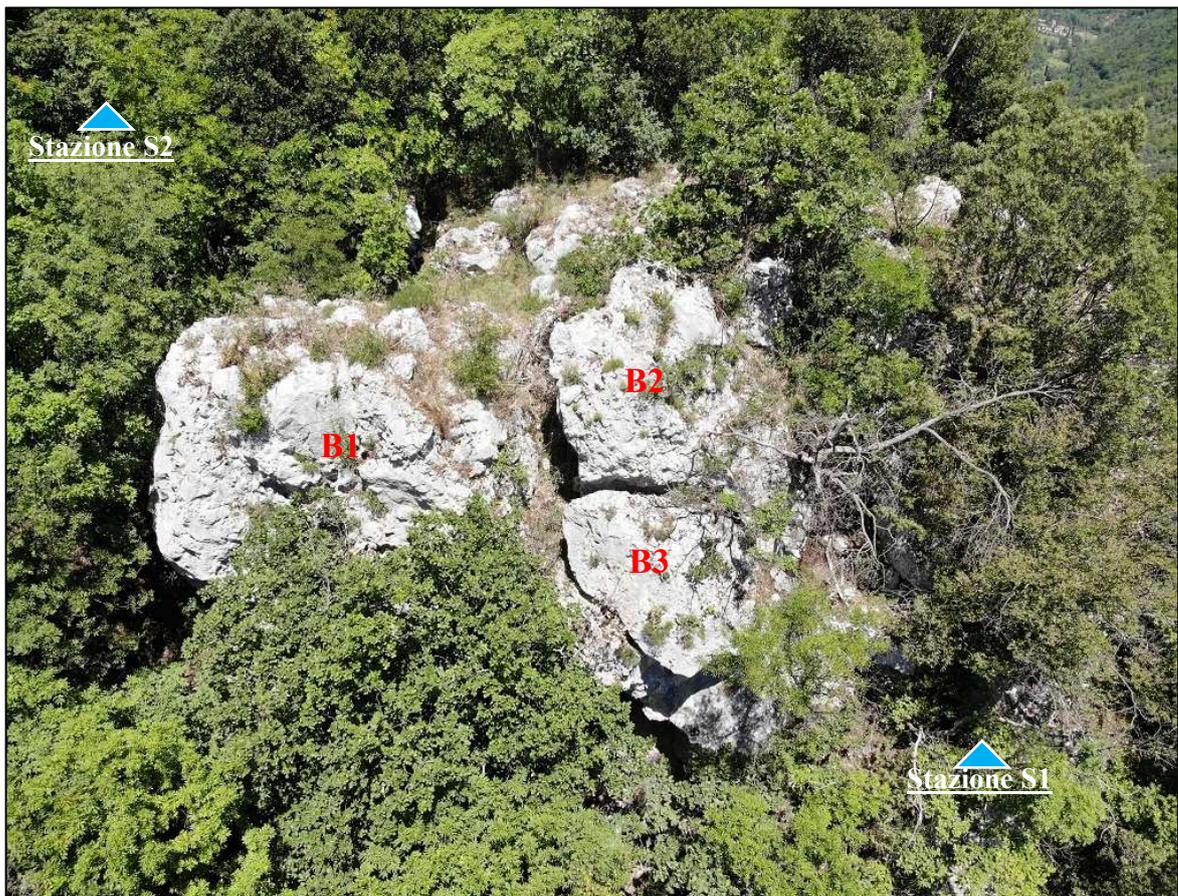


Figura n.30 -Individuazione dei singoli massi nel blocco e ubicazione Scan line

### **Blocco B1**

Il blocco B1 è il più grande e costituisce quasi l'intera volumetria del blocco oggetto di indagini; su di esso appoggiano i blocchi più piccoli B2 e B3. Il blocco B1 espone lateralmente sul versante interno con fronte che guarda a S Est, mentre la faccia principale espone sul versante che degrada sul fondovalle ad Est.



**Figura n.31 - Vista laterale del blocco B1**

Al piede la zona di appoggio sul versante è caratterizzata da notevoli vuoti dovuti alla sequenza stratigrafica, alla fratturazione e al verificarsi di intensi fenomeni di carsismo che hanno determinato la formazione di cavità anche di dimensioni significative, la cui presenza non si può escludere in profondità.

I sistemi di frattura principali rilevati sono quelli che determinano la forma del blocco in quanto lo isolano su tutti i lati, alcuni sono le facce di esposizione a SE ed Est, altre rappresentano fratture profonde che isolano il blocco dal substrato retrostante.

Sono state rilevate le seguenti fratture la cui orientazione rispetto al blocco e la proiezione ciclografica sono riportate nella figura successiva:

Frattura	Immersione °N	Inclinazione °
F1-1	94	82
F1-2	30	85
F1-3	355	80
F1-4	125	80
F1-5	290	70

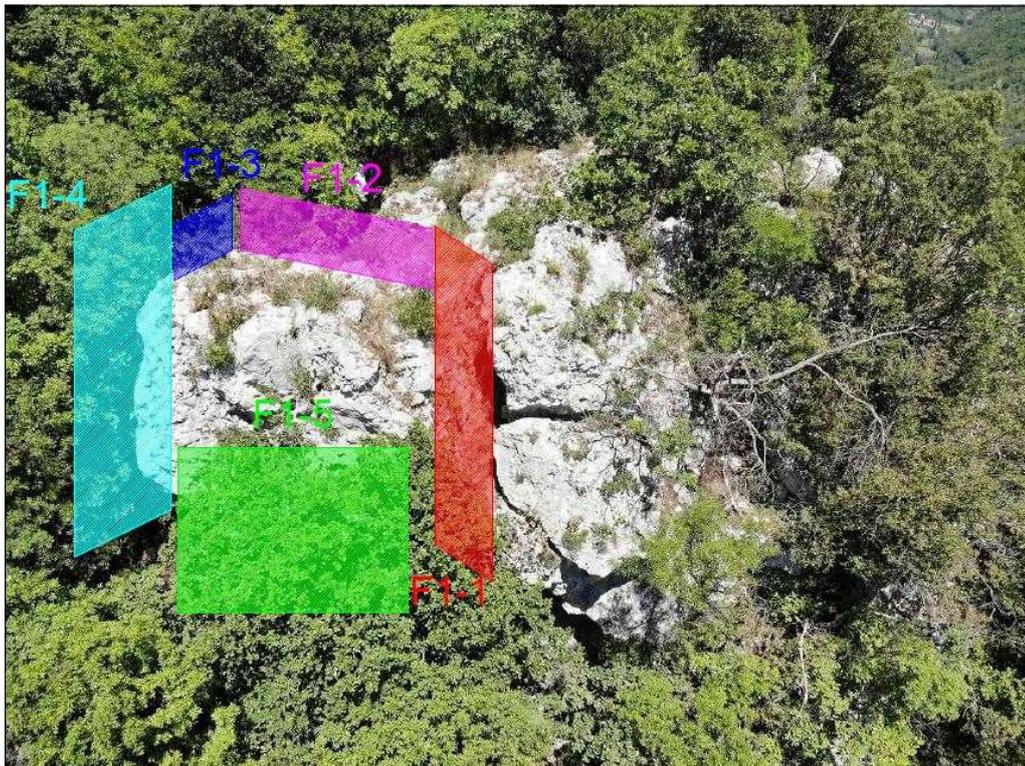
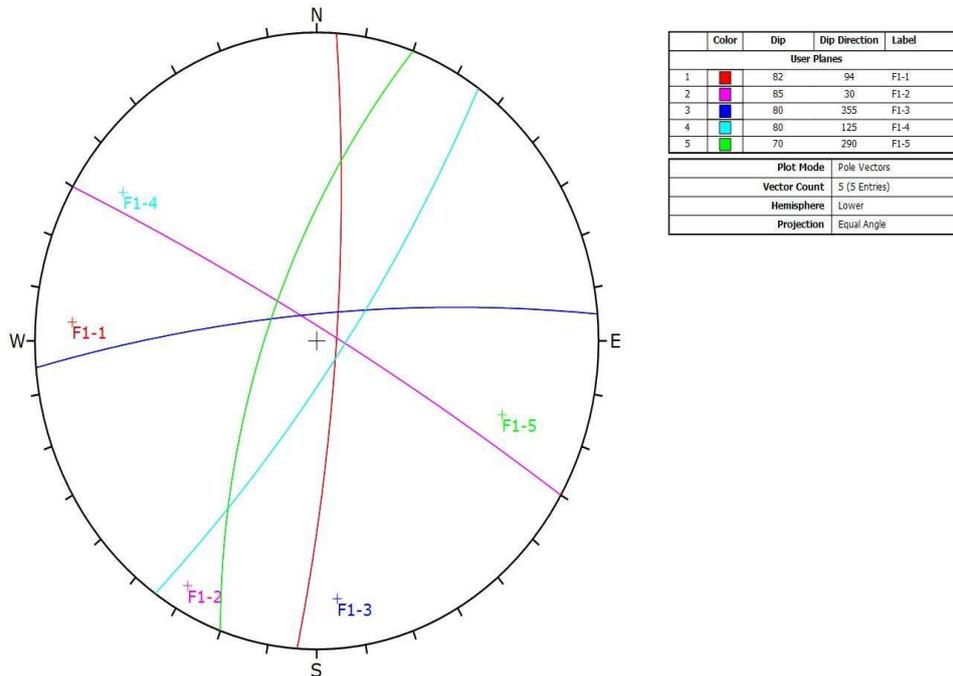


Figura n.32 - Schematizzazione delle fratture rilevate rispetto alla geometria del blocco B1



**Figura n.33 - Proiezione ciclografica delle fratture rilevate**

Per quanto riguarda i cinematismi potenziali che interessano il blocco, considerando la giacitura del fronte prevalente quella Est, risulta una elevata instabilità dovuta al cinematismo di scivolamento a cuneo dovuto principalmente alle fratture F1-1, F1-2 e F1-4 che determinano una condizione di criticità del 50%, ovvero che di tutti gli incroci possibili tra le fratture presenti, il 50% di essi determina condizione di instabilità. Ad ogni modo, la condizione di scivolamento non è necessariamente parallela al versante, difatti, poiché non vi sono vincoli laterali a sud est, il blocco potrebbe avere anche un movimento di rotazione laterale, causato principalmente dalla presenza di vuoti al piede.

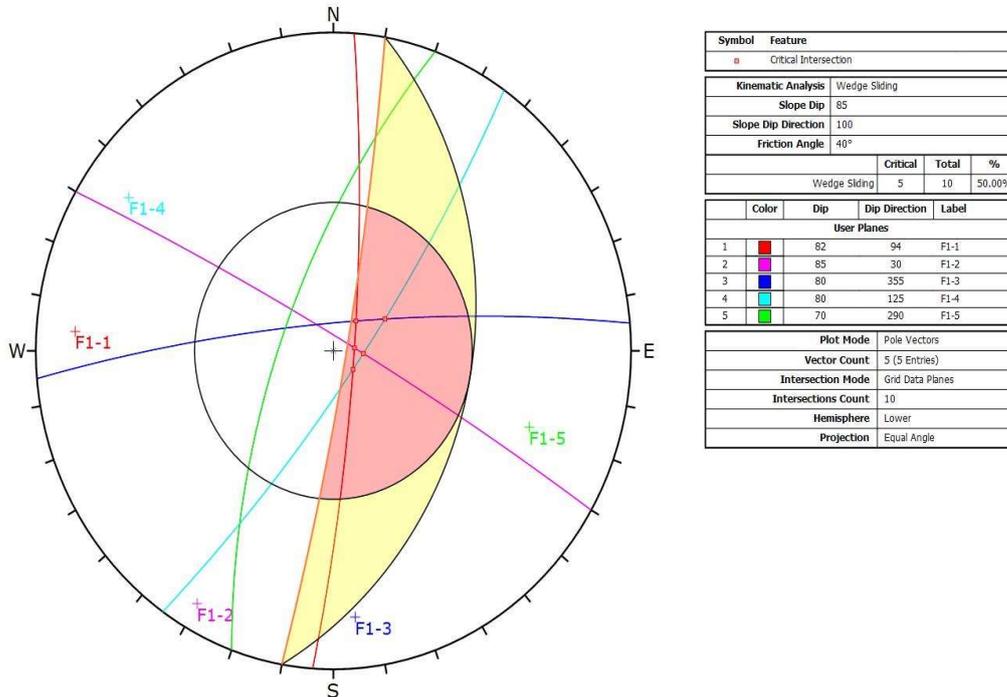


Figura n.34 - Analisi del cinematismo di rottura per lo scivolamento a cuneo

### Blocco B2

Il blocco B2 si trova sulla sommità della propaggine settentrionale del blocco B1 espone sul versante che degrada sul fondovalle ad Est. Appoggia sostanzialmente sul blocco B1 dal quale si presenta isolato da una profonda frattura laterale ed è visibile anche la stratificazione che immerge verso Est.



Figura n.35 - Vista del blocco B2

Sono state rilevate le seguenti fratture la cui orientazione rispetto al blocco e la proiezione ciclografica sono riportate nelle figure successive:

Frattura	Immersione °N	Inclinazione °
F2-1	357	58
F2-2	82	72
F2-3	85	7
F2-4	305	75
F2-5	100	70

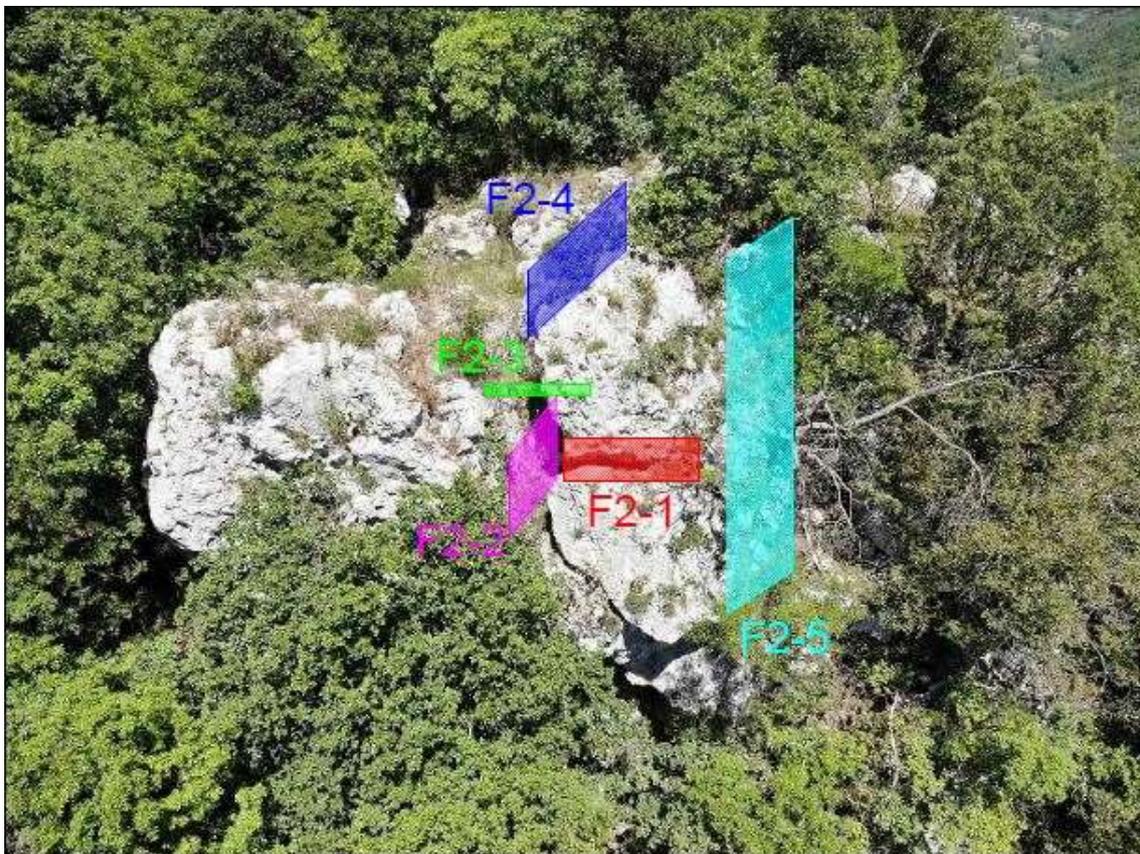
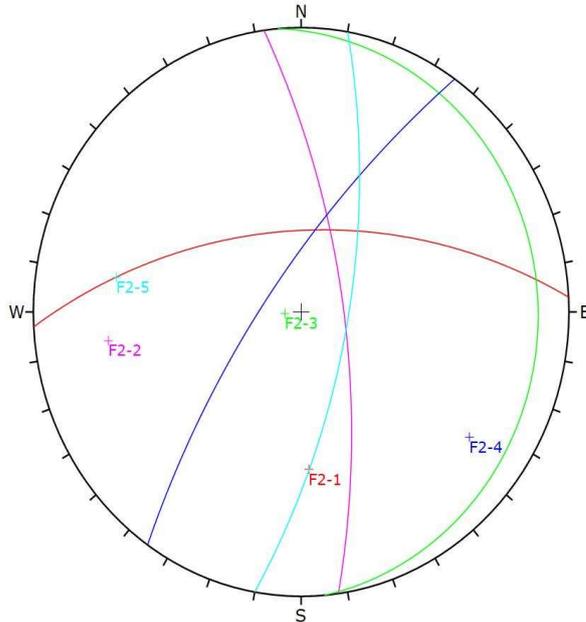


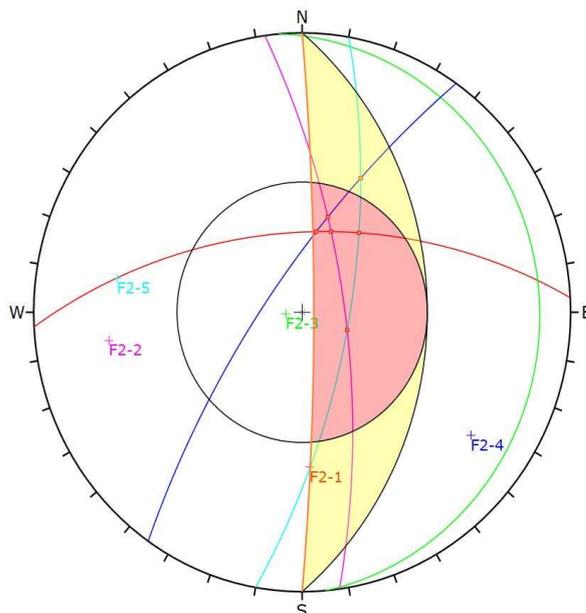
Figura n.36 - Schematizzazione delle fratture rilevate rispetto alla geometria del blocco B2



	Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes				
1		58	357	F2-1
2		72	82	F2-2
3		7	85	F2-3
4		75	305	F2-4
5		70	100	F2-5
Plot Mode		Pole Vectors		
Vector Count		5 (5 Entries)		
Hemisphere		Lower		
Projection		Equal Angle		

**Figura n.37 - Proiezione ciclografica delle fratture rilevate**

Per quanto riguarda i cinematismi potenziali che interessano il blocco, considerando la giacitura del fronte quella Est, risulta una elevata instabilità dovuta al cinematismo di scivolamento a cuneo dovuto sostanzialmente a tutte le fratture anche se principalmente sono le fratture F2-2 e F2-5 che concorrono a determinare determinano una condizione di criticità del 60%.



Symbol	Feature			
■	Critical Intersection			
Kinematic Analysis				
Wedge Sliding				
Slope Dip	65			
Slope Dip Direction	90			
Friction Angle	40°			
Wedge Sliding				
Critical	Total	%		
6	10	60.00%		
User Planes				
1		58	357	F2-1
2		72	82	F2-2
3		7	85	F2-3
4		75	305	F2-4
5		70	100	F2-5
Plot Mode		Pole Vectors		
Vector Count		5 (5 Entries)		
Intersection Mode		Grid Data Planes		
Intersections Count		10		
Hemisphere		Lower		
Projection		Equal Angle		

**Figura n.38 - Analisi del cinematismo di rottura per lo scivolamento a cuneo**

### ***Blocco B3***

Il blocco B3 si trova poco più avanti del blocco B2 in posizione ancora più aggettante. Anche il blocco B3 appoggia sul blocco B1 dal quale si presenta isolato da una profonda frattura laterale. È anche visibile la stratificazione che immerge verso Est.



**Figura n.39 - Vista del blocco B3**

Sono state rilevate le seguenti fratture la cui orientazione rispetto al blocco e la proiezione ciclografica sono riportate nella figura successiva:

Frattura	Immersione °N	Inclinazione °
F3-1	80	5
F3-2	340	55
F3-3	83	72
F3-4	200	80

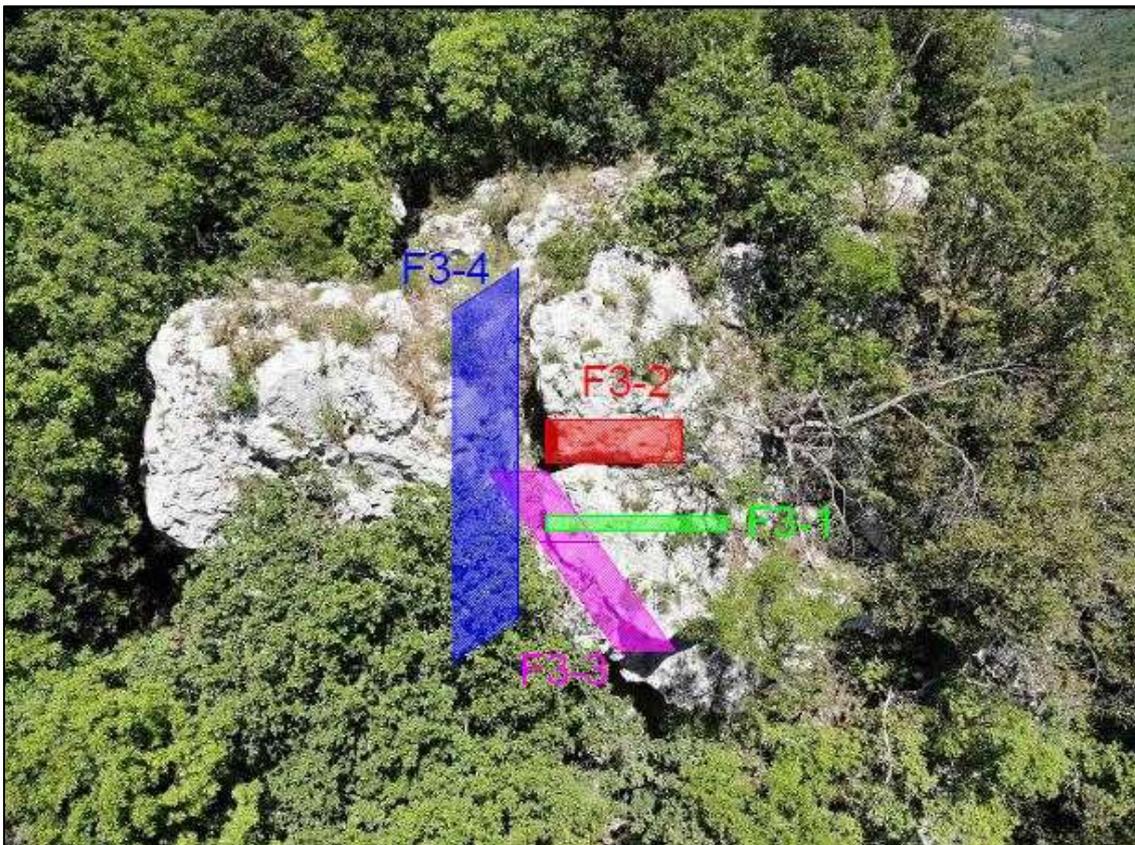
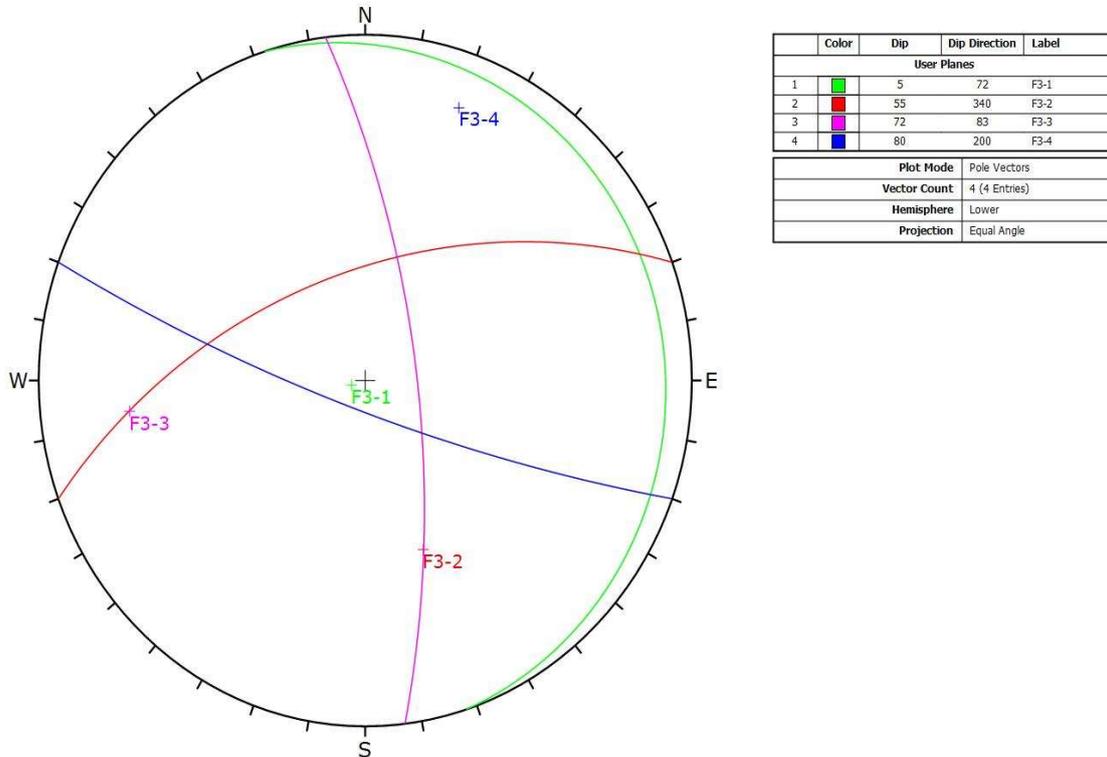
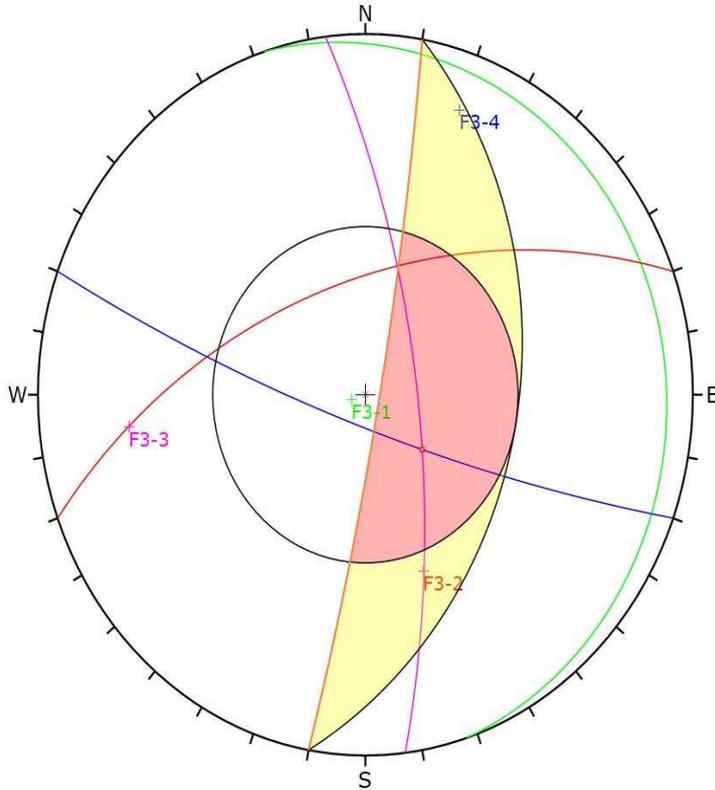


Figura n.40 - Schematizzazione delle fratture rilevate rispetto alla geometria del blocco B3



**Figura n.41 - Proiezione ciclografica delle fratture rilevate**

Per quanto riguarda i cinematismi potenziali che interessano il blocco, considerando la giacitura del fronte quella Est, risulta una instabilità dovuta al cinematismo di scivolamento a cuneo dovuto sostanzialmente alle fratture anche se principalmente sono le fratture F3-3 e F3-4 che determinano una condizione di criticità del 16%.



Symbol	Feature
■	Critical Intersection

Kinematic Analysis		Wedge Sliding		
Slope Dip	85			
Slope Dip Direction	100			
Friction Angle	40°			
		Critical	Total	%
	Wedge Sliding	1	6	16.67%

Color	Dip	Dip Direction	Label
User Planes			
1	5	72	F3-1
2	55	340	F3-2
3	72	83	F3-3
4	80	200	F3-4

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	4 (4 Entries)
Intersection Mode	Grid Data Planes
Intersections Count	6
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

Figura n.42 - Analisi del cinematismo di rottura per lo scivolamento a cuneo

## Scan line del substrato affiorante

### Stazione S1

La stazione n. 1 è stata realizzata in corrispondenza di una parete ubicata immediatamente sotto il masso B3. L'ubicazione della stazione è indicata in fig. 30.



Figura n. 43 - Traccia stazione S1

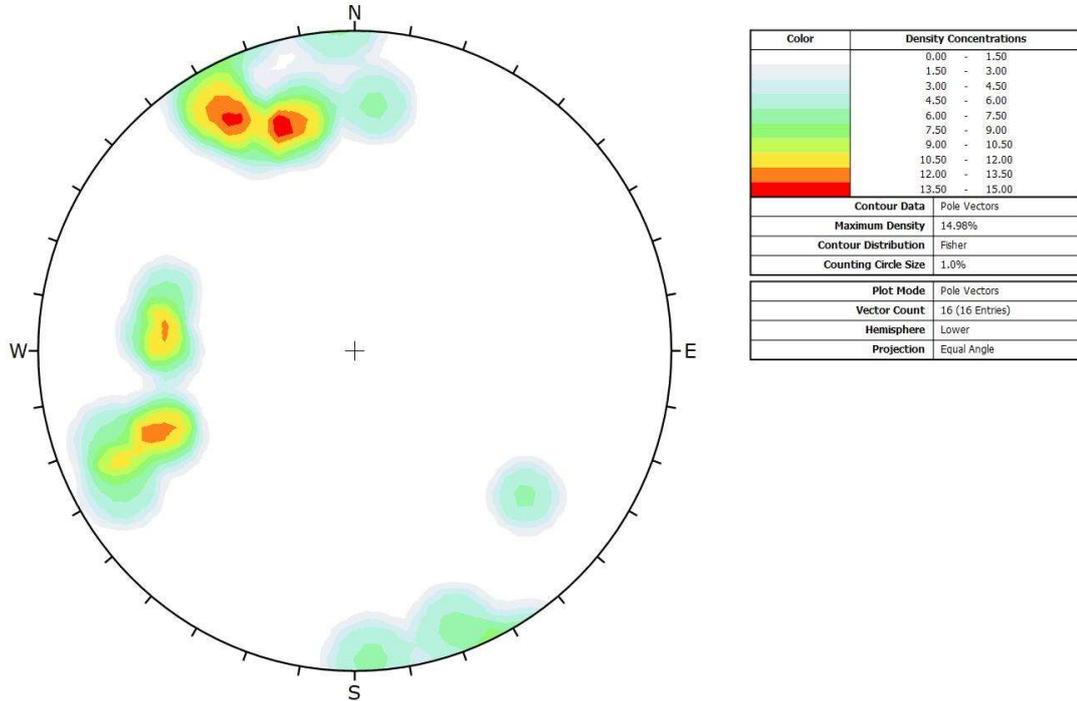


Figura n. 44 - Diagramma di densità dei poli

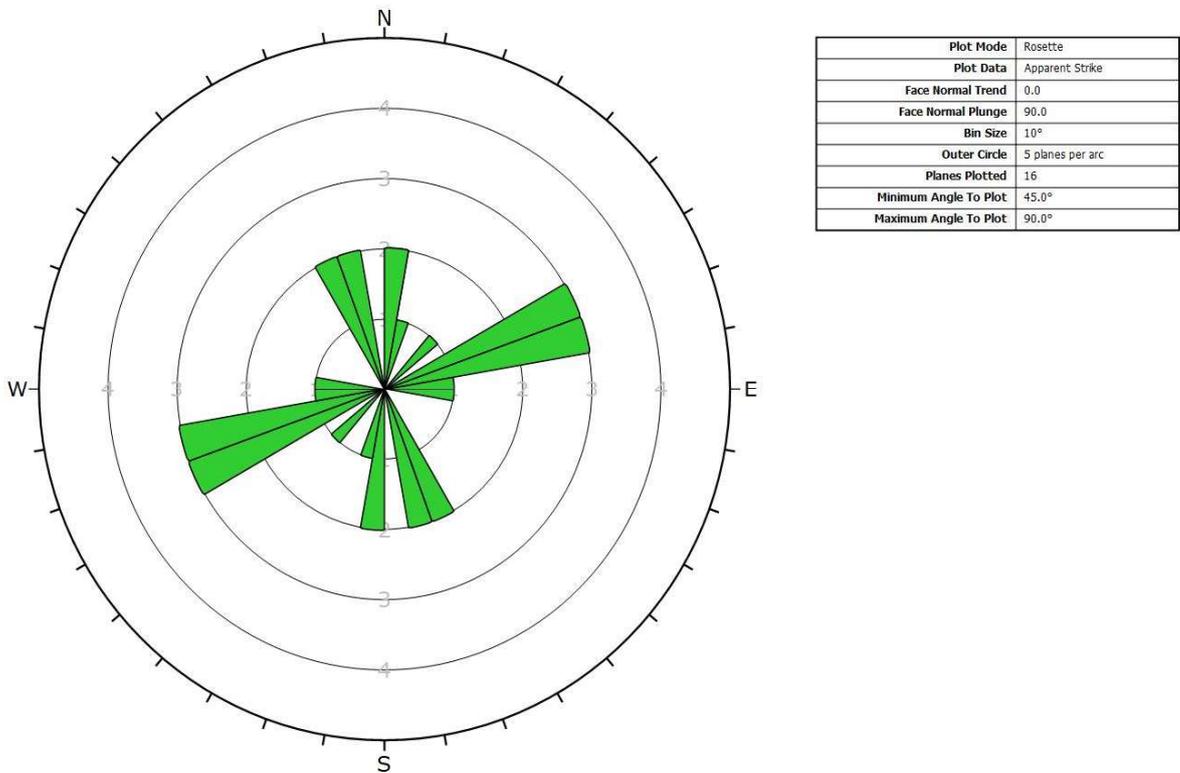
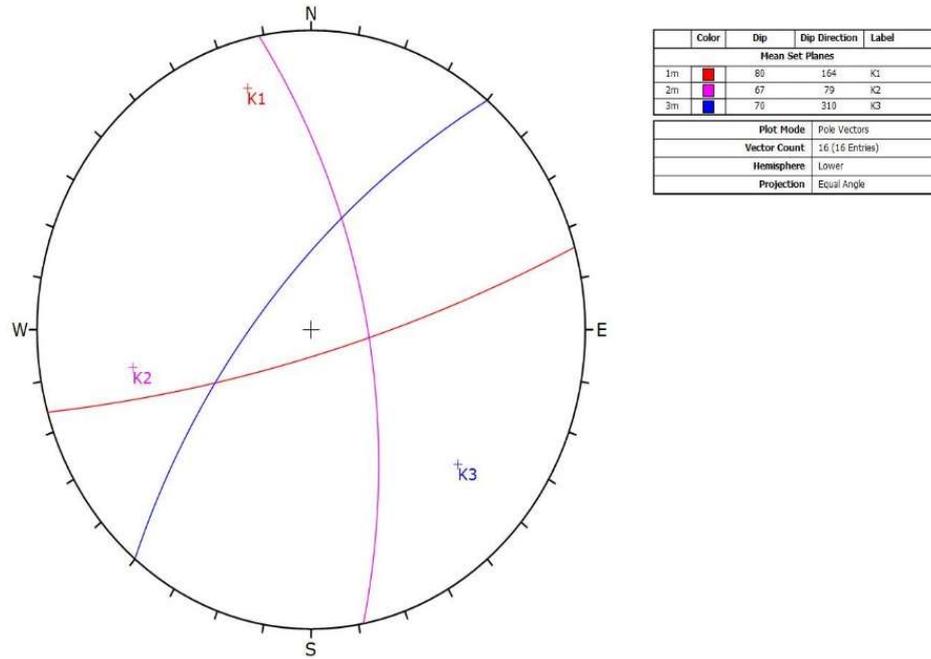
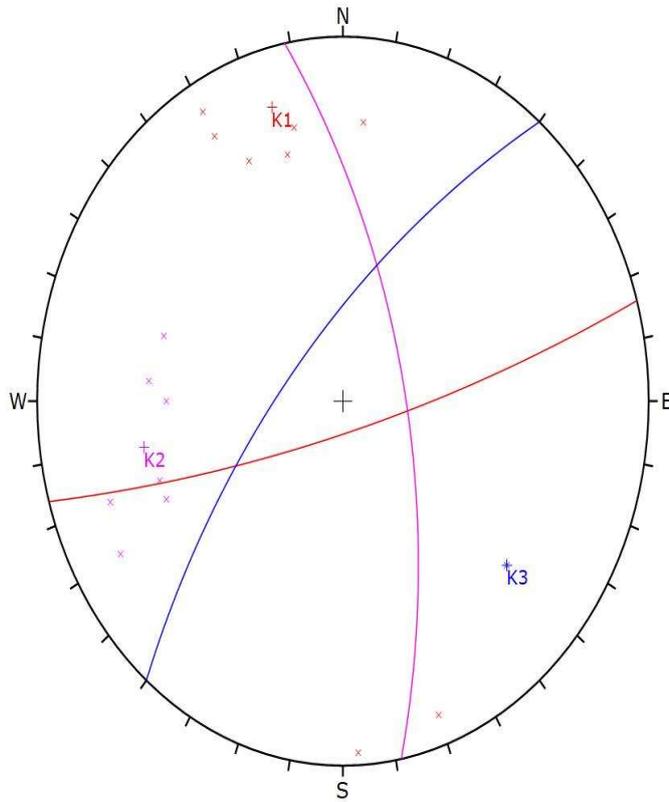


Figura n. 45 - Diagramma a rosetta



**Figura n.46- Diagrammi di clustering**

Tabella delle famiglie principali						
Fronte		Ubicazione	Famiglia	Giacitura		Coefficiente di Fisher (K)
Immersione	Inclinazione			imm.	inc.	
120	85	base parete blocchi	K1	164	80	27
			K2	79	67	20
			K3	310	70	/



Symbol	Set	Quantity
x	1	8
x	2	7
x	3	1

	Color	Dip	Dip Direction	Label
Mean Set Planes				
1m	Red	80	164	K1
2m	Purple	67	79	K2
3m	Blue	70	310	K3

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	16 (16 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

**Figura n.47 - Proiezione ciclografiche delle famiglie principali**

Risultati relativi a Rock Mass Rating (RMR)

Resistenza a compressione Su (MPa)	Rock Quality Designation (RQD)
61	95

V1	V2	V3	V4	V5
6	0	5	5	2

Classificazione dell'ammasso roccioso

RMRbase	RMRcorretto	Classe	Descrizione
70	-	Seconda	Buona

Caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso roccioso

Modulo di deformazione (GPa)	Geological Strength Index (GSI)	Coesione di picco (kPa)	Angolo di attrito di picco (°)	Scabrezza (JRC)	Volume Roccioso Unitario (m <sup>3</sup> )
39	67	348	40	7	1.35

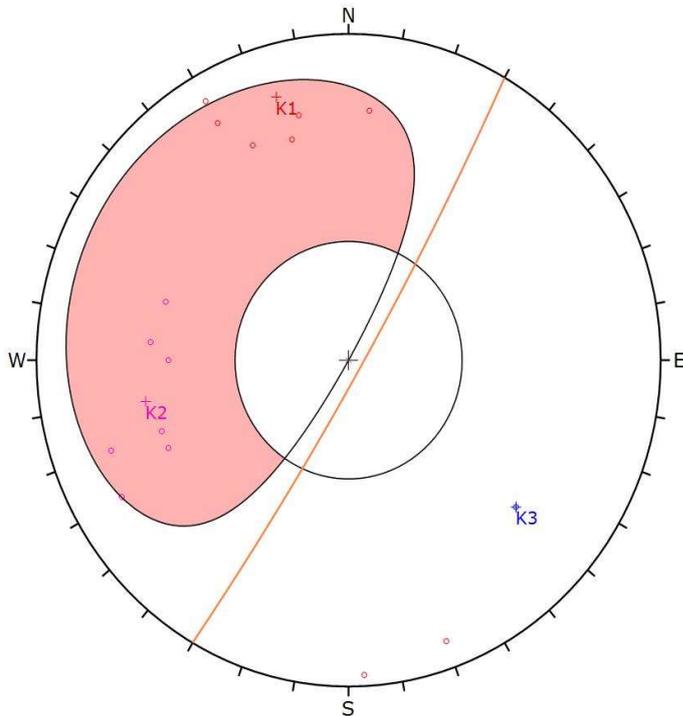
Classificazione corretta dell'ammasso roccioso

SMR	Classe	Descrizione
61	Seconda	Buona

Grado di stabilità, tipo di cinematismo di rottura, eventuali interventi di stabilizzazione

Stabilità	Modo di rottura	Stabilizzazione
Stabile	Possibili blocchi	Occasionale

**Scivolamento planare**



Symbol	Set	Quantity
○	1	8
○	2	7
○	3	1

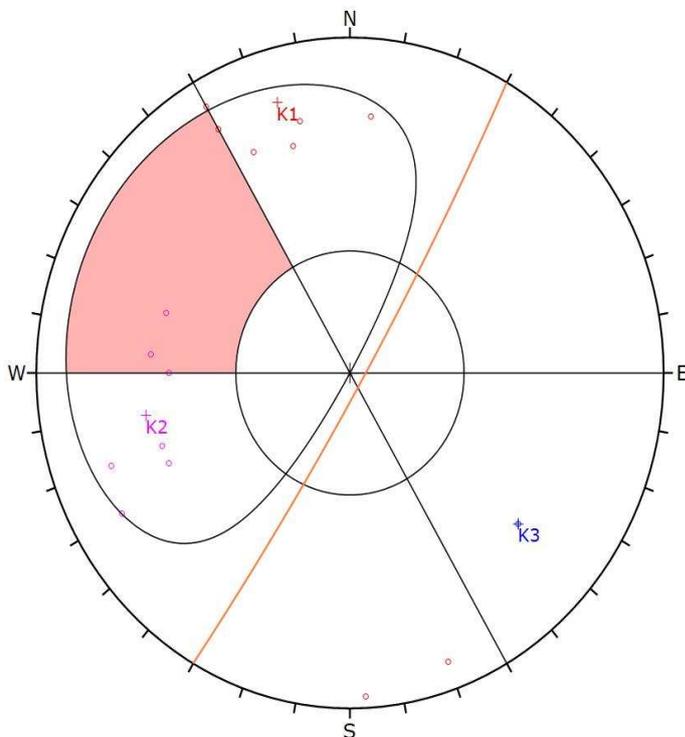
  

<b>Kinematic Analysis</b>	Planar Sliding
<b>Slope Dip</b>	85
<b>Slope Dip Direction</b>	120
<b>Friction Angle</b>	40°
	<b>Critical</b> <b>Total</b> <b>%</b>
Planar Sliding (All)	12   16   75.00%
Planar Sliding (Set 1: K1)	5   8   62.50%
Planar Sliding (Set 2: K2)	7   7   100.00%

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	16 (16 Entries)
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Angle

**Figura n.48 - Scivolamento planare senza limiti laterali**



Symbol	Set	Quantity
○	1	8
○	2	7
○	3	1

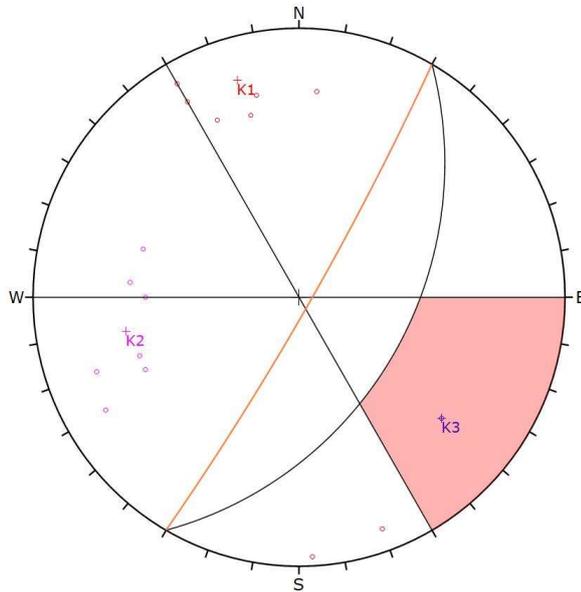
<b>Kinematic Analysis</b>	Planar Sliding
<b>Slope Dip</b>	85
<b>Slope Dip Direction</b>	120
<b>Friction Angle</b>	40°
<b>Lateral Limits</b>	30°
	<b>Critical</b> <b>Total</b> <b>%</b>
Planar Sliding (All)	4   16   25.00%
Planar Sliding (Set 1: K1)	1   8   12.50%
Planar Sliding (Set 2: K2)	3   7   42.86%

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	16 (16 Entries)
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Angle

**Figura n. 49 - Scivolamento planare con limiti laterali: 30°**

**Ribaltamento**



Symbol	Set	Quantity
○	1	8
○	2	7
○	3	1

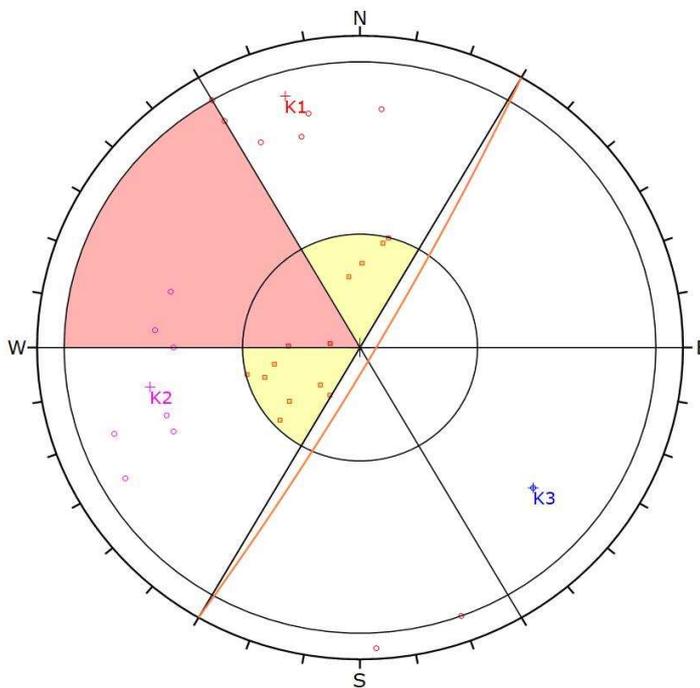
  

Kinematic Analysis		Flexural Toppling	
Slope Dip	85		
Slope Dip Direction	120		
Friction Angle	40°		
Lateral Limits	30°		
		Critical	Total
Flexural Toppling (All)	1	16	6.25%
Flexural Toppling (Set 3: K3)	1	1	100.00%

Plot Mode		Pole Vectors
Vector Count	16 (16 Entries)	
Hemisphere	Lower	
Projection	Equal Angle	

**Figura n. 50 - Ribaltamento flessurale**



Symbol	Set	Quantity
○	1	8
○	2	7
○	3	1

Symbol	Feature
■	Critical Intersection

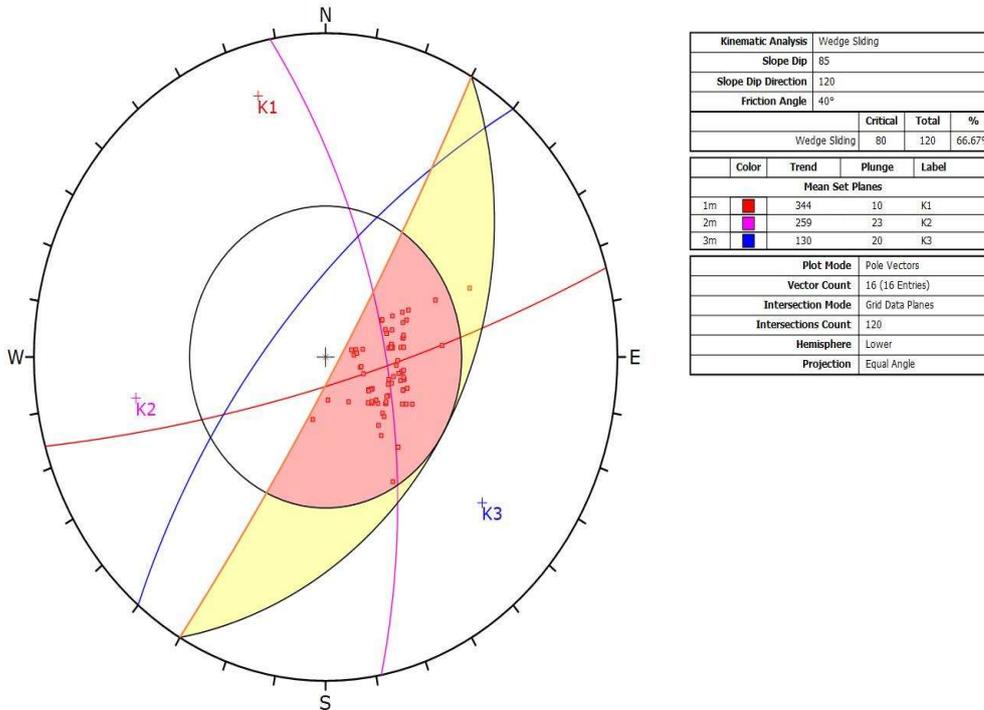
Kinematic Analysis		Direct Toppling	
Slope Dip	85		
Slope Dip Direction	120		
Friction Angle	40°		
Lateral Limits	30°		
		Critical	Total
Direct Toppling (Intersection)	2	120	1.67%
Oblique Toppling (Intersection)	11	120	9.17%
Base Plane (All)	5	16	31.25%
Base Plane (Set 1: K1)	2	8	25.00%
Base Plane (Set 2: K2)	3	7	42.86%

Plot Mode		Pole Vectors
Vector Count	16 (16 Entries)	
Intersection Mode	Grid Data Planes	
Intersections Count	120	
Hemisphere	Lower	
Projection	Equal Angle	

**Figura n. 51 - Ribaltamento diretto**

**Rottura a cuneo**



**Figura n.52- Rottura a cuneo**

<b>Tabella dei potenziali cinematismi attesi</b>	
Cinematismo	Criticità (%)
Scivolamento planare (limite 30°)	25,00 %
Scivolamento planare (senza limite)	75,00 %
Ribaltamento flessurale	6,25 %
Ribaltamento diretto e obliquo (piani che possono rappresentare piano di scivolamento)	9,17 % 31,25 %
Scivolamento a cuneo	66,67 %

La criticità in percentuale esprime, per ogni cinematismo, quante fratture di quelle presenti o degli incroci possibili fra esse determina una condizione di instabilità.

### Stazione S2

La stazione n. 2 è stata realizzata in corrispondenza di un affioramento roccioso ubicato immediatamente a monte del masso B1. L'ubicazione della stazione è indicata in fig. 30.



**Figura n. 53 - Traccia stazione S2**

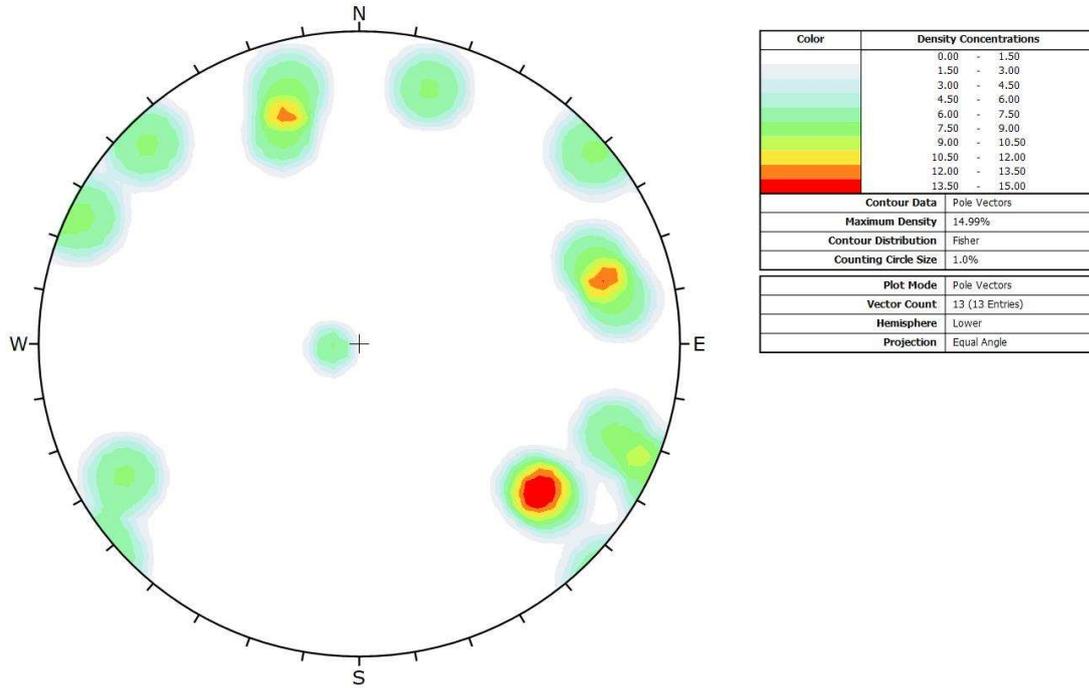


Figura n.54 - Fig. Diagramma di densità dei poli

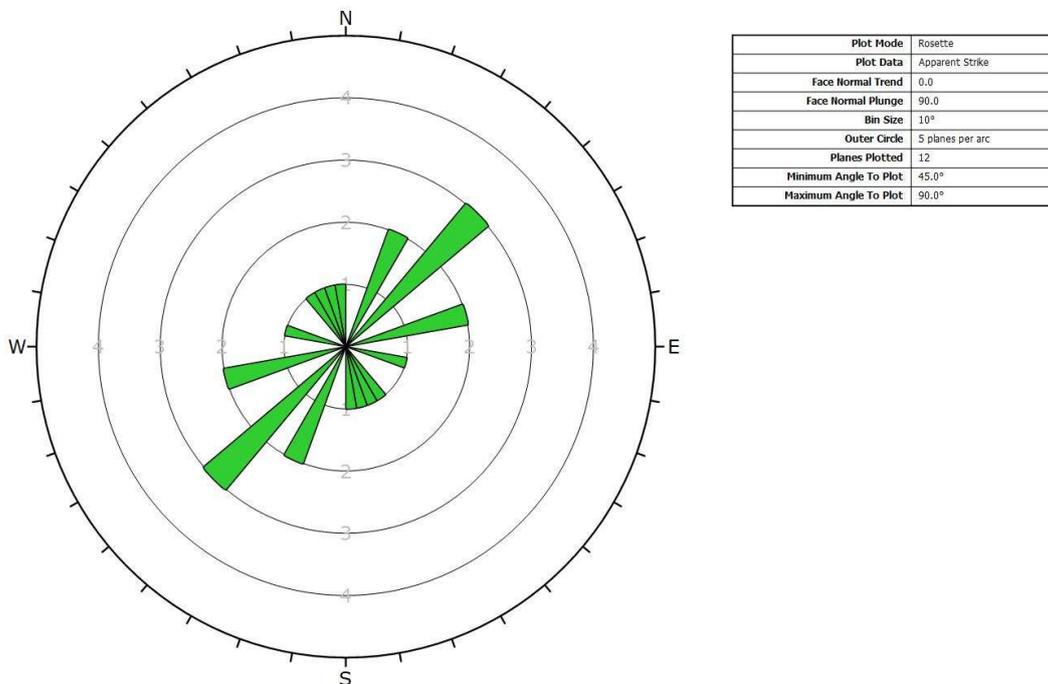
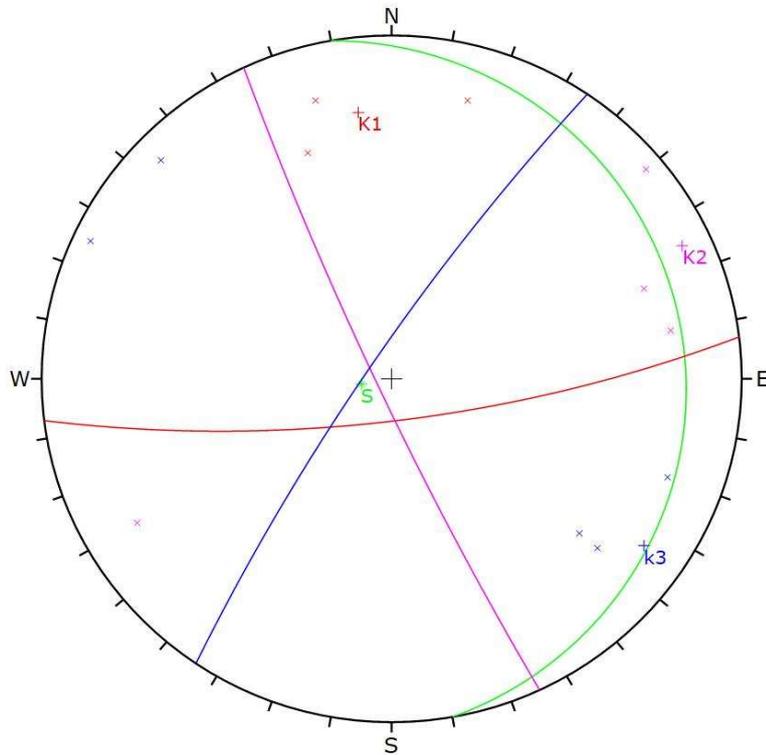


Figura n. 55 - Diagramma a rosetta



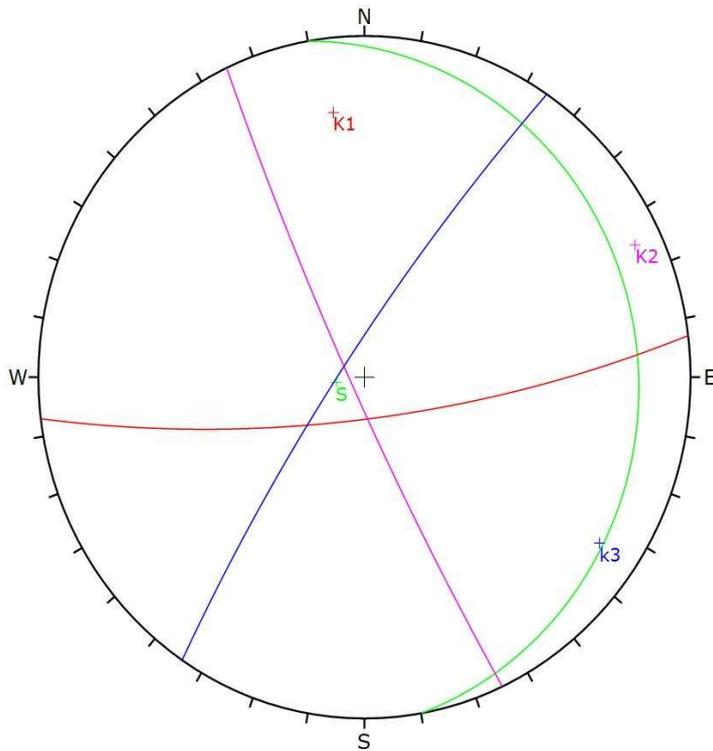
Symbol	Set	Quantity
x	1	1
x	2	3
x	3	4
x	4	5

	Color	Dip	Dip Direction	Label
Mean Set Planes				
1m	Green	10	80	S
2m	Red	76	173	K1
3m	Magenta	85	245	K2
4m	Blue	82	304	k3

<b>Plot Mode</b>	Pole Vectors
<b>Vector Count</b>	13 (13 Entries)
<b>Hemisphere</b>	Lower
<b>Projection</b>	Equal Angle

Figura n. 56 - Diagrammi di clustering

Tabella delle famiglie principali						
Fronte		Ubicazione	Famiglia	Giacitura		Coefficiente di Fisher (K)
Immersione	Inclinazione			imm.	inc.	
100	85	base parete blocchi	S	80	10	/
			K1	176	76	18
			K2	245	85	24
			K3	304	82	30



Color	Dip	Dip Direction	Label
Mean Set Planes			
1m	10	80	s
2m	76	173	k1
3m	85	245	k2
4m	82	304	k3
Plot Mode		Pole Vectors	
Vector Count		13 (13 Entries)	
Hemisphere		Lower	
Projection		Equal Angle	

**Figura n. 57 - Proiezione ciclografiche delle famiglie principali**

Risultati relativi a Rock Mass Rating (RMR)

Resistenza a compressione Su (MPa)	Rock Quality Designation (RQD)
61	97

V1	V2	V3	V4	V5
6	0	3	5	0

Classificazione dell'ammasso roccioso

RMRbase	RMRcorretto	Classe	Descrizione
67	-	Seconda	Buona

Caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso roccioso

Modulo di deformazione (GPa)	Geological Strength Index (GSI)	Coesione di picco (kPa)	Angolo di attrito di picco (°)	Scabrezza (JRC)	Volume Roccioso Unitario (m <sup>3</sup> )
34.0	62	335	39	3	1.24

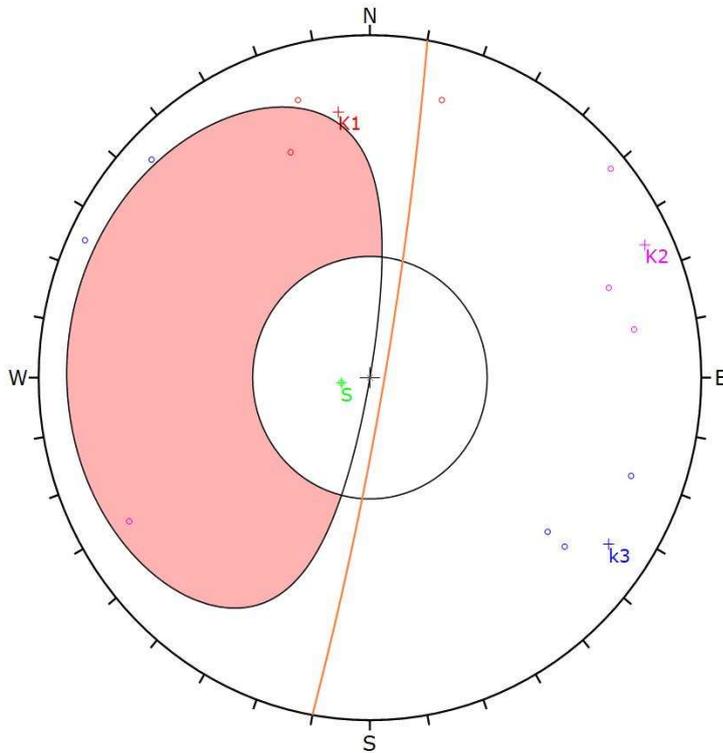
Classificazione corretta dell'ammasso roccioso

SMR	Classe	Descrizione
72	Seconda	Buona

Grado di stabilità, tipo di cinematismo di rottura, eventuali interventi di stabilizzazione

Stabilità	Modo di rottura	Stabilizzazione
Stabile	Possibili blocchi	Occasionale

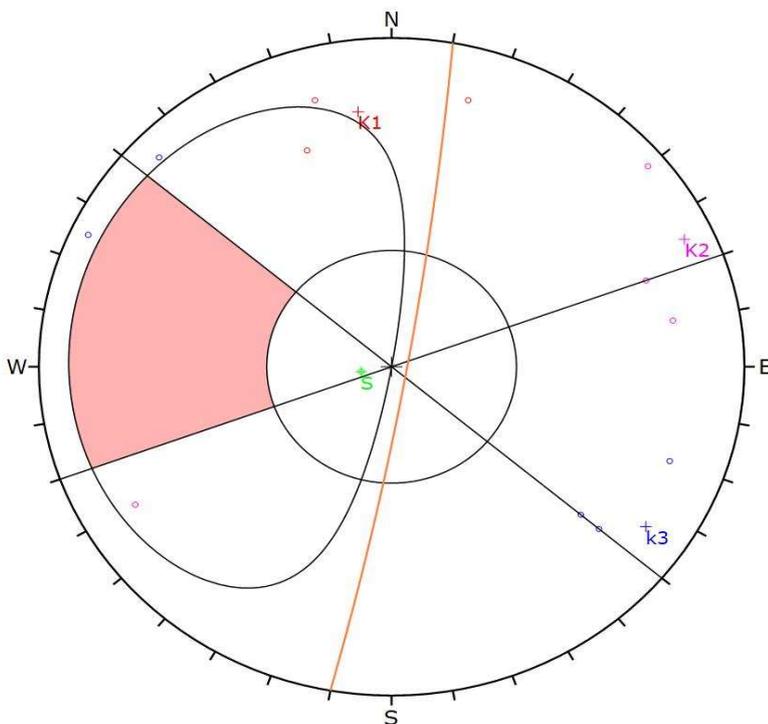
**Scivolamento planare**



Symbol	Set	Quantity
○	1	1
○	2	3
○	3	4
○	4	5

Kinematic Analysis		Planar Sliding		
Slope Dip	85			
Slope Dip Direction	100			
Friction Angle	39°			
		Critical	Total	%
Planar Sliding (All)		2	13	15.38%
Planar Sliding (Set 2: K1)		1	3	33.33%
Planar Sliding (Set 3: K2)		1	4	25.00%
Plot Mode	Pole Vectors			
Vector Count	13 (13 Entries)			
Hemisphere	Lower			
Projection	Equal Angle			

**Figura n.58 - Scivolamento planare senza limiti laterali**

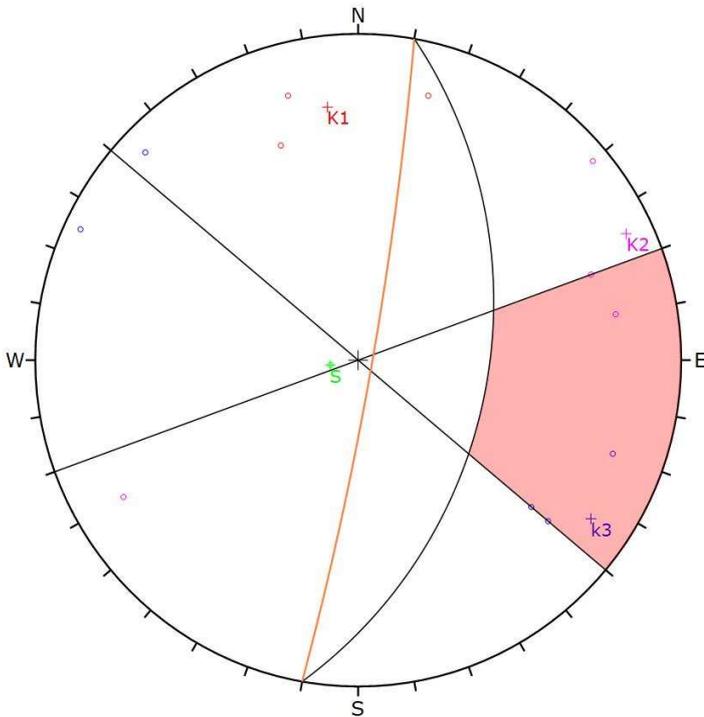


Symbol	Set	Quantity
○	1	1
○	2	3
○	3	4
○	4	5

Kinematic Analysis		Planar Sliding		
Slope Dip	85			
Slope Dip Direction	100			
Friction Angle	39°			
Lateral Limits	30°			
		Critical	Total	%
Planar Sliding (All)		0	13	0.00%
Plot Mode	Pole Vectors			
Vector Count	13 (13 Entries)			
Hemisphere	Lower			
Projection	Equal Angle			

**Figura n. 59 - Scivolamento planare con limiti laterali: 30 °**

**Ribaltamento**

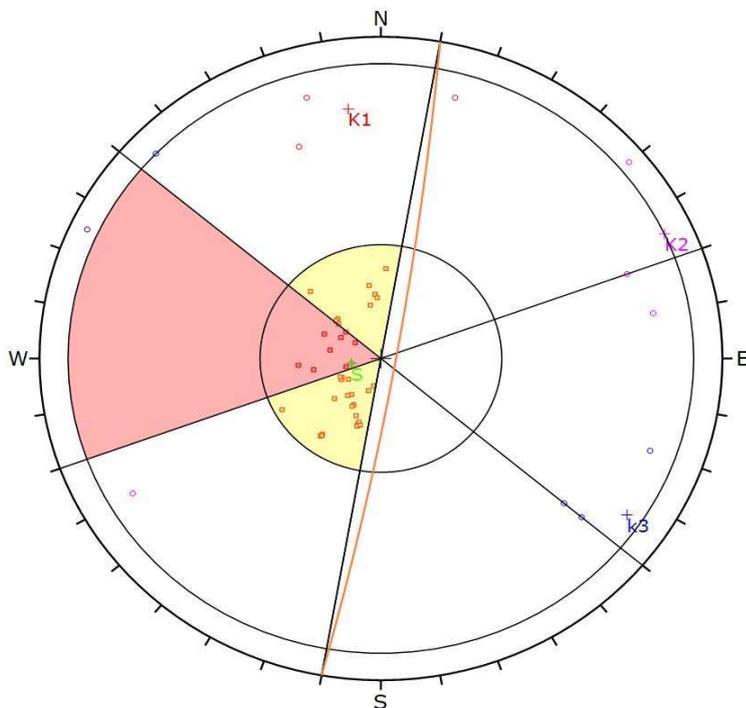


Symbol	Set	Quantity
○	1	1
○	2	3
○	3	4
○	4	5

Kinematic Analysis		Flexural Toppling		
Slope Dip	85			
Slope Dip Direction	100			
Friction Angle	39°			
Lateral Limits	30°			
		Critical	Total	%
Flexural Toppling (All)	5	13	38.46%	
Flexural Toppling (Set 3: K2)	2	4	50.00%	
Flexural Toppling (Set 4: K3)	3	5	60.00%	

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	13 (13 Entries)
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

**Figura n. 80- Ribaltamento flessurale**



Symbol	Set	Quantity
○	1	1
○	2	3
○	3	4
○	4	5

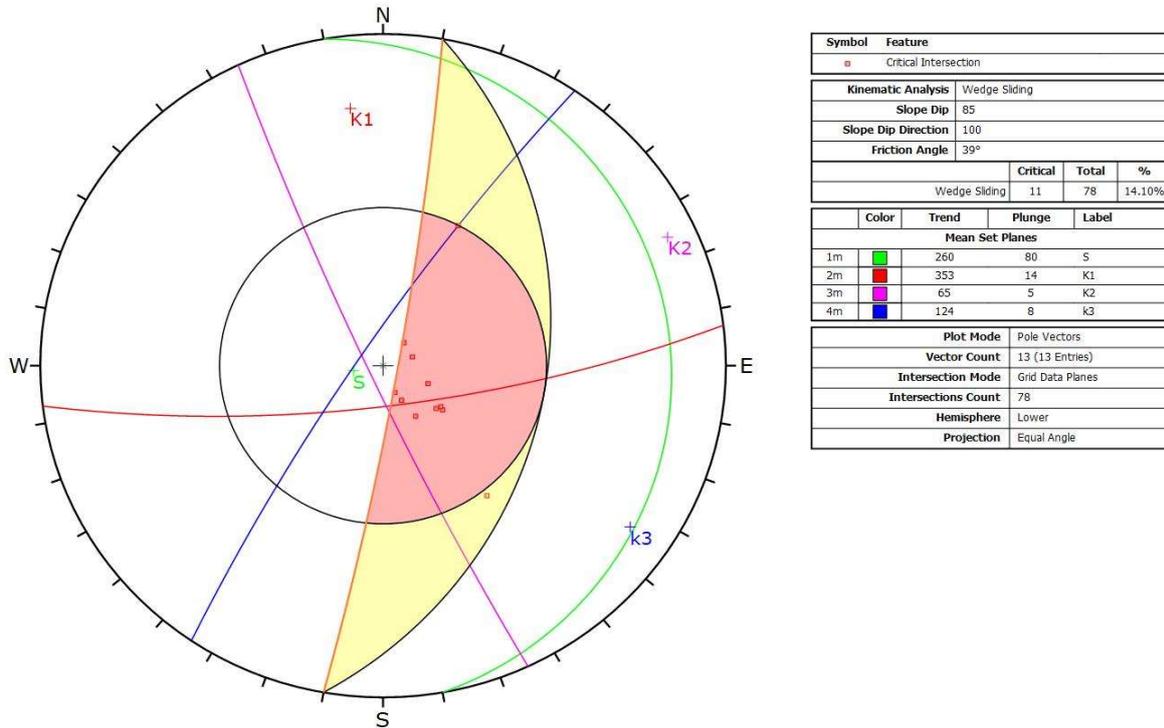
Symbol	Feature
■	Critical Intersection

Kinematic Analysis		Direct Toppling		
Slope Dip	85			
Slope Dip Direction	100			
Friction Angle	39°			
Lateral Limits	30°			
		Critical	Total	%
Direct Toppling (Intersection)	8	78	10.26%	
Oblique Toppling (Intersection)	30	78	38.46%	
Base Plane (All)	1	13	7.69%	
Base Plane (Set 1: S)	1	1	100.00%	

Plot Mode	Pole Vectors
Vector Count	13 (13 Entries)
Intersection Mode	Grid Data Planes
Intersections Count	78
Hemisphere	Lower
Projection	Equal Angle

**Figura n. 81- Ribaltamento diretto**

**Rottura a cuneo**



**Figura n. 82 - Rottura a cuneo**

Tabella dei potenziali cinematismi attesi	
Cinematismo	Criticità (%)
Scivolamento planare (limite 30°)	15,38 %
Scivolamento planare (senza limite)	0,00 %
Ribaltamento flessurale	38,46 %
Ribaltamento diretto e obliquo (piani che possono rappresentare piano di scivolamento)	38,46 % 7,69 %
Scivolamento a cuneo	14,10 %

## INDAGINI REGOLAMENTO REGIONALE N. 14 DEL 13 LUGLIO 2016

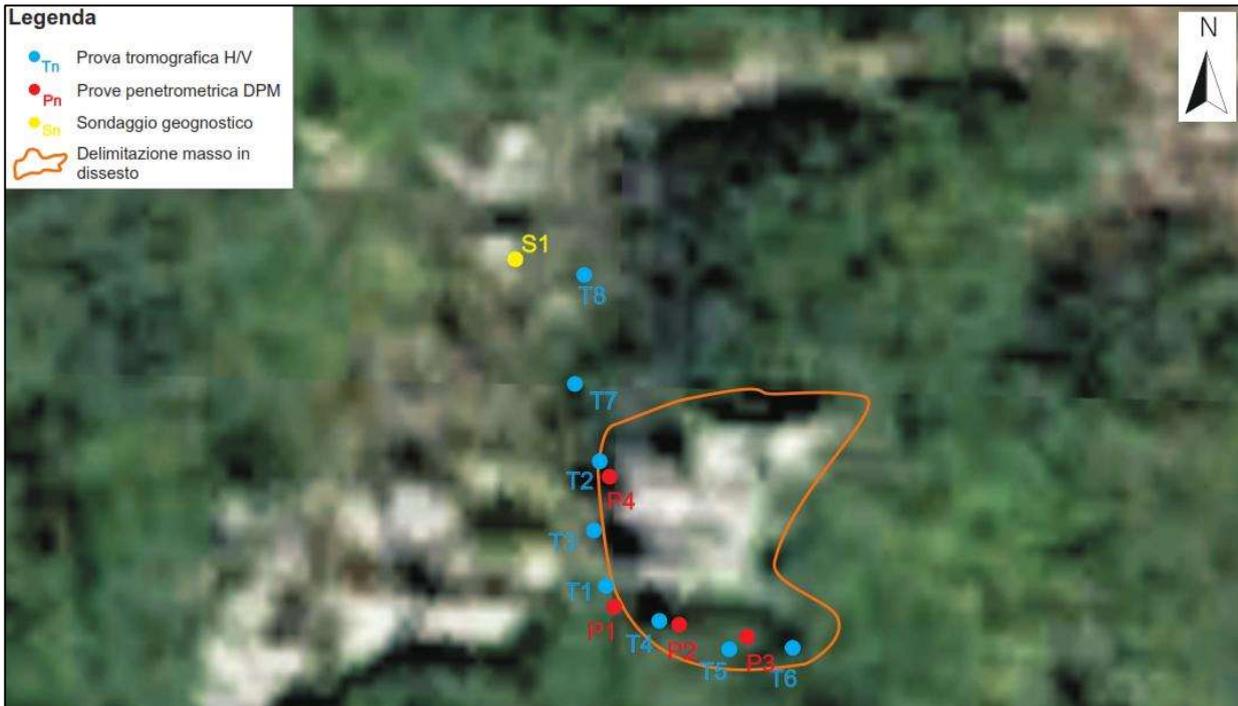
L'area in studio è stata investigata attraverso una campagna di indagini che ha interessato l'intorno del masso; la tipologia di indagini e l'ubicazione delle stesse è stata fortemente condizionata dalla folta vegetazione e dalle condizioni impervie e accidentate dei luoghi.

In particolare sono state eseguite le indagini sotto elencate la cui ubicazione è riportata nelle figg. 83 e 84. I risultati delle indagini condotte sono illustrati nella Relazione tecnica elaborato n. 2278/20 datato ottobre 2020 della Società Geovit Sondaggi Srl e sintetizzati di seguito.

- N. 1 sondaggio geognostico spinto alla profondità di 2.50 m
- N. 1 prelievo di campione di roccia
- N. 1 prova geotecnica di laboratorio
- N. 4 prove penetrometriche dinamiche tipo DPM
- N. 2 prove sismiche Masw
- N. 10 misure sismiche di microtremori HVSR



Figura n.83 - Ubicazione indagini



**Figura n.84 - Particolare ubicazione indagini**

Il sondaggio geognostico, denominato S1, eseguito a monte del masso ha restituito una roccia calcarea di colore bianco fratturata. Sulla carota estratta è stata realizzata una prova di compressione che ha restituito un valore di resistenza di 31.4 N/mm<sup>2</sup>.

In corrispondenza della parte sud occidentale del masso, lungo il perimetro, sono state eseguite n. 4 prove penetrometriche dinamiche di tipo DPM, da P1 a P4. Tutte le prove sono state interrotte a causa del rifiuto strumentale dovuto alla presenza di un substrato litoide. L'esecuzione di tali prove ha consentito di verificare, nell'immediato intorno del masso in studio, la presenza di una scarsa copertura vegetale di spessore di poche decine di centimetri, con locali aumenti, come evidenziato dalla prova P4 che ha restituito uno spessore di copertura vegetale di 0.70 m.

Prova	Profondità rifiuto strumentale in m dal p.c
P1	0.20
P2	0.10
P3	0.30
P4	0.70

La misura microtremori ha permesso di definire nell'intorno del masso lo spessore della porzione di roccia fratturata. Difatti, come riportato nella relazione tecnica delle indagini, lo spessore della porzione fratturata risulta esser abbastanza variabile arealmente, compreso tra i 2 m registrati nel punto di ubicazione della misura T4 ai circa 6/7 m nei punti T2, T5, T7, T8. La prova T1, ubicata tra le prove T3 e T4 restituisce uno spessore della coltre alterata e fratturata di circa 14 m. I risultati forniti dalle indagini sismiche effettuate sia MASW che HVSr permettono di definire la categoria di sottosuolo del sito, che risulta posto nella categoria B, con valori di  $V_{s\_eq}$  calcolati pari a Fig. 85:

<b>Prospezione sismica</b>	<b><math>V_{s\ 0-30}</math> (m/s)</b>
<i>MASW n. 1</i>	<i>[494]</i>
<i>MASW n. 2</i>	<i>[514]</i>
<i>HVSr n. 1</i>	<i>[420]</i>
<i>HVSr n. 2</i>	<i>[519]</i>
<i>HVSr n. 3</i>	<i>[573]</i>
<i>HVSr n. 4</i>	<i>[643]</i>
<i>HVSr n. 5</i>	<i>[575]</i>
<i>HVSr n. 6</i>	<i>[591]</i>
<i>HVSr n. 7</i>	<i>[515]</i>
<i>HVSr n. 8</i>	<i>[532]</i>
<i>HVSr n. 9</i>	<i>[487]</i>
<i>HVSr n. 10</i>	<i>[562]</i>

**Fig. 85 - Valori di  $V_{s\_eq}$  calcolati, relativi alle prospezioni sismiche effettuate**

## MODELLO GEOLOGICO

I risultati delle indagini eseguite hanno confermato la complessità della situazione apprezzabile già a prima vista. Come già evidenziato nei paragrafi precedenti il mancato decespugliamento dell'area dalla folta vegetazione boschiva e arbustacea, le impervie condizioni morfologiche non hanno consentito un rilievo topografico di dettaglio né l'utilizzazione del drone nel pieno della capacità strumentali, per la realizzazione di un modello tridimensionale del masso, né di effettuare a piedi un completo e dettagliato rilevamento geomorfologico e strutturale.

L'area investigata è ubicata lungo la Valle del Fiume Velino, in prossimità della sua sponda destra, a nord del centro abitato di Antrodoco in località Colle delle Rocce; in particolare è posizionata sul versante orientale di Colle Frate, in prossimità del toppo collinare ad una quota di circa 685 m slm, è esposta ad est e immerge verso il fondovalle.

Nell'area affiorano calcari dolomitici biancastri talora brecciati; intensamente fratturati e interessati da fenomeni carsici, a luoghi è presente una sottile copertura vegetale con uno spessore di poche decine di centimetri.

Morfologicamente il masso in studio può essere considerato un elemento di forma pseudocolonnare che emerge rispetto al substrato verosimilmente a causa degli effetti tettonici ed erosivi impostatisi su una roccia facilmente disgregabile.

È costituito da un calcare dolomitico biancastro brecciato, interessato da un complesso sistema di fratture che lo ha disseccato in più porzioni. Sostanzialmente è costituito da un blocco più grande che ne costituisce quasi l'intera volumetria e due blocchi più piccoli appoggiati ad esso. Considerato lo stato di dissecazione ed erosione è possibile la presenza di ulteriori porzioni instabili dietro quelle affioranti.

Il masso nel suo complesso reca i segni evidenti di un'intensa erosione provocata sia dagli agenti esogeni, essenzialmente acque dilavanti e un pervasivo carsismo. Lo stesso all'interno presenta delle cavità, ma non si conoscono le dimensioni delle stesse né lo stato interno del blocco.

Il piede del masso risulta talora assente o fortemente scompaginato, la radice, laddove visibile, risulta fortemente scagliettata, scompaginata e disposta a franapoggio.

Il substrato del masso, nell'immediato intorno, è costituito da una roccia calcareo dolomitica, talora brecciata, alterata e fratturata per uno spessore variabile da 2 m a 7 m fino a circa 14 m dal p.c. Lo stato di alterazione e fratturazione del substrato è estremamente variabile sia arealmente che in profondità.

Inoltre, in considerazione dell'aspetto del masso, pervaso da fenomeni carsici non si può escludere la presenza nel substrato di cavità dovute a tali fenomeni.

I risultati del rilevamento geostrutturale del masso evidenziano, per i singoli blocchi che lo costituiscono, una elevata instabilità relativamente al cinematismo di scivolamento rispetto ad un cuneo isolato dai sistemi di frattura individuati.

Per quanto riguarda la situazione al contorno, le due stazioni geomeccaniche realizzate subito a monte e valle del masso restituiscono una situazione puntuale migliore, con una classificazione dell'ammasso roccioso "buona" che comunque non esclude la necessità di interventi localizzati dovuti a situazioni di instabilità occasionali.

Si segnala, inoltre, la presenza lungo il pendio, di ulteriori criticità legate a porzioni di roccia ad assetto verticale e subverticale, pseudocolonnare, affette da fratture, lesioni ed intensa erosione.

## **CONCLUSIONI**

Alla luce di quanto sopra esposto, sulla base delle caratteristiche geologiche e geomorfologiche dell'area in esame e delle considerazioni evidenziate nella presente relazione in merito alla situazione di rischio connessa ai fenomeni di caduta massi, la realizzazione di un'opera di contenimento di tutto il masso rappresentata una delle soluzioni migliori, nel tentativo di ridurre in modo accettabile la situazione pericolosità e di rischio esistente. Tale soluzione consentirebbe però il permanere di condizioni di rischio residuo nei confronti delle infrastrutture poste a valle del pendio, in particolare per quanto riguarda l'interessamento della Strada Statale 4 "Salaria, la linea ferroviaria Terni-Sulmona, la Via dei Cinque Confini e gli abitati.

In alternativa è ipotizzabile la rimozione completa dell'intero masso e quindi l'eliminazione totale del rischio legato alla sua presenza.

In entrambi i casi, considerate le dimensioni del masso, la posizione, lo stato critico in cui versa dal punto di vista strutturale qualitativo ed erosivo, vanno sicuramente previste delle opere di protezione intermedie e a valle, opportunamente calibrate, anche durante le attività lavorative. Inoltre, in considerazione del forte grado di fratturazione del substrato e della possibile presenza di fenomeni carsici/cavità nel sottosuolo, le chiodature/infilaggi ecc. andranno sovradimensionati in numero e testati, in numero sufficientemente cautelativo, con idonee prove di collaudo.

## BIBLIOGRAFIA CONSULTATA

La bibliografia utilizzata per la redazione del presente lavoro è la seguente:

**Bieniawski Z.T. 1989.** Engineering rock mass classification: John Wiley & Sons, 251 pp.

**Capotorti F.** Et alii Evoluzione tettonico-sedimentaria e strutturazione del settore di piattaforma carbonatica laziale-abruzzese nell'alta valle del F. Velino

**Chiessi V. 2018** Carta della suscettibilità pe instabilità di versante della'rea del foglio Antrodoco della Carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000

**Cipollari P. et alii 1993** Analisi biostratigrafica dei depositi terrigeni a ridosso della linea Olevano-Antrodoco

**Coli M. 1981** Studio strutturale della linea Ancona -Anzio tra Posta e Antrodoco (Gole del Velino)

**Conte G. et alii 2018** Caratteristiche idrogeologiche del Foglio 348 Antrodoco della Carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000

**Goodman, R.E. 1980.** Introduction to Rock Mechanics (Chapter 8), Toronto: John Wiley, pp 254-287.

**Hudson, J.A. and Harrison, J.P. 1997.** Engineering Rock Mechanics - An Introduction to the Principles, Pergamon Press.

**Markland, J.T. 1972.** A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge slide type of failure is expected: Imperial College Rock Mechanics Research Reprints, n. 19.

**Petitta M. 2009** Idrogeologia della media Valle del Fiume Velino e della Piana di S. Vittorino (Rieti Italia centrale)

**Principi P. 1933** I terreni miocenici nella regione di Antrodoco

**Romana M, 1985.** New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. Int. Symp. on the role of rock mechanics ISRM. Zacatecas, pp 49-53