

S.S. 45bis - Gardesana Occidentale

Opere di costruzione della galleria in variante tra il km 86+567 e il km 88+800 finalizzata a sottendere le attuali gallerie ogivali a sezione ristretta

PROGETTO DEFINITIVO

COD. MI92

PROGETTAZIONE: ANAS - DIREZIONE PROGETTAZIONE E REALIZZAZIONE LAVORI

PROGETTISTA:

*Dott. Ing. Antonio Scalamandrè
Ordine Ing. di Frosinone n. 1063*

IL GEOLOGO

*Dott. Geol. Serena Majetta
Ordine Geol. di Roma n. 928*

IL RESPONSABILE DEL S.I.A.

*Dott. Ing. Laura Troiani
Ordine Ing. di Roma n. 31890*

COORDINATORE DELLA SICUREZZA IN FASE DI PROGETTAZIONE

Geom. Fabio Quondam

VISTO IL RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO

Dott. Ing. Giancarlo Luongo

PROTOCOLLO

DATA

GEOLOGIA

Relazione geostrutturale-geomeccanica

| CODICE PROGETTO | | NOME FILE | | REVISIONE | SCALA |
|-----------------|-------------|---------------------|-----------------------------|------------------|------------------|
| PROGETTO | LIV. PROG. | TOOGE00GEORE02A.doc | | | |
| D P M I 0 0 9 2 | D 1 8 | CODICE ELAB. | T 0 0 G E 0 0 G E O R E 0 2 | A | -- |
| D | | | | | |
| C | | | | | |
| B | | | | | |
| A | EMISSIONE | Gennaio 2020 | Geol. R. Laureti | Geol. M. Martino | Geol. S. Majetta |
| REV. | DESCRIZIONE | DATA | REDATTO | VERIFICATO | APPROVATO |

INDICE

| | | |
|----------|--|-----------|
| 1 | <i>Premesse</i> | 2 |
| 2 | <i>Inquadramento geologico</i> | 2 |
| 3 | <i>Assetto geologico-strutturale locale</i> | 12 |
| 4 | <i>Caratterizzazione geomeccanica</i> | 15 |
| | <u>4.1</u> <i>Analisi strutturale</i> | 15 |
| | <u>4.2</u> <i>Analisi cinematiche</i> | 23 |
| | <u>4.3</u> <i>Sintesi geomeccanica</i> | 35 |
| | <u>4.4</u> <i>Caratterizzazione dei set di discontinuità favorevoli allo sviluppo di instabilità</i> | 49 |
| | <u>4.5</u> <i>Rilievo geomeccanico su tre punti in affioramento</i> | 53 |
| 5 | <i>Bibliografia</i> | 58 |

1 Premesse

La presente relazione geostrutturale-geomeccanica fa parte della documentazione allegata al Progetto Definitivo dei lavori di costruzione della variante in galleria dal km 86+567 al km 88+800 della S.S. 45bis "Gardesana occidentale".

Nel presente elaborato si riporta un riepilogo degli studi geostrutturali e geomeccanici realizzati sulle pareti rocciose prospicienti alla S.S. 45 bis, realizzati per conto di ANAS dalla Soc. Imageo s.r.l. e dalla Soc. Akron s.r.l..

2 Inquadramento geologico

Il Lago di Garda, stretto e allungato nel tratto che si sviluppa a N dell'anfiteatro morenico, segue un allineamento strutturale parallelo alla Linea delle Giudicarie (Castellarin & Ferrari, 1972) che è accompagnato da un vistoso cambiamento di facies sui due versanti: facies lombarda sul versante occidentale del lago (con la tipica successione Corna-Medolo-Selcifero lombardo-Maiolica-Scaglia); facies veneta sul versante orientale (con la tipica successione Calcari grigi-Oolite di San Vigilio-Rosso ammonitico veronese-Maiolica-Scaglia) per l'intervallo temporale compreso fra il Giurassico inferiore e il Cretaceo superiore. Tutte queste formazioni sono costituite prevalentemente da calcari di mare sottile o pelagici e in parte molto subordinata da depositi silicei. La sponda orientale del lago, a nord del Capo San Vigilio, ha un andamento sensibilmente rettilineo, al piede di una grandiosa monoclinale che costituisce il versante occidentale della catena del Monte Baldo (Figura 1). Terreni terziari affiorano in modo discontinuo verso il lago sia sulla sponda veronese che su quella bresciana a sud delle montagne formate dai calcari mesozoici, che danno luogo a un grandioso paesaggio, con dislivelli di quasi 2000 metri.

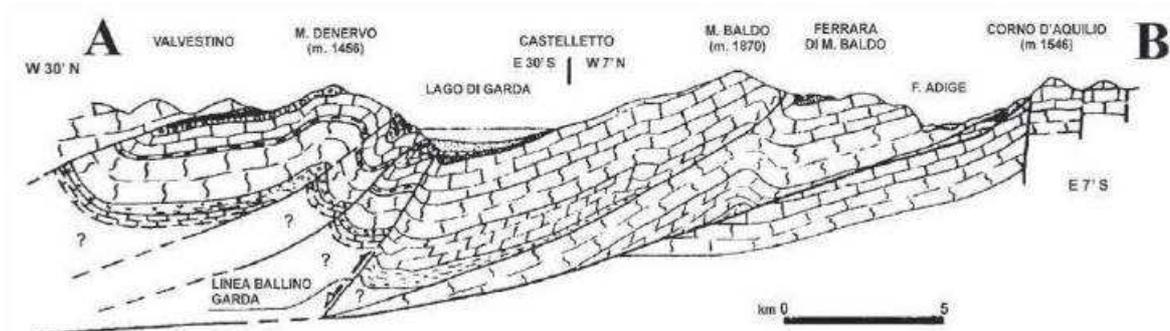


Figura 1 – Struttura geologica della regione del Lago di Garda rappresentata in sezione trasversale per la parte centrale del lago: è ben apprezzabile la diversità strutturale delle due sponde del lago (in Cita et al., 2006)

A livello regionale la zona interessata dallo studio si inquadra nell'ambito delle Prealpi bresciane il cui assetto strutturale è caratterizzato da una serie di superfici tettoniche sud e sud-est vergenti che generano sovrascorrimenti di notevole entità delle successioni più antiche, e quindi originariamente più profonde, su quelle più recenti.

La caratteristica che risalta maggiormente nell'assetto geometrico delle formazioni rocciose è costituito dal progressivo ringiovanimento delle successioni procedendo da nord a sud (dalla Formazione della Corna a nord culminazione del Monte Comero alla formazione della Scaglia Lombarda a sud).

A scala regionale, procedendo da nord-ovest verso sud-est, è infatti possibile individuare tre domini geologico-strutturali differenti:

- area di affioramento del Basamento cristallino (il sistema è rappresentato dal "Massiccio delle tre valli bresciane" ed è costituito dalle intrusioni magmatiche dell'Adamello e la sua copertura vulcanica);

- monoclinale dolomitica sovrascorsa costituita da un esteso "piastrone" di dolomie noriche e retiche a grande scala a comportamento rigido;

- fronte di accavallamento Tremosine Tignale e fascio di pieghe frontali ad esso associato (dominio entro il quale sono ricomprese tutte le aree di studio).

Dal punto di vista geodinamico le strutture tettoniche presenti, in generale, si sono originate, secondo le interpretazioni più recenti, da fenomeni essenzialmente compressivi causati principalmente dal movimento (intrusione) verso sud del blocco crostale più rigido costituito dal corpo dell'Adamello, che nella traslazione sarebbe stato delimitato a meridione dalla linea della Val Trompia (essenzialmente compressiva) e verso est dalla linea delle Giudicarie (trascorrente più a nord) e con caratteri transpressivi nella zona del Garda.

Le principali lineazioni tettoniche rilevabili nell'area possono essere raggruppate secondo due principali direzioni strutturali:

- il sistema a direzione orobica-valsuganese (con direzioni variabili da E-W a ENE-WSW);

- il sistema a direzione giudicariense (con direzioni variabili da NNE-SSW a NE-SW).

Andando più nel dettaglio, il più importante lineamento ad andamento giudicariense, rilevabile sulla sponda occidentale del Lago di Garda, è rappresentato dal sovrascorrimento Tremosine-Tignale vergente verso sud-est che provoca a grande scala la sovrapposizione della Dolomia principale sulla successione dei "terreni" mesozoici.

A scala locale, il sovrascorrimento associato al lineamento di Tremosine-Tignale è presente in corrispondenza del rilievo del Monte Comero ove si rendono manifeste le

strutture frontali associate a tale struttura: anticlinale del Monte Comero in cui la Formazione della Corna appare piegata rigidamente secondo un'ampia struttura plicativa sud – vergente e al letto (fascia montuosa-collinare prospiciente la sponda lacustre) le formazioni via via più recenti in successione rovesciata (Medolo, F.ne di Concesio, Maiolica, Scaglia Lombarda) che hanno reagito all'applicazione dello stress deformandosi in pieghe e andando a costituire, dal punto di vista tettonico, il fascio di piegamenti frontali e basali associati alla struttura di compressione principale, di cui la principale è la sinclinale di Muslone.

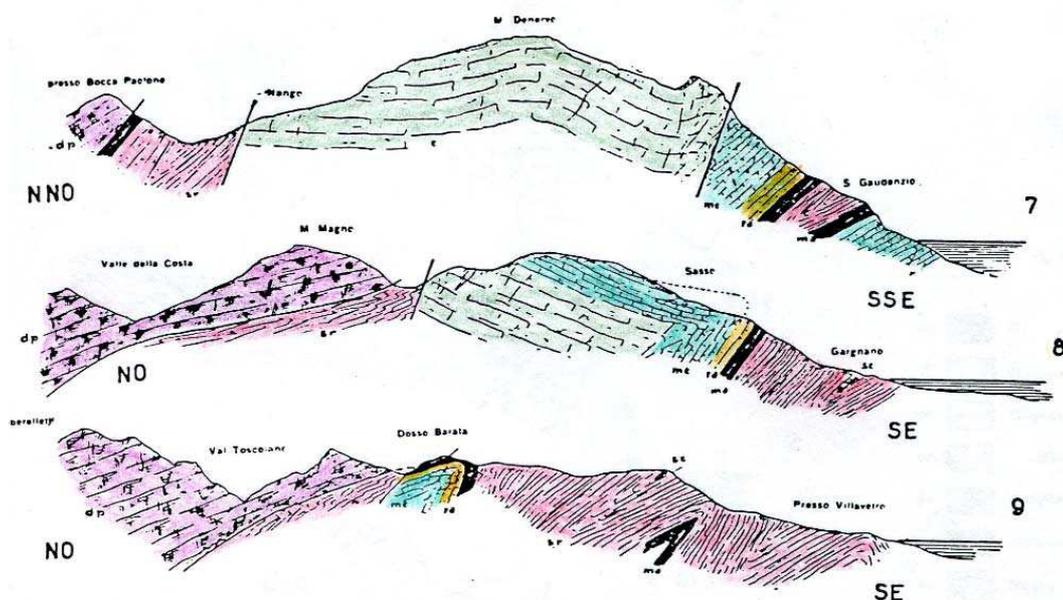


Figura 2 – Sezioni stratigrafiche ad orientamento NW-SE da M.te Denervo, M.te Magno e Dossò Barata a lago

Le strutture plicative di maggior significato, di dimensioni da ettometriche a chilometriche, evidenziano prevalenti assi a direzione N40°-220° disposte parallelamente al fronte di accavallamento e alla sponda benacense.

Quest'ultima, caratterizzata al nucleo dalla presenza della Scaglia Lombarda mentre i fianchi sono costituiti dalle formazioni giurassiche stratificate (dalla Maiolica al Medolo), assume una posizione da inclinata a rovesciata passando da S. Gaudenzio alla zona del Gaz; contemporaneamente, a monte, il contatto della formazione della Corna con il Medolo in posizione rovesciata, si realizza mediante un passaggio stratigrafico nella parte centrale ed evolve in sovrascorrimento sud-est vergente con l'accavallamento delle masse e rovesciamento completo della sinclinale a livello della Loc. Pis.

A grande scala il sovrascorrimento principale risulta più arretrato nell'entroterra del territorio comunale mettendo direttamente a contatto il piastrone rigido della Dolomia Principale con la formazione eocenica della Scaglia Lombarda nella fascia ove si colloca l'abitato di Costa. La formazione dolomitica presentando un comportamento fragile risulta per lo più interessata da un fitto reticolo di faglie subverticali e con configurazioni giaciture regolari (stratificazione con bassi gradi di inclinazione ed ondulazioni a grande scala).

L'assetto stratigrafico del territorio comprende le litologie marine e terrigene ascrivibili ad un intervallo temporale compreso nel Mesozoico – Cenozoico (Eocene). La successione, dalla più antica alla più recente, può essere così schematizzata:

- DOLOMIA PRINCIPALE E FACIES ETEROPICA DELLA DOLOMIA PRINCIPALE

Affiora estesamente nella porzione occidentale del territorio comunale a ovest del sovrascorrimento (ossatura dei rilievi Monte Pracalvis - Zingla – Vesta- Monte Magno) ed è principalmente rappresentata dalla formazione delle Dolomia Principale e in minor misura dalla "facies eteropica" affiorante esclusivamente nella porzione nord occidentale del comprensorio comunale. Da un punto di vista litologico, si tratta rispettivamente di dolomie

grigie, giallastre, biancastre e rosate e calcari dolomitici da grigio chiari a grigio scuri o nocciola brunastri, a stratificazione per lo più indistinta o in grossi banchi (da 0.50 m a 3.0 m), oppure stratificata con potenze da 0.1-1.0 m passanti, nella facies eteropica a dolomie bituminose (fetide alla percussione) nerastre o grigio scure, laminate; alla base della formazione è presente un livello brecciato ad elementi calcareo dolomitici con cemento poco coerente di colore giallastro.

- CORNA

Nella sua facies tipica la formazione della Corna è costituita da calcari compatti e di colore chiaro, bianco avorio e grigio biancastro, nocciola o giallo grigiastro in patina esterna; si presenta con tessitura da cristallina a detritica con stiloliti e in strati per lo più potenti o indistinti, con fitte trame di vene di calcite ricristallizzata.

Affiora con imponenti sezioni lungo la fascia medio orientale del territorio costituendo l'ossatura dell'allineamento anticlinalico Monte Denervo - Filone del Monte Comero, coprendo dislivelli di 500-600 m (potenza della formazione nel territorio del Garda). Il limite inferiore non è chiaramente osservabile date le complesse vicende tettoniche cui la successione è coinvolta mentre superiormente il passaggio si realizza con la Formazione del Medolo e del Corso.

- CORSO

Si tratta di calcari di colore variabile dal grigiastro al rossiccio organizzati in strati decimetrici, riconosciuta in limitati affioramenti in località Pis e nella Valle de Rio S. Martino.

- MEDOLO

Si tratta di calcari per lo più marnosi di colore chiaro o scuro, ad evidente stratificazione, con letti e noduli di selce e con intercalazioni di più o meno abbondanti di marne fino ad argilliti grigio verdastre.

Localmente è possibile la distinzione nei due membri che la costituiscono : il calcare di Gardone Val Trompia e il Calcare di Domaro; Il limite inferiore è rappresentato dalla Corna o dal Corso o da altre formazioni, il limite superiore è invece rappresentato dalla Formazione di Concesio; la potenza massima stimata è di circa 800 m. Affioramenti significativi sono localizzati in corrispondenza del Filone del Monte Comero dove la formazione, in posizione rovesciata ed in contatto tettonico, soggiace alla Corna.

- FORMAZIONE DI CONCESIO

E' costituita da calcari, anche marnosi e talora più o meno detritici, da grigiastri a nocciola, frequentemente selciosi, a stratificazione evidente, con intercalazioni di marne grigio verdastre talora abbondanti; localmente sono distinguibili due membri: i calcari nocciola e i calcari medoloidi. La formazione appare molto simile alla F.ne del Medolo da cui spesso non è facilmente distinguibile. La potenza è variabile fra i 100 e i 300 m, il limite inferiore è rappresentato in generale dal Medolo e mentre superiormente passa al Selcifero lombardo.

- FORMAZIONE DI NAVONE

La formazione è costituita da calcari marnoso silicei, da grigio chiari a grigio scuri, con selci in prevalenza grigiastre in noduli liste o letti, localmente molto abbondanti, ad

evidente stratificazione; sono presenti veli o intercalazioni di litotipi marnoso-argillosi grigio verdolini. La potenza non raggiunge mai valori molto elevati con caratteri di transizione tra i calcari medoloidi della F.ne di Concesio, coincidente con il limite inferiore, ed il Selcifero lombardo (limite superiore).

- SELCIFERO LOMBARDO

Si tratta di una formazione costituita da radiolariti identificate con selci policrome, con colore che va dal bruno, giallastro, grigio e rosso ruggine, con intercalate marne calcaree e silicee, grigio scuro e grigio verdastro, e selci nere, passanti a marne calcareo-silicee con colorazione grigio verdi, giallastre, e selci verde oliva e arancioni con bordi neri. La formazione si estende a monte degli abitati di Sasso Formaga–Liano e all'interno della sinclinale di Muslone, all'interno in corrispondenza del Monte Beole e alle pendici del Monte Caminala.

- MAIOLICA

Si tratta di calcari bianchi e biancastri, grigi esternamente e bianco lattei all'interno, compatti, microcristallini a frattura concoide, ben stratificati, con selci grigio scure e azzurrine in orizzonti o noduli; sono interessate diffusamente da suture stilolitiche e minute fessure riempite di calcite secondaria; il contenuto paleontologico si riferisce a microfossili come Calpionelle e radiolari. Presenza locale di intercalazioni argillose a volte bituminose, nerastre, frequentemente fogliettate di differente spessore. La formazione si estende a monte degli abitati di Sasso Formaga –Liano e all'interno della sinclinale di Muslone, all'interno in corrispondenza del Monte Beole e alle pendici del Monte Caminala.

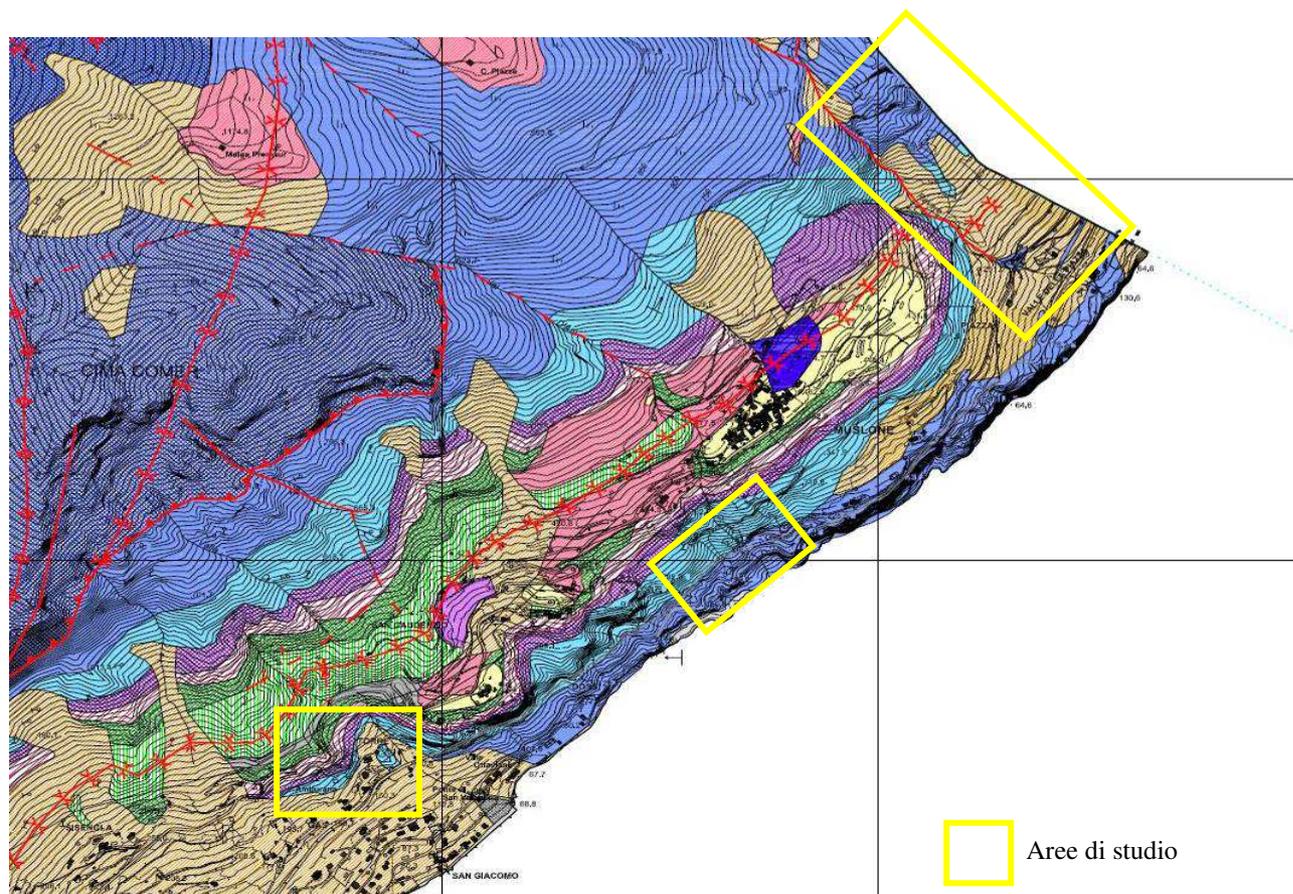
- SCAGLIA LOMBARDA

Suddivisa in tre unità Scaglia Variegata (SV), Scaglia Rossa (SR) e Scaglia Cinerea (SC), caratterizzate da marne fogliettate, di colore in prevalenza grigiastro e nerastro, alternatisi inizialmente con altre rosso vinate e grigio verdastre (SV) passante a marne e marne argillose rosa salmone intenso e rosso mattone, con intercalazioni di calcari marnosi compatti e di calcari arenacei (SR); la scaglia cinerea è rappresentata da marne argillose grigio giallastre, marne, marne calcaree sino a calcari marnosi, ad alterazione grigio cenere, localmente con calcareniti ad elementi organogeni e con quarzo ed olivina.

L'unità alla base della formazione (SV) è poco rappresentata all'interno del territorio comunale con limitati e discontinui affioramenti all'interno della sinclinale di Muslone e a monte di Costa; la Scaglia rossa (SR), diversamente, affiora diffusamente all'interno del territorio comunale nell'immediato entroterra (fascia Musaga – Loc. Cornalè – Cima Mezzane, nella sinclinale di Muslone); limitati sono anche gli affioramenti di Scaglia Cinerea localizzati sulla strada provinciale per Valvestino nel tratto iniziale e nell'entroterra a sud di Costa.

S.S. 45bis "Gardesana occidentale"
Lavori di costruzione della variante in galleria
dal km 86+567 al km 88+800

Progetto Definitivo



LEGENDA

SCALA 1 : 10 000

| | | | |
|--|--|--|-----------------------|
| | Conolite di deiezione Depositi deltati recenti | | Scaglia Variegata |
| | Conolite di deiezione antica Depositi deltati sospesi | | Scaglia Rossa |
| | Conolite pedemontana | | Scaglia C/nera |
| | Depositi di conolite antica Indistinti dai depositi detritici | | Malolice |
| | Depositi costieri e/o rimaneggiati | | Seldfero Lombardo |
| | Depositi alluvionali>Alluvioni di fondovalle | | Formazione di Navone |
| | Depositi eluvio colluviali | | Formazione di Conceso |
| | Detrito di falda e di versante | | Medolo |
| | Conglomerati interglaciali | | Corso |
| | Depositi fluvio-glaciali e glaciolacustri | | Corna |
| | Depositi morenici | | Dolomia Principale |
| | Faglia | | |
| | Faglia presunta | | |
| | Sovrascorrimento | | |
| | Giaciture degli strati | | |

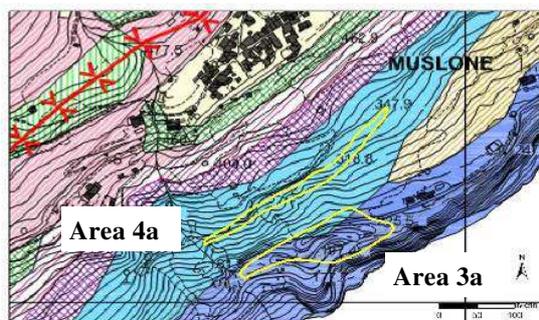
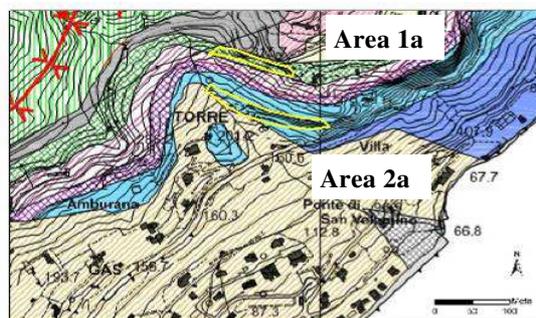


Figura 3 – Assetto geologico tratto da PGT Comune di Gargnano (BS)

3 Assetto geologico-strutturale locale

Localmente, l'assetto strutturale regionale è controllato dalla stratificazione particolarmente ben evidente nelle alternanze calcari-marne delle formazioni di Medolo e di Concesio: questa si presenta piegata con geometrie tipo kink/box fold legate alla presenza dei sovrascorrimenti SE vergenti, le cui strutture principali si trovano sotto il livello del lago di Garda (lineamento Ballino-Garda) e sul versante a monte a circa 800 m di quota (lineamento Tremosine-Tignale); il piegamento risulta nettamente asimmetrico con sviluppo di fianchi lunghi (S1) immergenti verso NW, molto ben visibili in affioramento, e locali fianchi corti immergenti ad alto angolo verso S-SE (S2). A scala regionale inoltre gli assi di piega risultano ondulati in senso NW-SE.

Alla scala dell'affioramento si sviluppa un *fracture cleavage* (P1) di piano assiale, ad alto angolo, immergente verso N-NW, talora parallelo allo stesso fianco corto delle pieghe. Si riconoscono inoltre superfici di discontinuità (T1) sub-parallele alla stratificazione, talora interpretabili come sovrascorrimenti intraformazionali, geneticamente controllati dallo sviluppo dei *thrust* principali.

Completano il quadro strutture fragili (K1, K2, F1) estese alla scala del versante e costituite da fratture e faglie, talora ad andamento normale o estensionale. Le stesse strutture si ritrovano alla mesoscala sotto forma di joint.

Nel dettaglio le pareti oggetto di analisi mostrano una stratificazione molto ben visibile, evidenziata dalle alternanze litologiche delle formazioni di Medolo e Concesio, con immersione apparente verso W-SW; unica eccezione la parete 1 che, impostata nella

Maiolica, risulta di aspetto più massivo (Figura 5). Per i dettagli della descrizione dell'assetto strutturale si rimanda al paragrafo specifico.

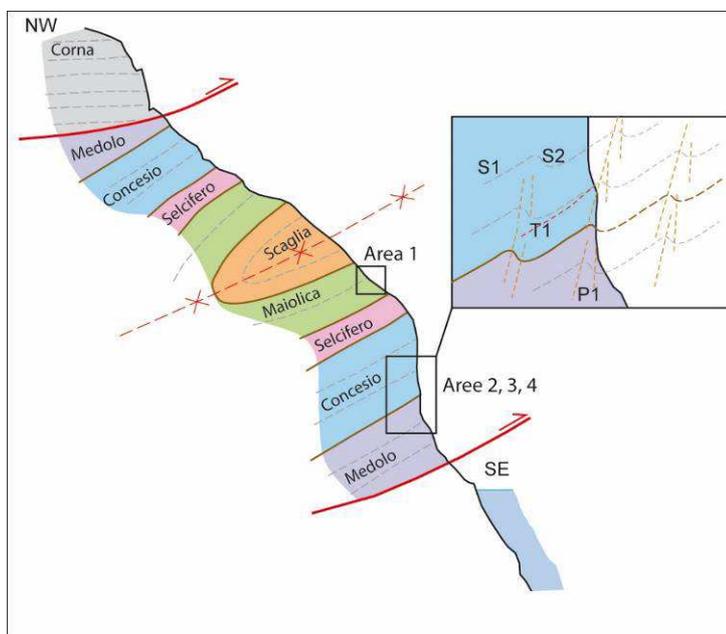
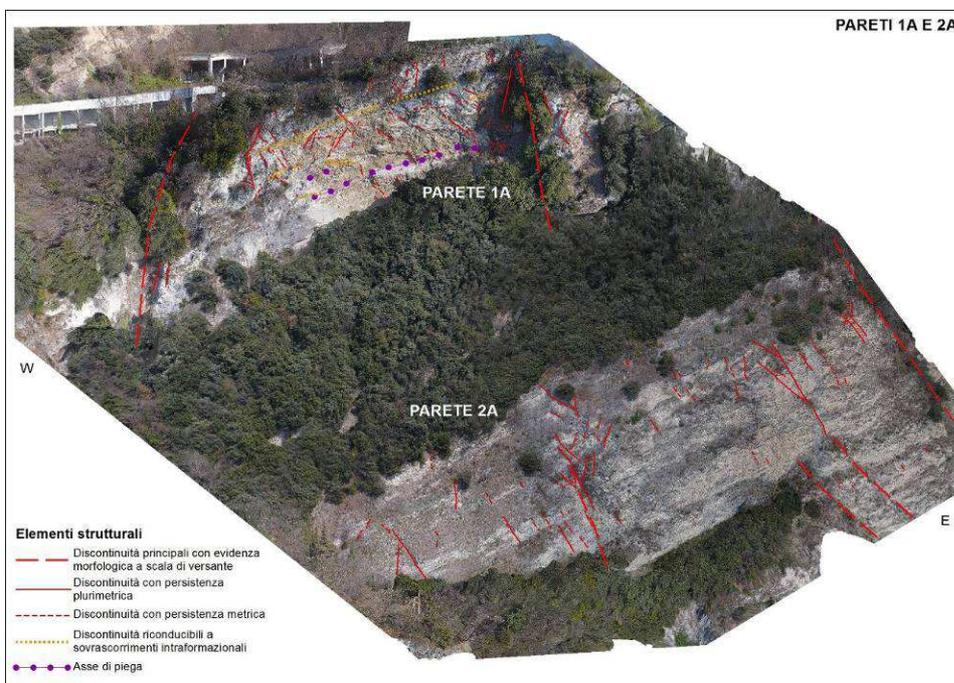


Figura 4 – Schema sintetico dell'assetto strutturale in prossimità delle aree di studio



S.S. 45bis "Gardesana occidentale"
Lavori di costruzione della variante in galleria
dal km 86+567 al km 88+800

Progetto Definitivo

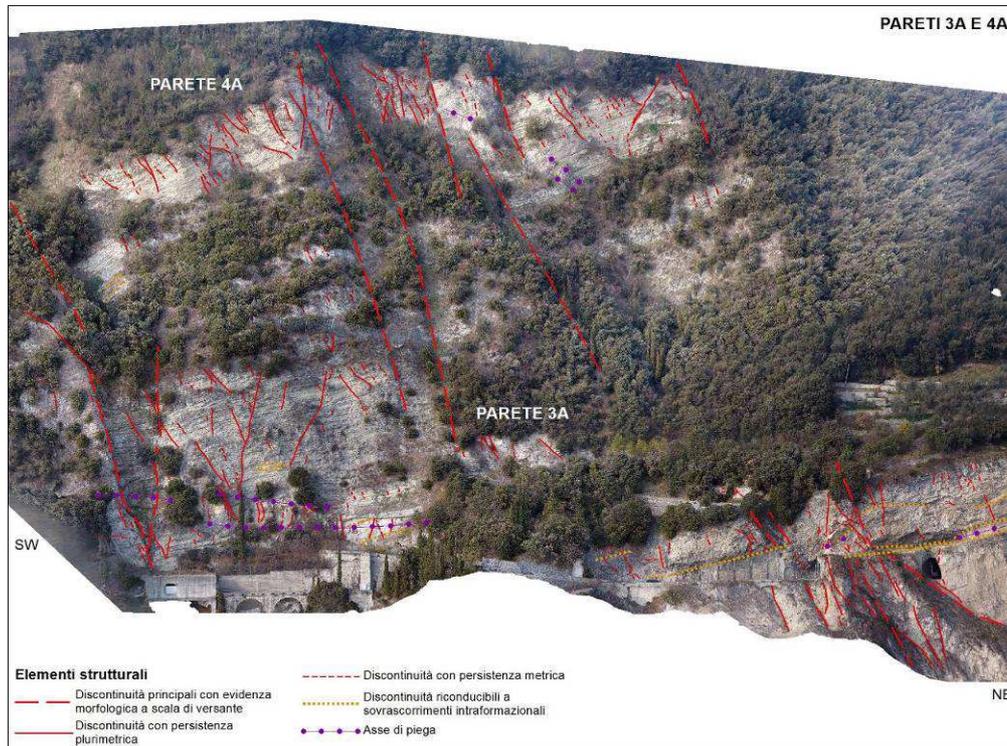


Figura 5 – Andamento delle principali strutture duttili-fragili per le pareti oggetto di indagine

4 Caratterizzazione geomeccanica

4.1 Analisi strutturale

Le pareti rocciose delle aree 1A, 2A, 3A e 4A sono state analizzate per evidenziare i principali sistemi di discontinuità presenti ed individuare le orientazioni delle discontinuità che scompongono la parete rocciosa.

Di seguito una rappresentazione grafica (Figg. 6-13) estratta dallo specifico studio condotto dalla Soc. IMAGEO s.r.l., nei quali si illustrano i settori di indagine strutturale ed i principali sistemi di discontinuità per le diverse pareti rocciose.

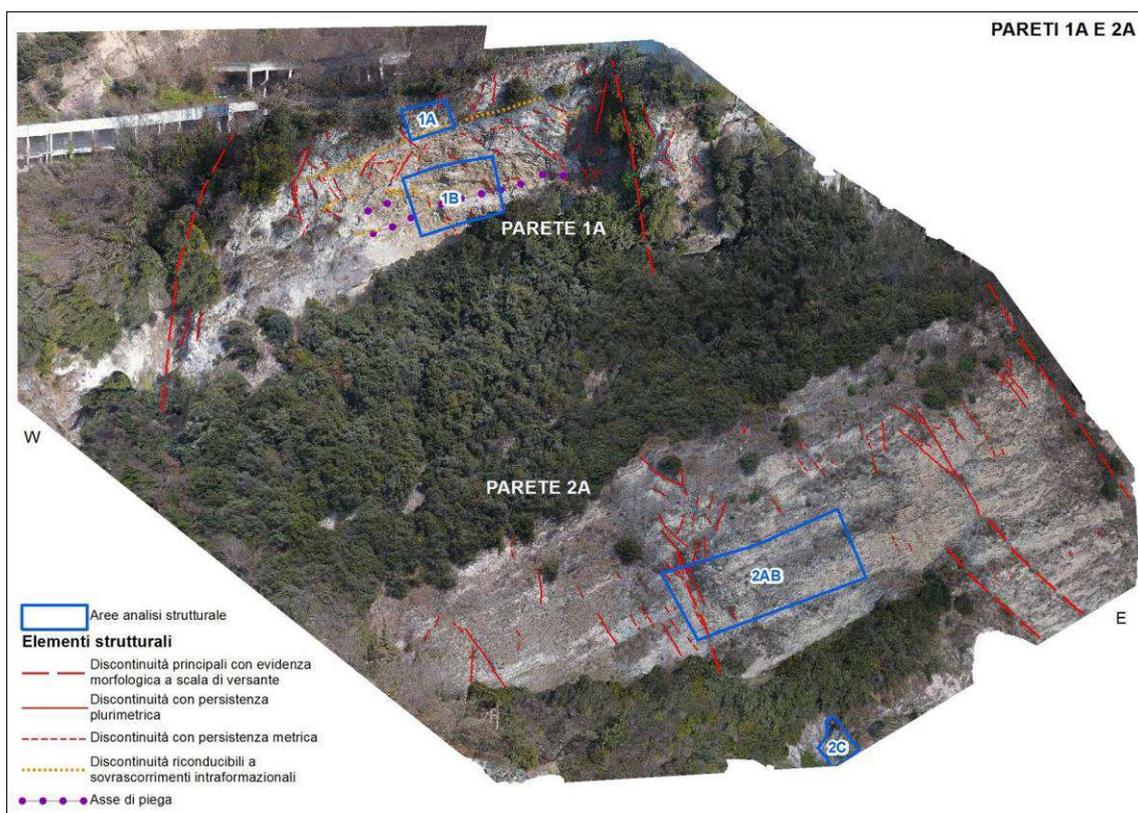


Figura 6 – Settori di indagine strutturale per le pareti 1A e 2A

Progetto Definitivo

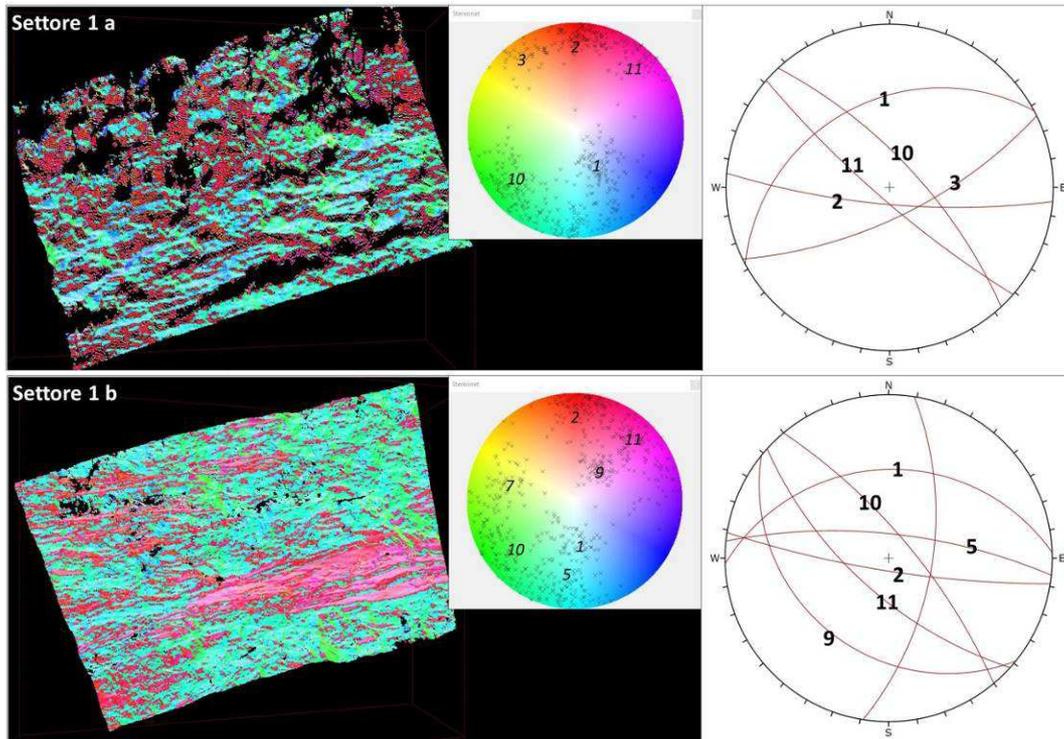


Figura 7 – Dati strutturali e principali sistemi di discontinuità per la parete 1A

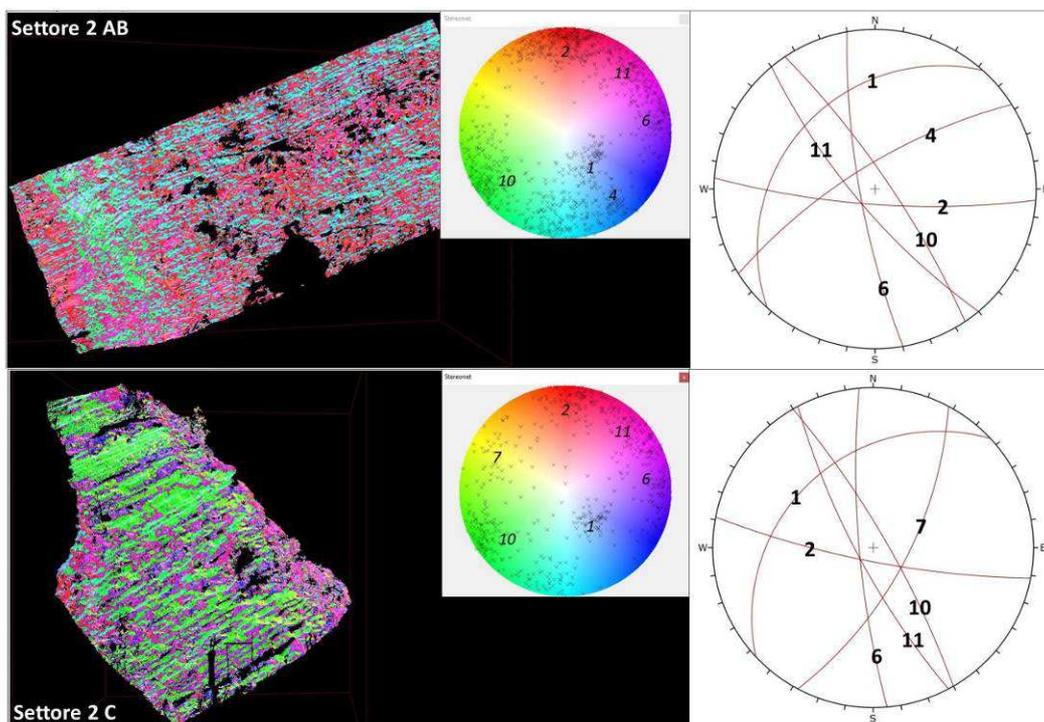


Figura 8 – Dati strutturali e principali sistemi di discontinuità per la parete 2A

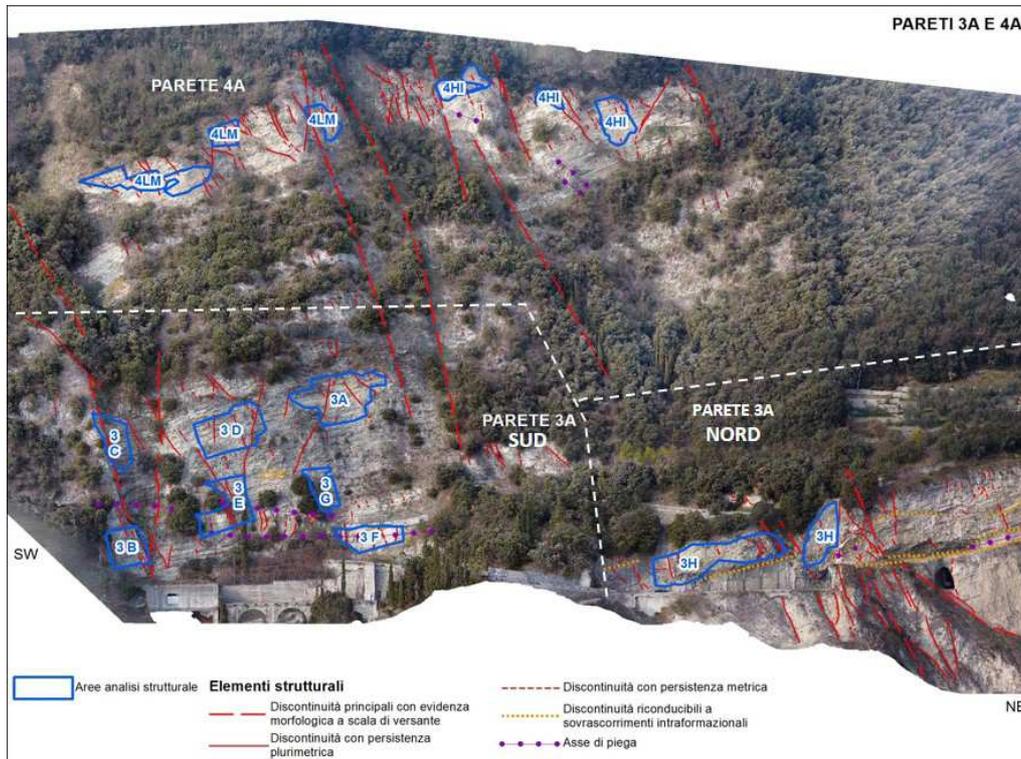


Figura 9 – Settori di indagine strutturale per le pareti 3A (Nord e Sud) e 4°

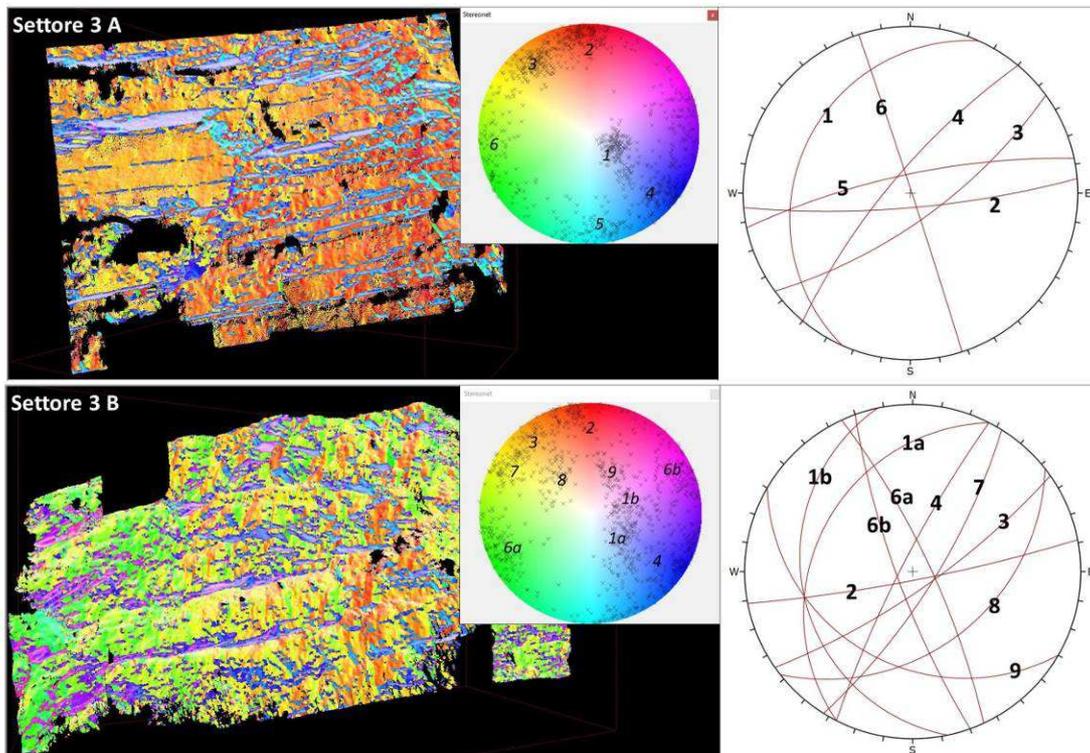


Figura 10 – Dati strutturali e principali sistemi di discontinuità per la parete 3A (settori A-B)

Progetto Definitivo

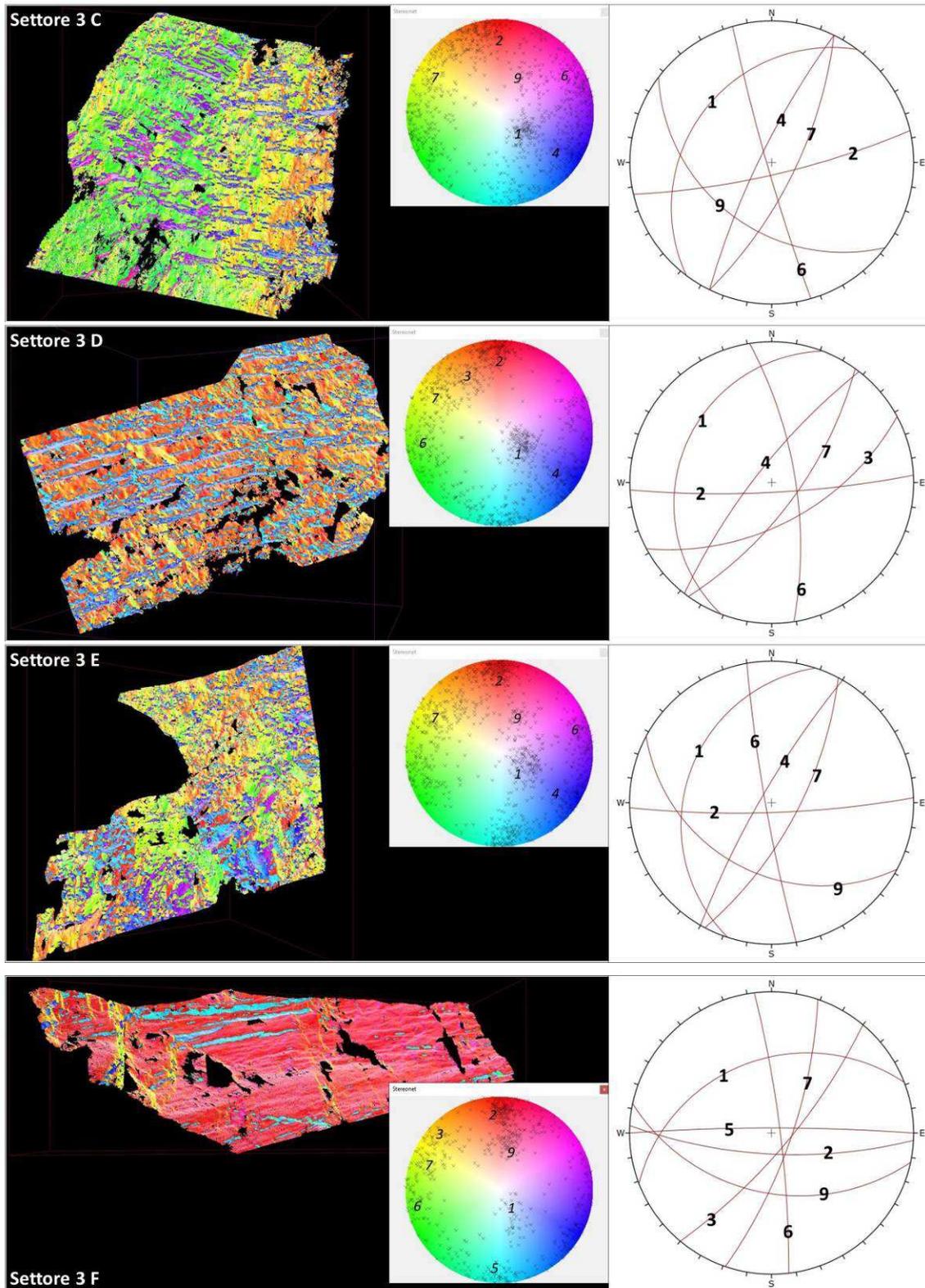


Figura 11 – Dati strutturali e principali sistemi di discontinuità per la parete 3A (settori C-F)

Progetto Definitivo

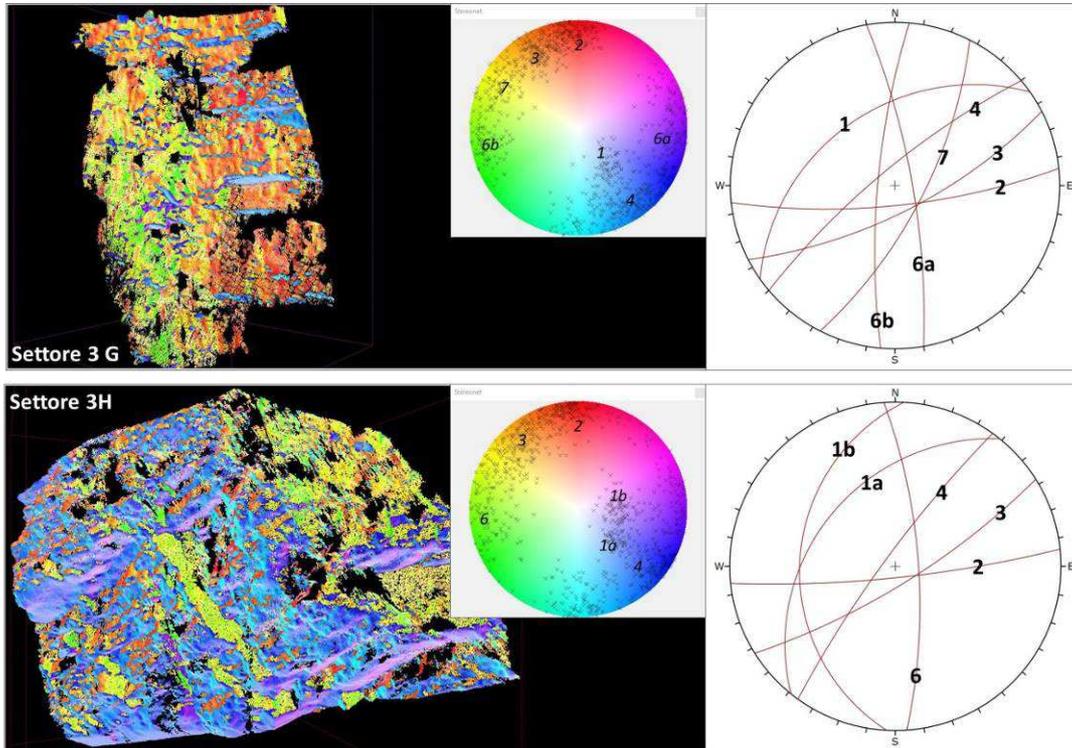


Figura 12 – Dati strutturali e principali sistemi di discontinuità per la parete 3A (settori E-H)

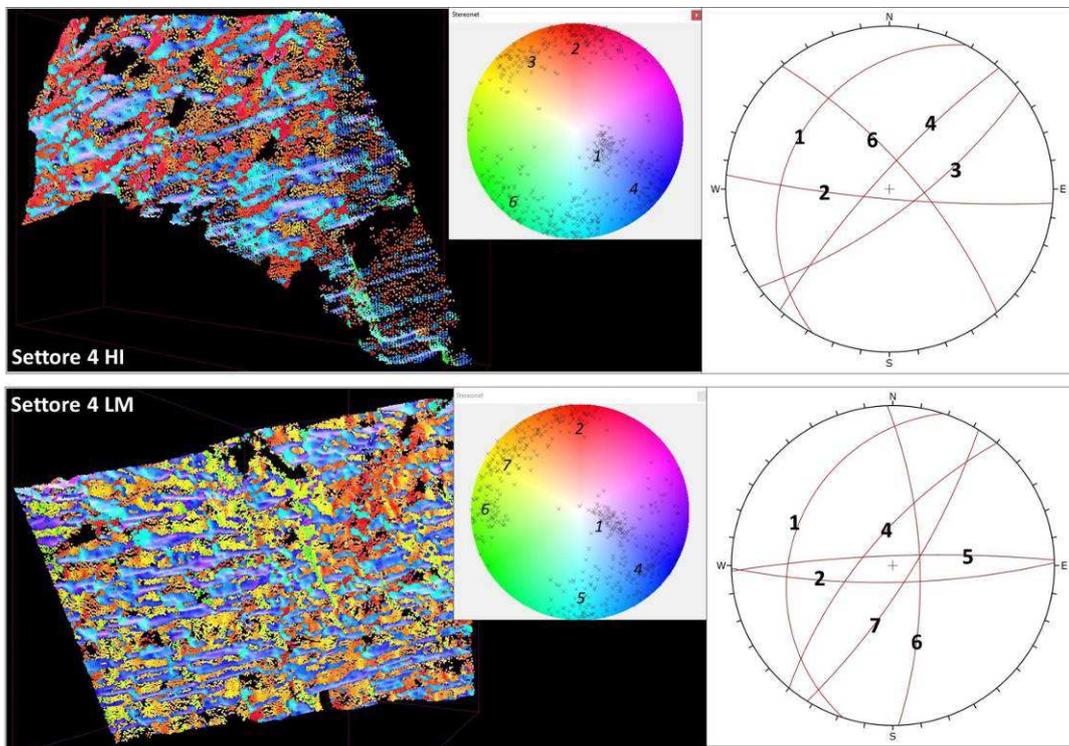


Figura 13 – Dati strutturali e principali sistemi di discontinuità per la parete 4A (settori HI-LM)

Le analisi strutturali, confrontati con i dati di terreno, hanno permesso di definire il quadro strutturale complessivo, così come illustrato nella figura 14.

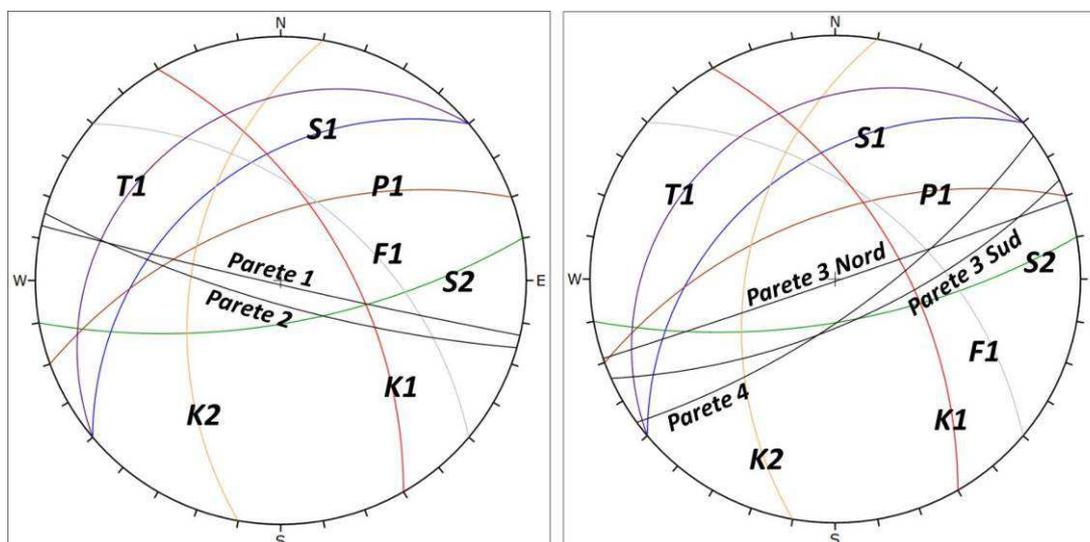


Figura 14 – Assetto strutturale complessivo ed interpretato, con rappresentazione dei versanti medi per ogni parete di indagine

Nel complesso l'assetto strutturale locale è coerente con il modello regionale; in Tabella 1 si riporta l'identificazione e l'orientazione di ogni famiglia di discontinuità.

| SIGLA | DISCONTINUITÀ | TIPO | IMM. | INC L. |
|-----------|---|-------------------------------|-----------|-----------|
| <i>S1</i> | <i>Fianchi lunghi delle pieghe asimmetriche</i> | <i>Stratificazione</i> | <i>20</i> | <i>0</i> |
| <i>S2</i> | <i>Fianchi corti delle pieghe asimmetriche</i> | <i>Stratificazione</i> | <i>70</i> | <i>0</i> |
| <i>P1</i> | <i>Fracture cleavage di piano assiale</i> | <i>Joint</i> | <i>40</i> | <i>0</i> |
| <i>T1</i> | <i>Discontinuità riconducibili a sovrascorrimenti intraformazionali</i> | <i>Faglie</i> | <i>20</i> | <i>0</i> |
| <i>K1</i> | <i>Discontinuità talora ad andamento listrico</i> | <i>Faglie normali / Joint</i> | <i>0</i> | <i>0</i> |
| <i>K2</i> | <i>Discontinuità</i> | <i>Faglie normali / Joint</i> | <i>80</i> | <i>0</i> |
| <i>F1</i> | <i>Faglie estensionali</i> | <i>Faglie</i> | <i>0</i> | <i>2</i> |

Tabella 1 – Sintesi dati strutturali

In generale alcune discontinuità mostrano persistenza pluridecimetrica, riconoscibile alla scala del versante: in particolare a questa scala K1 presenta caratteristiche di faglia normale, talora ad andamento listrico, associata a buffer di deformazione plurimetrica; analogamente K2 presenta caratteristiche di faglia normale alla scala del versante. Alla mesoscala invece (affioramento), i sistemi di discontinuità (K1, K2, P1...) si presentano come joint, con sia persistenza che spaziatura decimetrica.

I rapporti geometrici tra le diverse famiglie di discontinuità sono complicati dall'andamento ondulato delle pieghe a scala regionale: i diversi elementi delle pieghe (S1, S2, P1) possono trovarsi variamente orientati rispetto agli altri sistemi di discontinuità.

Talora i sovrascorrimenti intraformazionali (T1) si presentano sub-paralleli ai fianchi lunghi (S1) delle pieghe, talora inoltre si impostano in corrispondenza degli strati marnosi nelle unità flyschoidi.

Sui versanti fronte lago, i fianchi lunghi (S1) della stratificazione presentano generalmente andamento a reggipoggio, mentre i fianchi corti (S2) presentano locali andamenti a franapoggio molto inclinato, analogamente al pendio. Talora anche il sistema P1 si presenta sub-parallelo a tali fianchi corti, presentando anch'esso un andamento a franapoggio molto inclinato.

Per l'area 3F, l'accessibilità diretta in sito ha permesso il riconoscimento degli elementi cinematici indispensabili per l'interpretazione genetica delle famiglie di discontinuità (Figura 15):

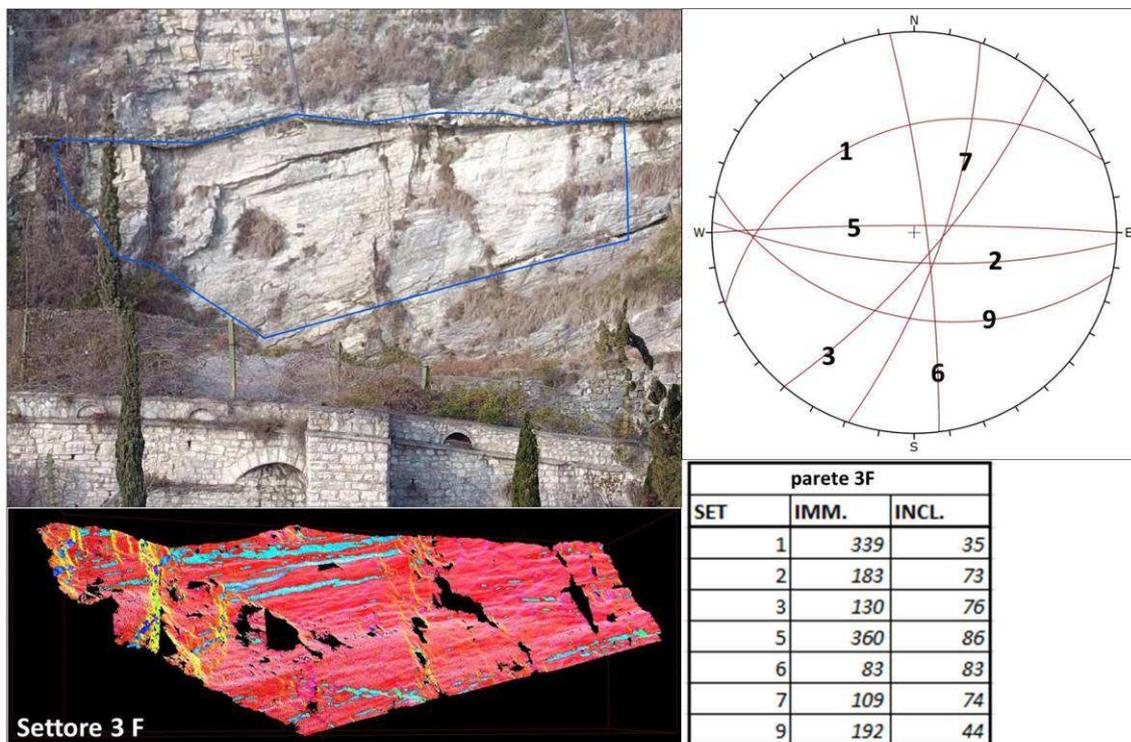


Figura 15 – Assetto strutturale area 3F

Sistema 1: Stratificazione NW-N immergente, a medio angolo, corrispondente al fianco lungo (S1) delle pieghe asimmetriche.

Sistema 2-9: stratificazione S immergente ad alto angolo (o N immergente ad altissimo angolo), corrispondente al fianco corto (S2) delle pieghe asimmetriche.

Sistema 2-5: sistema correlabile con il piano assiale delle pieghe asimmetriche, visto sul terreno come clivaggio (P1).

Sistema 3-7: sistema SE immergente ad alto angolo.

4.2 Analisi cinematiche

Allo scopo di individuare i potenziali meccanismi che potrebbero dare luogo a fenomeni di instabilità, sono state effettuate le verifiche cinematiche. Tali analisi, si ricorda, forniscono indicazioni sui possibili meccanismi di distacco, non sul grado di stabilità dei casi esaminati.

In considerazione delle scarpate rocciose, caratterizzate da alternanze tra litotipi calcarei e marnosi a tratti fortemente deformati, si è scelto di verificare i vari cinematismi per ogni settore d'indagine adottando due valori cautelativi di angolo d'attrito desunti da letteratura e relativi a giunti calcarei (34°) e giunti calcarei a riempimento argilloso (22°) (Jaeger & Cook, 1977; Franklin & Dusseault, 1989; Bruschi, 2004).

Le giaciture delle principali famiglie di discontinuità individuate ed utilizzate nelle analisi cinematiche sono riportate nella Tabella 1 precedentemente esposta.

Si è proceduto individuando i piani che meglio approssimano le diverse orientazioni dei quattro settori d'indagine, ovvero 1A, 2A, 3A e 4A (Figura 6 e Figura 9). La parete 3A è stata suddivisa in due settori, poiché la porzione meridionale ha generalmente un'orientazione diversa rispetto alla settentrionale.

Nelle analisi volte a verificare i cinematismi del ribaltamento e dello scorrimento planare è anche necessario impostare un intervallo di variabilità relativo alla direzione di immersione dei piani di discontinuità rispetto a quella del versante. Tale intervallo di valori è stato definito variabile fra $+30^\circ$ e -30° , come suggerito da Goodman (1981).

Di seguito vengono riassunti i risultati delle analisi cinematiche condotte sui diversi "piani di versante" che meglio approssimano l'orientazione dei diversi affioramenti rocciosi, evidenziando le situazioni critiche riscontrate per quattro cinematismi (scorrimento planare e

S.S. 45bis "Gardesana occidentale"
Lavori di costruzione della variante in galleria
dal km 86+567 al km 88+800

Progetto Definitivo

di cunei, ribaltamento diretto e di flessura) ed a seconda che si consideri un angolo di attrito di 22° o 34°. Tutto ciò è ampiamente illustrato e schematizzato nelle successive immagini.

Nella sottostante Tabella 2 di sintesi sono elencati i sistemi di discontinuità potenzialmente coinvolti per ognuna delle tre diverse orientazioni dei versanti presi in considerazione.

| Risultati delle analisi cinematiche (Set che soddisfano un cinematicismo) - In nero comuni a 22° e 34° - In rosso solo per 22° | | | | | | |
|--|----------------------|--|--|--|--------------------------|--|
| Piano di versante | scivolamento planare | scivolamento di cunei (intersezioni fra i SET) | | | ribaltamento di flessura | |
| | | MAX instabilità | estensione solo per versanti molto inclinati | | | |
| Parete 1 (193/88) | S2 | S2/K2 | S1/S2 ; P1/S2 | | F1 ; P1 ; T1 | |
| Parete 2 (196/79) | S2 | S2/K3 | S1/S2 | | F1 ; P1 | |
| Parete 3 Nord (161/89) | S2 | S2/K1 ; S2/K2 ; S2/F1 | / | | S1 ; P1 ; T1 | |
| Parete 3 Sud (156/69) | S2 | S2/K1 ; S2/F1 | / | | S1 ; P1 | |
| Parete 4 (144/73) | S2 | S2/K1 ; S2/F1 | / | | S1 ; P1 ; K2 | |

| Piano di versante | ribaltamento diretto | | | | | |
|---------------------------|---|--|-----------------|--|---|---|
| | piani basali critici | | | intersezioni critiche (rischio di formazione di blocchi critici per ribaltamento) | | |
| | scivolamento e ribaltamento possono occorrere simultaneamente | superfici di rilascio potenziali per blocchi di flessura (senza piani di scivolamento) | | rilascio di blocchi per scivolamento lungo i piani basali | rilascio di blocchi senza scivolamento lungo i piani basali | |
| MAX instabilità | | piani basali obliqui (estensione solo per versanti molto inclinati) | MAX instabilità | | piani basali obliqui (estensione solo per versanti molto inclinati) | |
| Parete 1 (193/88) | S2 | / | T1 | K1/K2 ; T1/K2 ; S1/K1 ; S1/F1 ; K1/F1 ; K1/P1 ; F1/P1 | / | / |
| Parete 2 (196/79) | S2 | / | T1 | K1/K2 ; T1/K2 ; S1/K1 ; S1/F1 ; K1/F1 ; K1/P1 ; F1/P1 | / | / |
| Parete 3 Nord (161/89) | S2 | / | / | T1/F1 ; F1/K2 ; S1/K2 ; S1/F1 ; K1/F1 ; K1/S1 ; K1/K2 ; T1/K2 ; K1/T1 | / | / |
| Parete 3 Sud (156/69) | S2 | / | / | F1/K2 ; S1/K2 ; S1/F1 ; K1/S1 ; K1/K2 | / | / |
| Parete 4 (144/73) | \ | / | / | T1/F1 ; T1/K2 ; F1/K2 ; S1/K2 ; S1/F1 ; K1/S1 ; K1/K2 | | |

Tabella 2 – Sintesi dei risultati delle analisi cinematiche condotte sui tre piani che complessivamente approssimano gli affioramenti rocciosi dei "piani di versante" A, B e C.

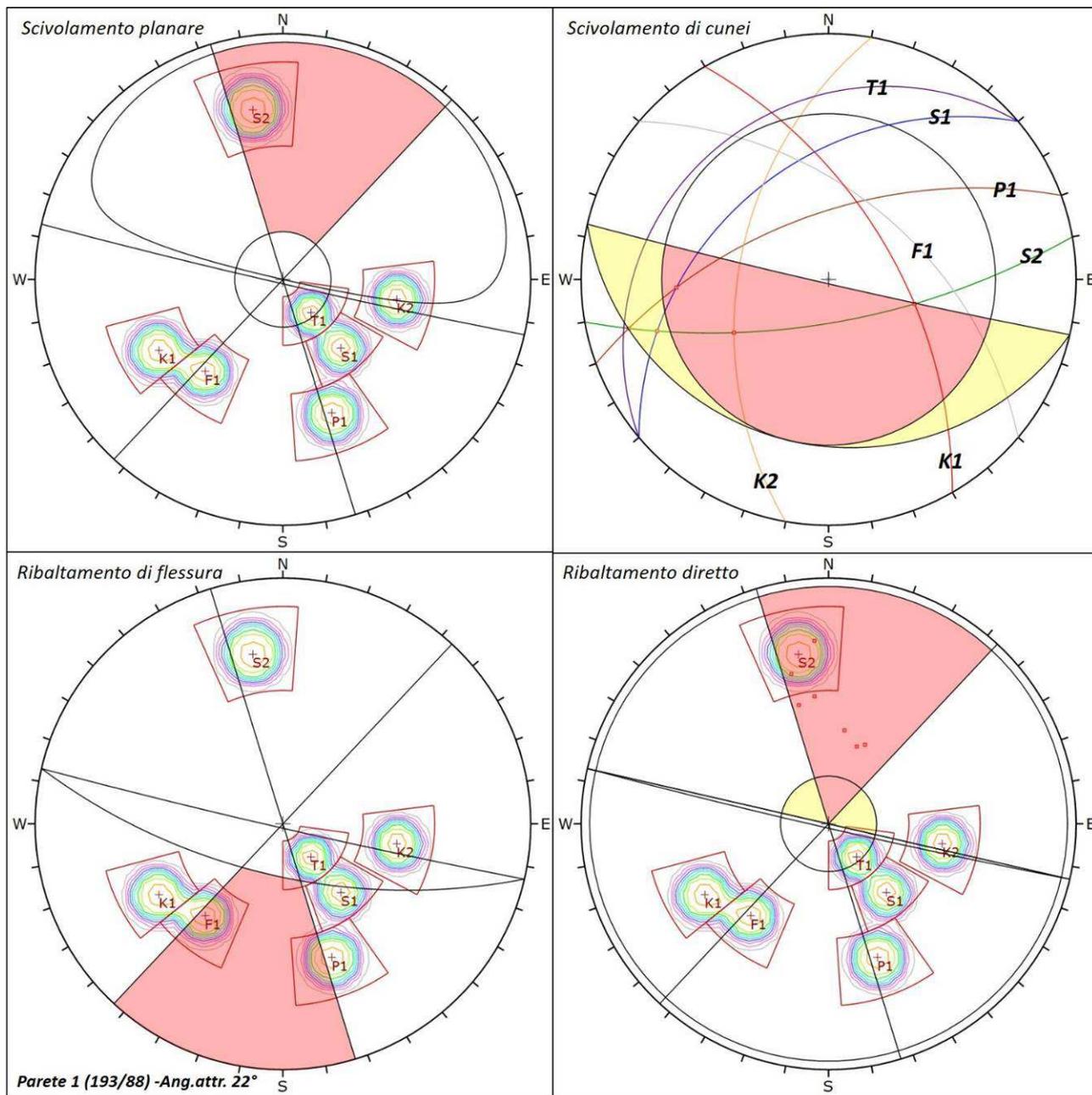


Figura 16 – Elaborati di sintesi delle verifiche cinematiche condotte sul piano che approssima gli affioramenti rocciosi del settore 1-A per un angolo di attrito di 22°.

Progetto Definitivo

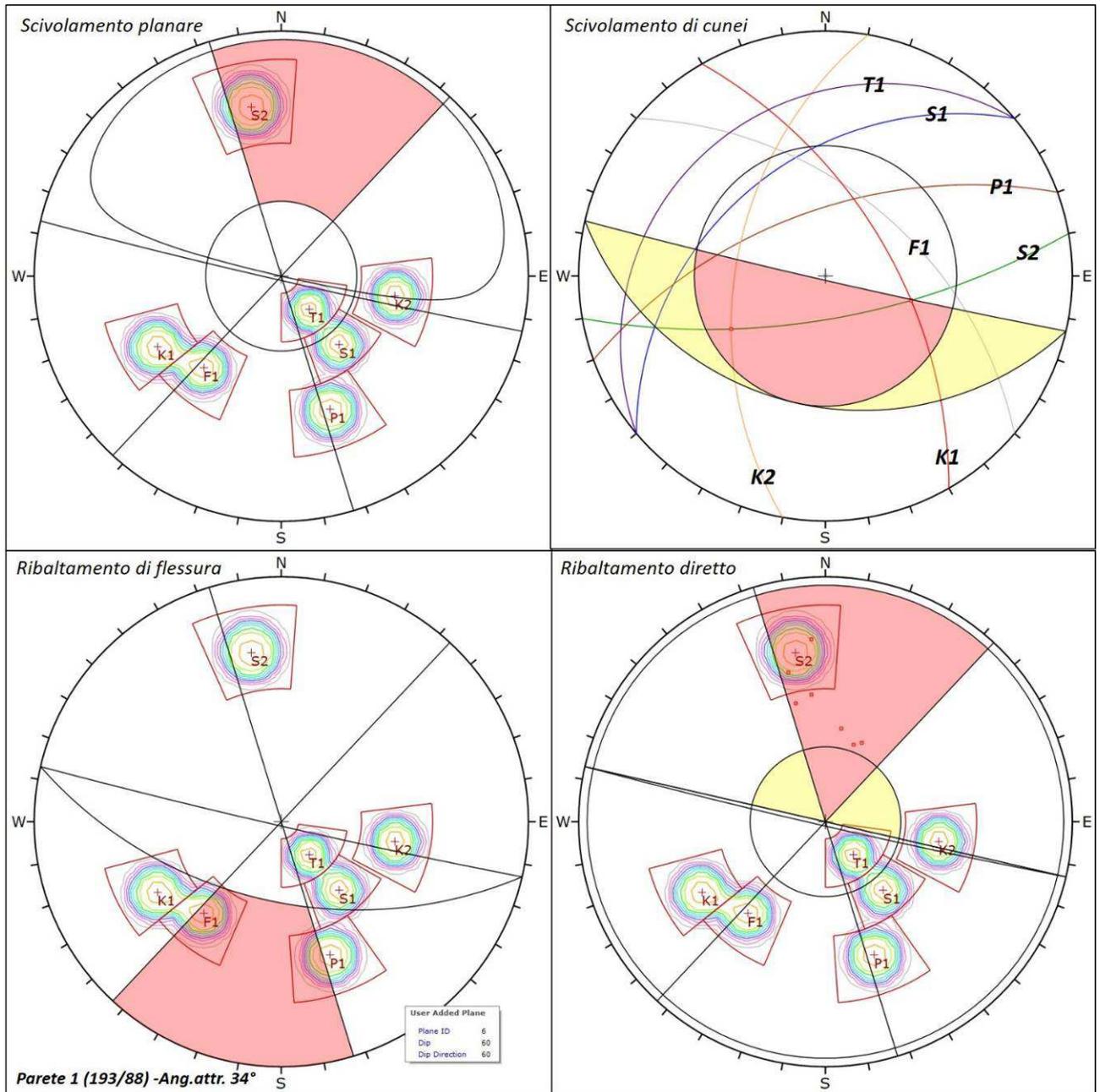


Figura 17 – Elaborati di sintesi delle verifiche cinematiche condotte sul piano che approssima gli affioramenti rocciosi del settore 1-A per un angolo di attrito di 34°.

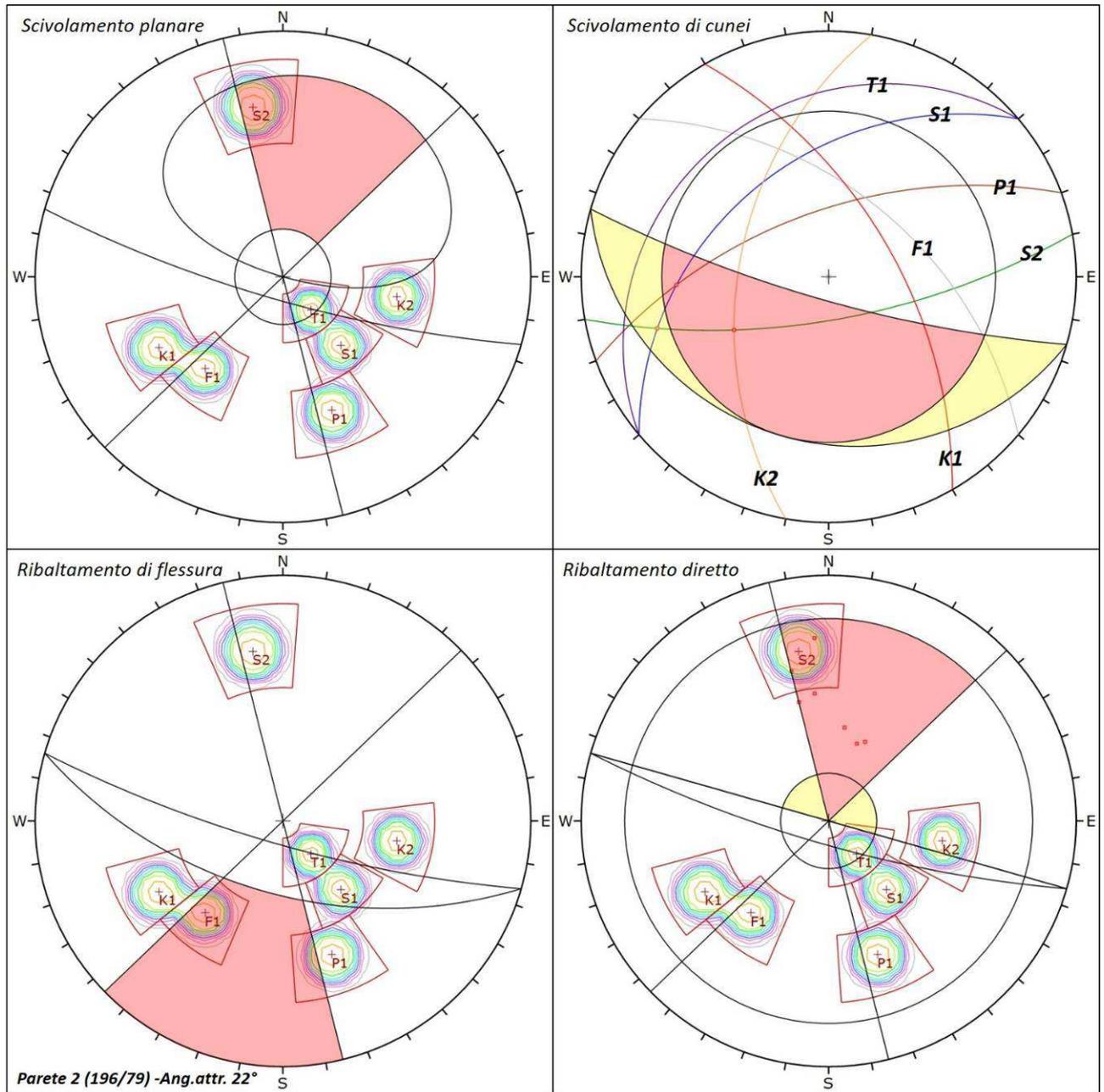


Figura 18 – Elaborati di sintesi delle verifiche cinematiche condotte sul piano che approssima gli affioramenti rocciosi del settore 2-A per un angolo di attrito di 22°.

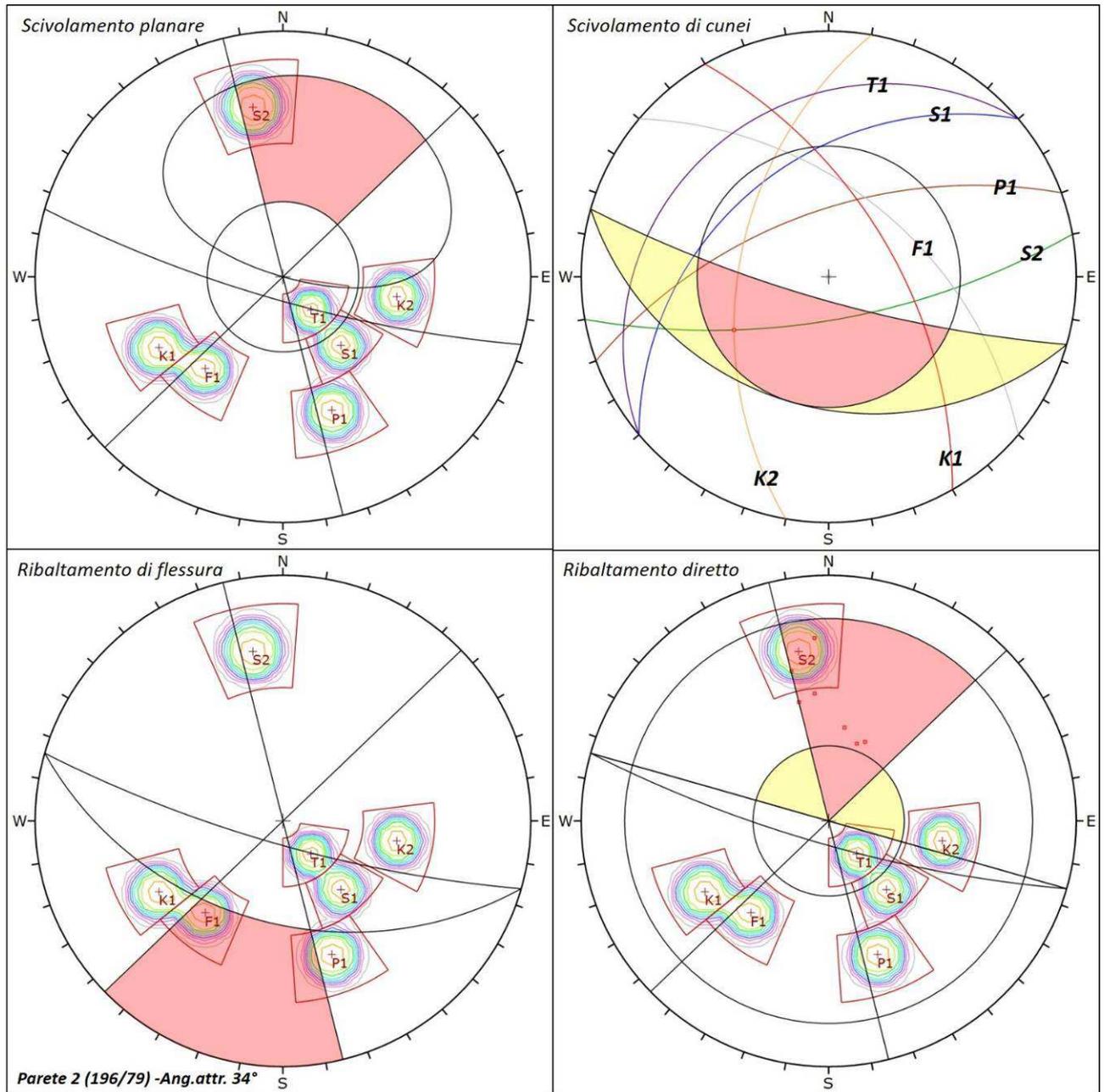


Figura 19 – Elaborati di sintesi delle verifiche cinematiche condotte sul piano che approssima gli affioramenti rocciosi del settore 2-A per un angolo di attrito di 34°.

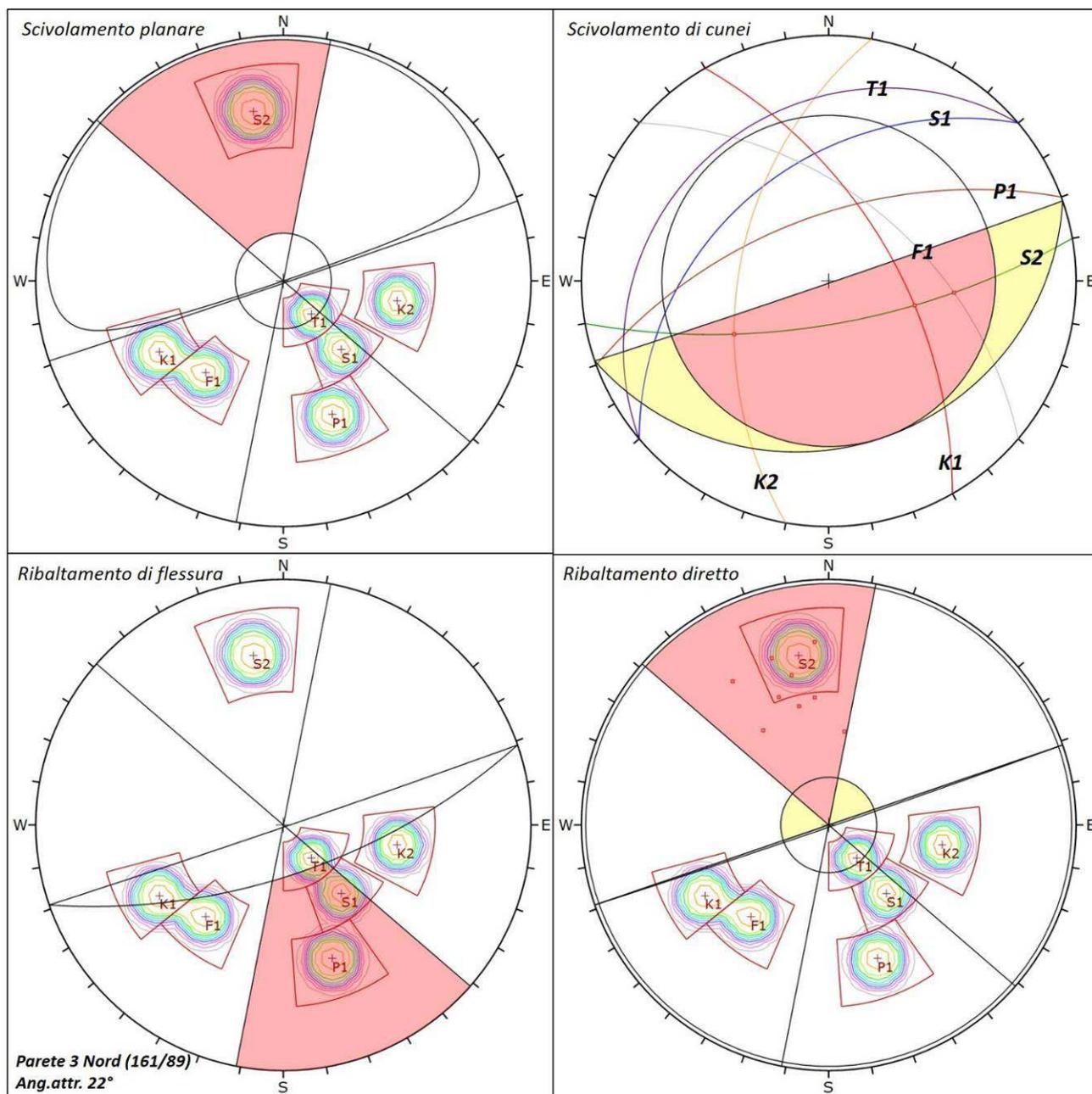


Figura 20 – Elaborati di sintesi delle verifiche cinematiche condotte sul piano che approssima gli affioramenti rocciosi del settore 3-A Nord per un angolo di attrito di 22°.

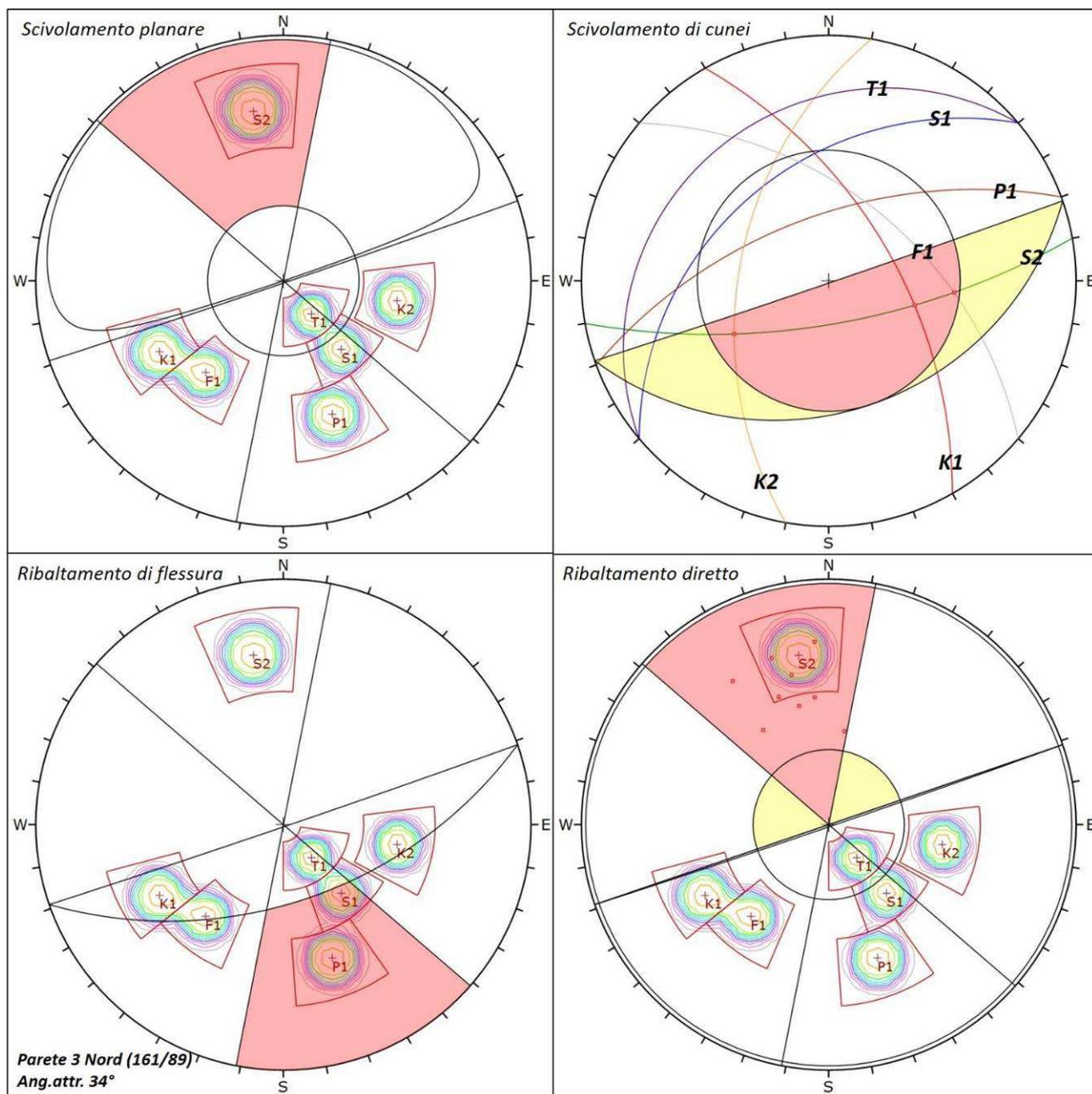


Figura 21 – Elaborati di sintesi delle verifiche cinematiche condotte sul piano che approssima gli affioramenti rocciosi del settore 3-A Nord per un angolo di attrito di 34°.

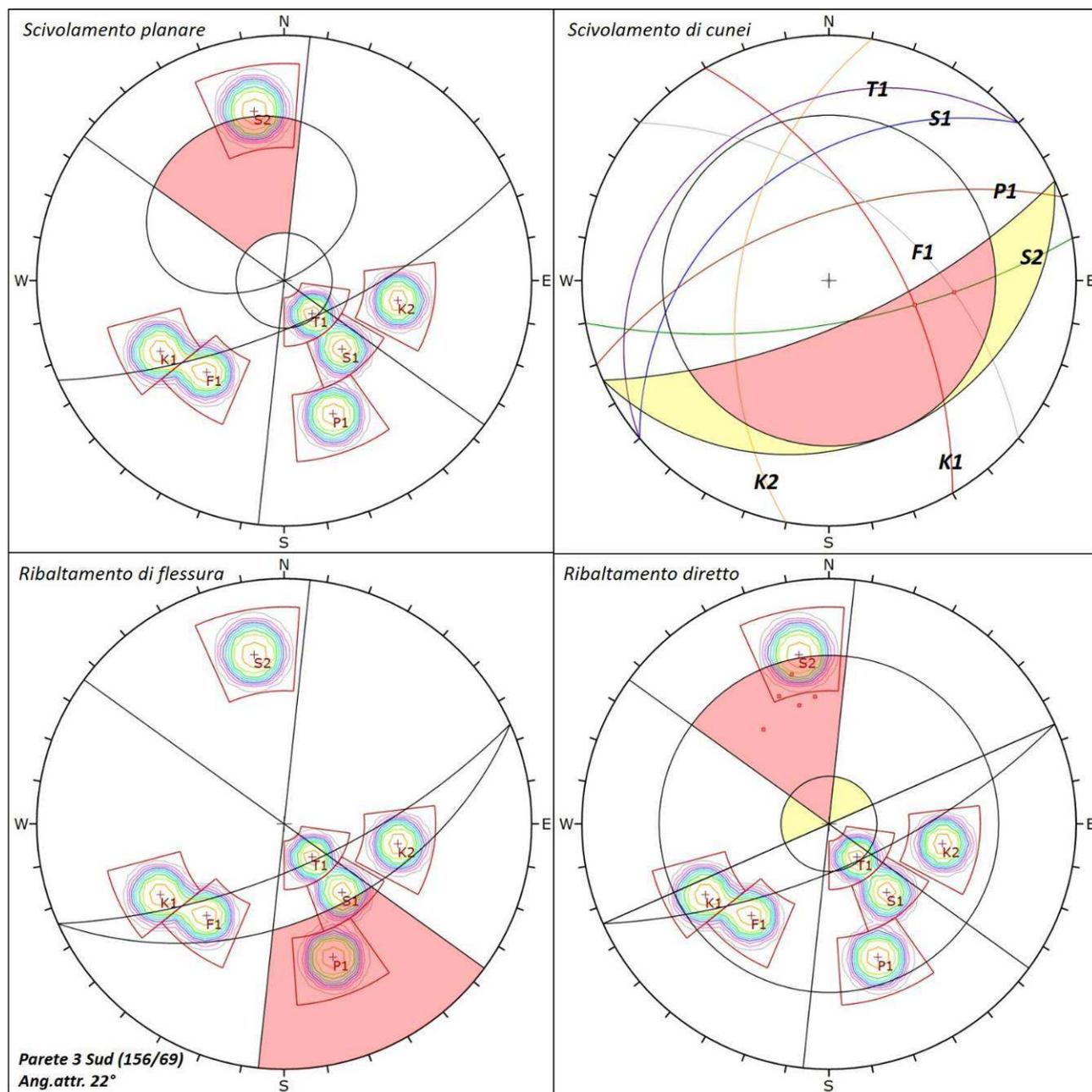


Figura 22 – Elaborati di sintesi delle verifiche cinematiche condotte sul piano che approssima gli affioramenti rocciosi del settore 3-A Sud per un angolo di attrito di 22°.

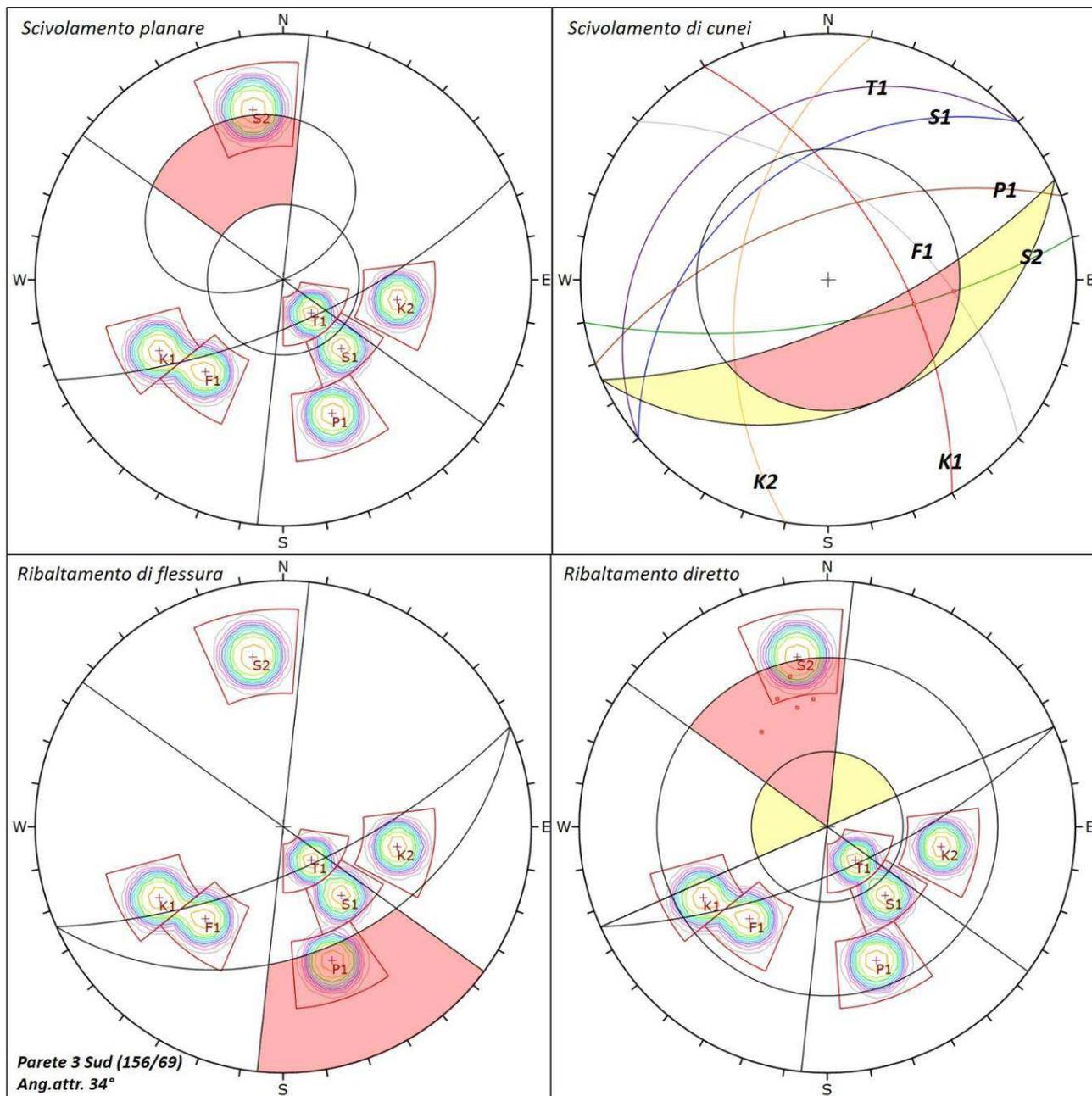


Figura 23 – Elaborati di sintesi delle verifiche cinematiche condotte sul piano che approssima gli affioramenti rocciosi del settore 3-A Sud per un angolo di attrito di 34°.

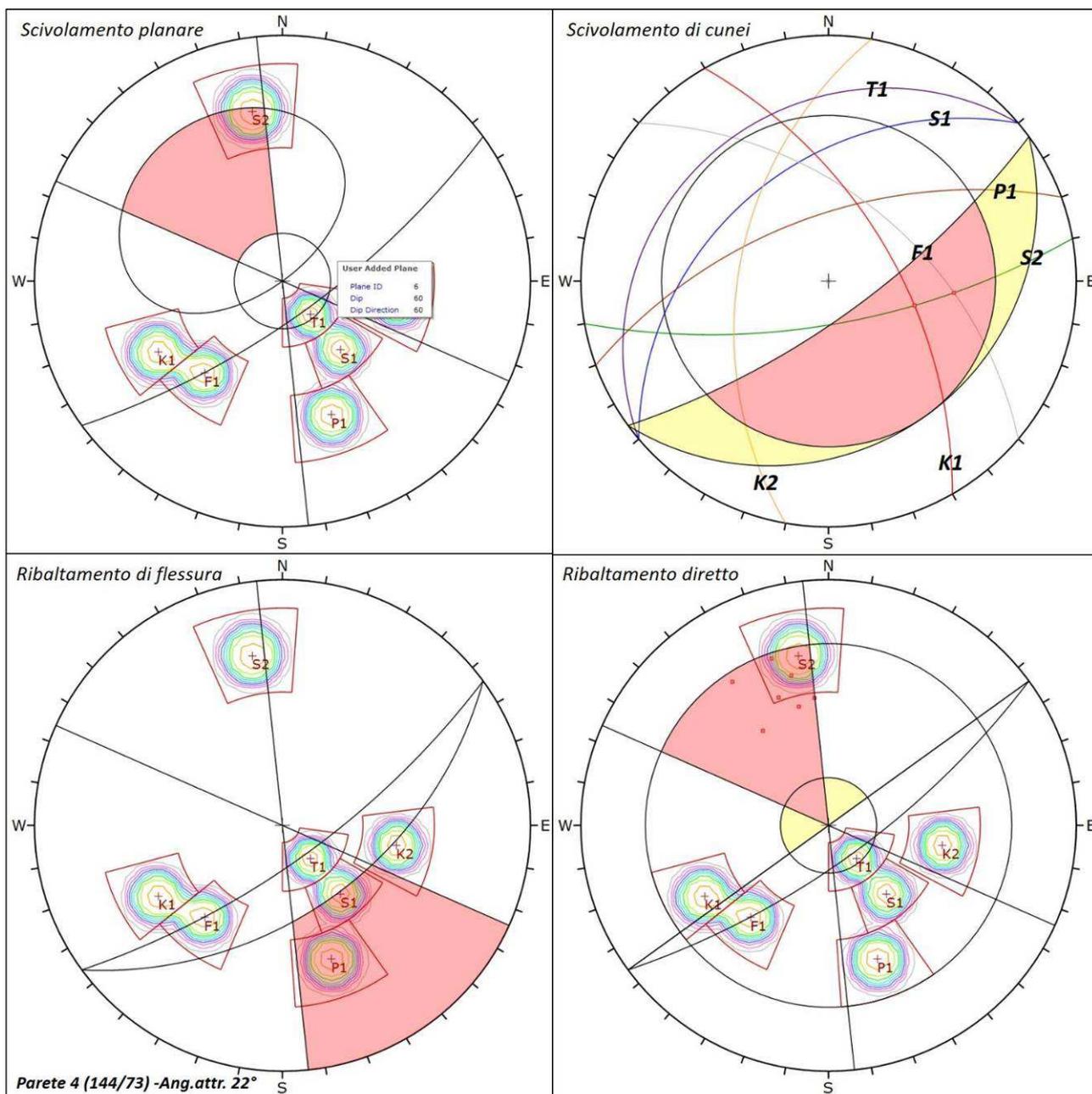


Figura 24 – Elaborati di sintesi delle verifiche cinematiche condotte sul piano che approssima gli affioramenti rocciosi del settore 4-A per un angolo di attrito di 22°.

Progetto Definitivo

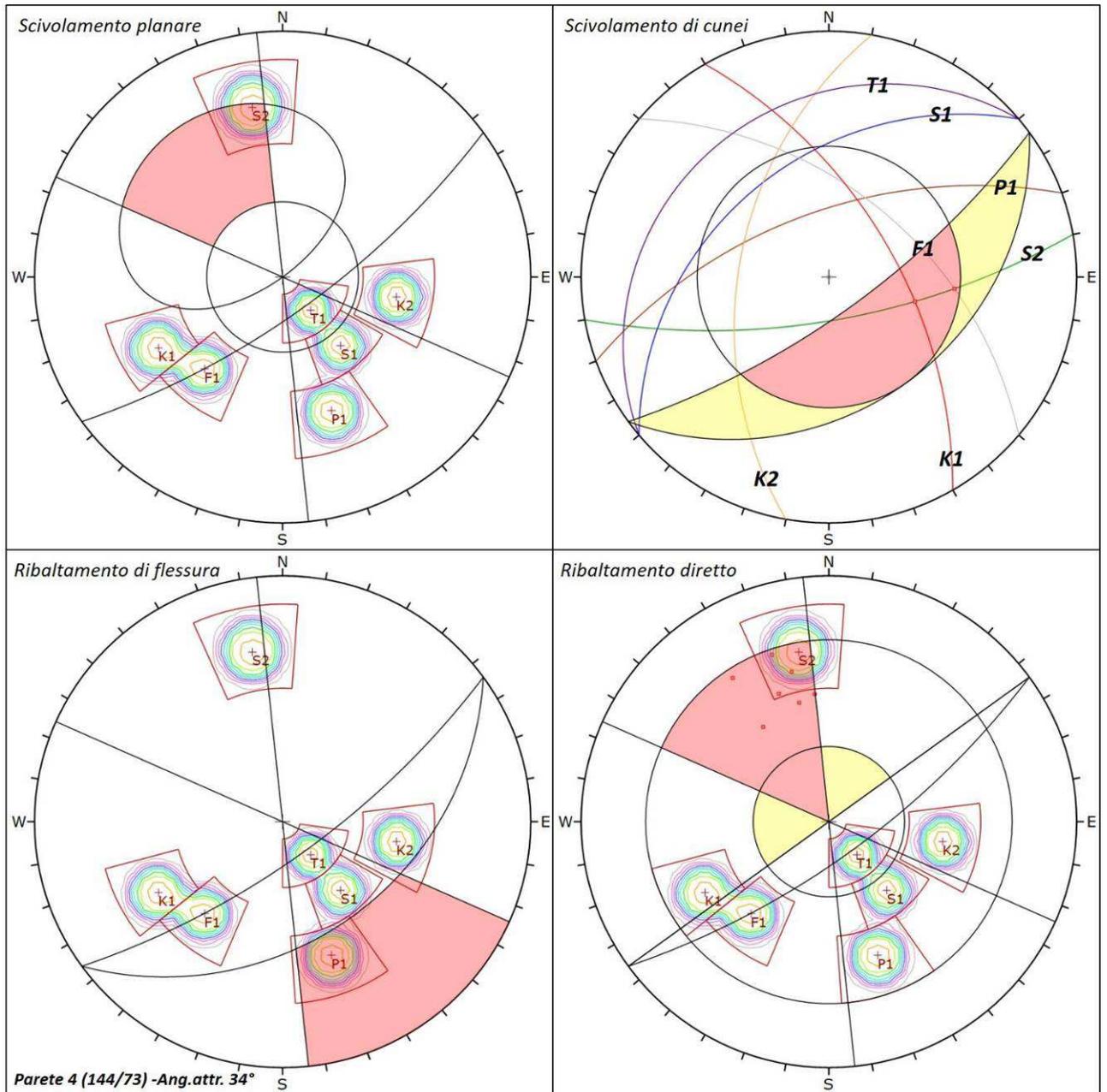


Figura 25 – Elaborati di sintesi delle verifiche cinematiche condotte sul piano che approssima gli affioramenti rocciosi del settore 4-A per un angolo di attrito di 34°.

4.3 Sintesi geomeccanica

Come già anticipato, i quattro settori rocciosi oggetto d'indagine sono costituiti materiali molto simili, talvolta difficili da distinguere. In linea generale si tratta di calcari più o meno marnosi, spesso selciferi, alternati a livelli terrigeni marnosi e/o argillosi. Gli strati sono generalmente poco potenti, da centimetrici a decimetrici, raramente raggiungono i 0,50 m. Mediamente sono più sottili negli affioramenti di Maiolica della parete 1A, rispetto a quelli delle altre tre pareti costituite dalla Formazione di Concesio (Parete 2A, 3A Nord e 4A) e Medolo (Parete 3A Sud).

Tutti i settori analizzati hanno subito intense deformazioni i cui effetti sono mostrati nelle panoramiche e nei dettagli fotografici riportati nel seguito. Il settore maggiormente deformato è quello della parete 1A in Maiolica (Figura 26), mentre la parete 2A data dai depositi del Concesio appare come il meno deformato (Figura 27). Nelle immagini di Figura 28, Figura 29 e Figura 30 sono invece rispettivamente rappresentati gli affioramenti tipici delle pareti 3A Sud e Nord e 4A, tutti generalmente intensamente deformati. L'alternanza di strati calcarei e terrigeni, conferisce una plasticità variabile alle diverse formazioni geologiche, ma generalmente considerevole, pertanto i settori d'indagine hanno prevalentemente reagito alle spinte tettoniche con una deformazione duttile-fragile.

Le discontinuità degli strati calcarei si presentano generalmente inalterate o solo leggermente alterate, con rugosità variabile, generalmente con JRC (Joint Roughness Coefficient) compreso tra 4 e 12. Sempre nei calcari, gli strati sono quasi sempre fortemente disarticolati, da diversi tipi di giunti con aperture e riempimenti diversi anche a piccola scala d'osservazione, passando da serrati ad aperti, anche di diversi centimetri, e con riempimenti sia di calcite ricristallizzata che terrigeni. Sui vari litotipi calcarei (Medolo, Maiolica e

Formazione di Concesio), sono state anche tentate alcune misure sclerometriche con un martello di Schmidt da roccia, ottenendo però misure molto disperse e ritenute poco significative. Gli indici di rimbalzo rilevati variano per tutti i litotipi fra 50 e 65. Tali misure della resistenza si ritengono poco significative a causa della microfratturazione di tutti gli affioramenti accessibili, cosa che comporta volumi di roccia troppo piccoli per l'energia di impatto del martello.

La presenza di acqua è stata rinvenuta solo nel settore settentrionale della parete 1A. In Figura 31 si distingue chiaramente dal color ruggine la porzione di parete interessata da stillicidio di acqua.

Riguardo ai livelli marnoso e/o argillosi, si evidenzia come questi, costituendo per natura elementi di maggior debolezza rispetto ai calcari, coincidano spesso con gli orizzonti lungo cui si sono sviluppate le maggiori deformazioni. In Figura 32, sono messi a confronto due dettagli fotografici in cui i livelli marnosi del Medolo sono regolarmente "scagliettati" parallelamente (foto in alto) ed intensamente destrutturati ed ad andamento irregolarmente "uncinato" a causa dei Thrust evidenti lungo la strada nel settore di parete 3A Sud.

Ciò comporta che le intercalazioni calcareo-marnose, già generalmente favorevoli a generare fenomeni di instabilità diffusi, nei settori caratterizzati da queste intense deformazioni, risultino ancor di più soggetti a fenomeni di scorrimento lungo i giunti di stratificazione. Ciò è dovuto alla coesione fra strato e strato, che risulta ancora più debole in un ambito così deformato e quindi comporta che gli angoli d'attrito interno dei livelli marnosi, materiali già di per sé scadenti, non possono essere più considerati come di picco, ma bensì decadono ai più bassi valori residui.

Considerata quindi la natura degli ammassi rocciosi in questione, data dall'alternanza di litotipi già a diverso comportamento geomeccanico, la cui variabilità aumenta ulteriormente reagendo diversamente alle deformazioni, le classificazioni del tipo RMR (Rock Mass Rating System - Bieniawski, 1989) non risultano adeguate per caratterizzare i fronti di queste scarpate rocciose. In particolare non è consigliabile usare tali classificazioni, che forniscono un unico valore per l'intero ammasso indagato, per derivare i parametri necessari alle analisi cinematiche delle porzioni potenzialmente instabili, che potrebbero essere notevolmente sovra o sotto-stimati da situazione a situazione.

In sintesi, per gli obiettivi di questo studio l'approccio geomeccanico più adatto risulta quello basato sulla caratterizzazione della variabilità del tasso di fratturazione attraverso la mappatura e l'analisi statistica di vari parametri, quali: spaziatura dei singoli sistemi di discontinuità, P21, Jv (Volumetric Joint Count) e VRU (Volume Roccioso Unitario).

IL P21 esprime l'intensità di fratturazione di un ammasso roccioso e corrisponde alla sommatoria delle lunghezze delle tracce delle discontinuità per unità di area del piano delle tracce considerato (Golder Associates, 2008). Il Jv corrisponde invece al numero di giunti per metro cubo di roccia. Infine il VRU indica gli elementi discreti di materiale in cui un ammasso roccioso è suddiviso dalle discontinuità presenti. Se sono presenti più di tre principali sistemi di discontinuità, come in questo caso, è consigliabile calcolare il VRU tramite la relazione che lega le dimensioni del blocco roccioso all'indice Jv, ovvero al numero di giunti per metro cubo di roccia.

In merito alla metodologia utilizzata ed i dati acquisiti sugli ammassi secondo il P21, Jv e VRU si rimanda al dettagliato studio realizzato dalla IMAGEO s.r.l. che costituisce parte integrante e sostanziale del presente elaborato.

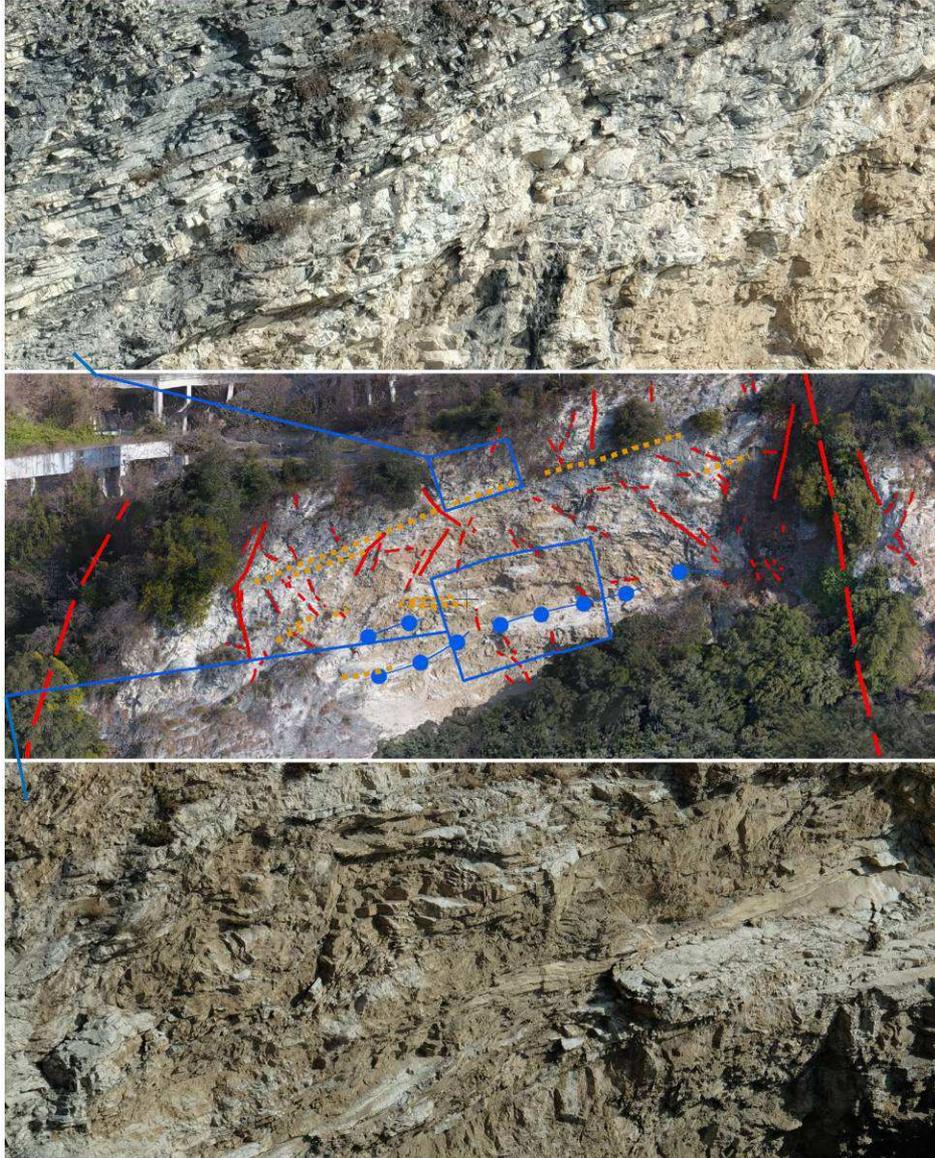


Figura 26 – Al centro panoramica della parete 1A con evidenziati alcuni delle principali e più persistenti discontinuità strutturali. In alto ed in basso alcuni dettagli fotografici che evidenziano l'elevata deformazione a cui è stato soggetto questo settore di parete in Maiolica. Questa elevata deformazione rende difficile seguire l'andamento della stratificazione ad eccezione delle porzioni superiori del dettaglio in alto.

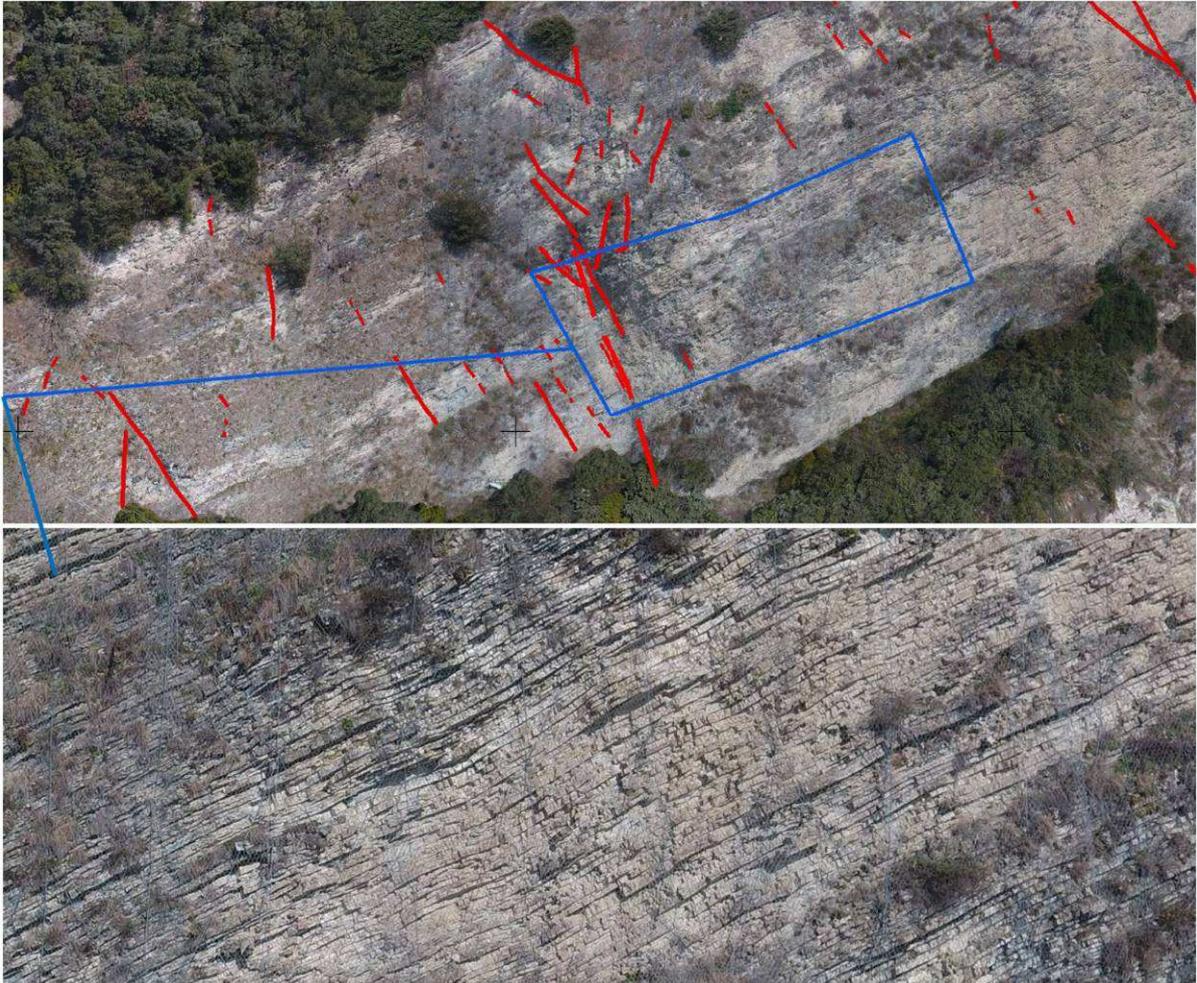


Figura 27 – In alto panoramica della parete 2A con evidenziati alcuni delle principali e più persistenti discontinuità strutturali, decisamente in minor numero rispetto ai lineamenti presenti negli altri settori d'indagine. In basso un dettaglio fotografico che evidenzia la minor entità della deformazione a cui è stato soggetto questo settore di parete. La deformazione subita è evidenziata dalla blanda ondulazione della stratificazione, che però si può seguire all'intera scala dell'affioramento.

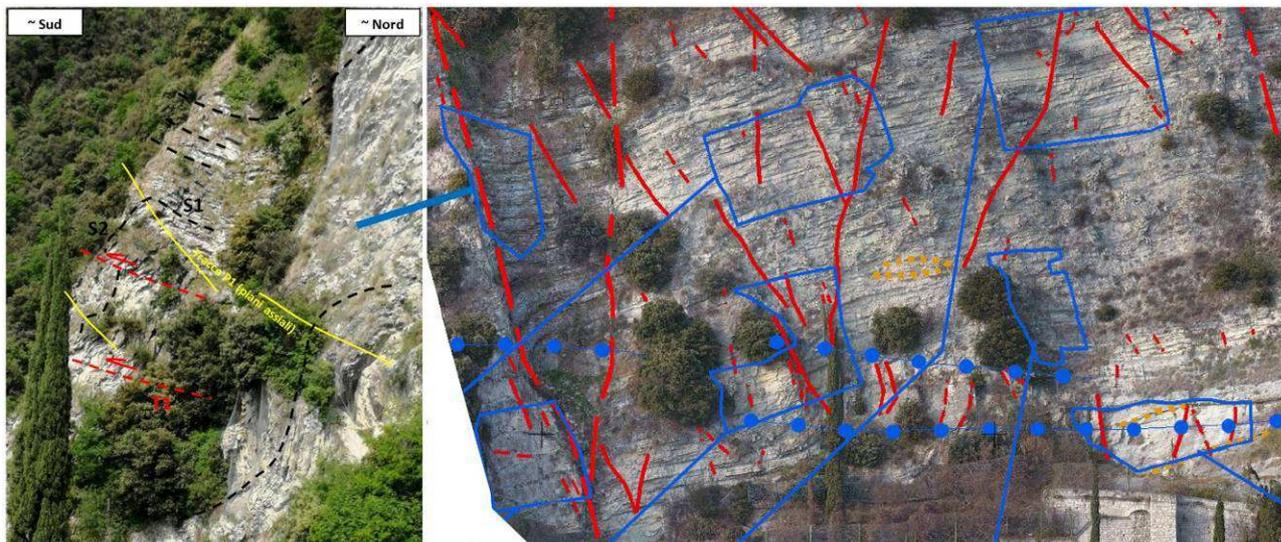


Figura 28 – A destra panoramica della parete 3A Nord con evidenziati alcuni delle principali e più persistenti discontinuità strutturali. A sinistra un dettaglio fotografico che evidenzia l'elevata deformazione a cui è stato soggetto questo settore di parete.

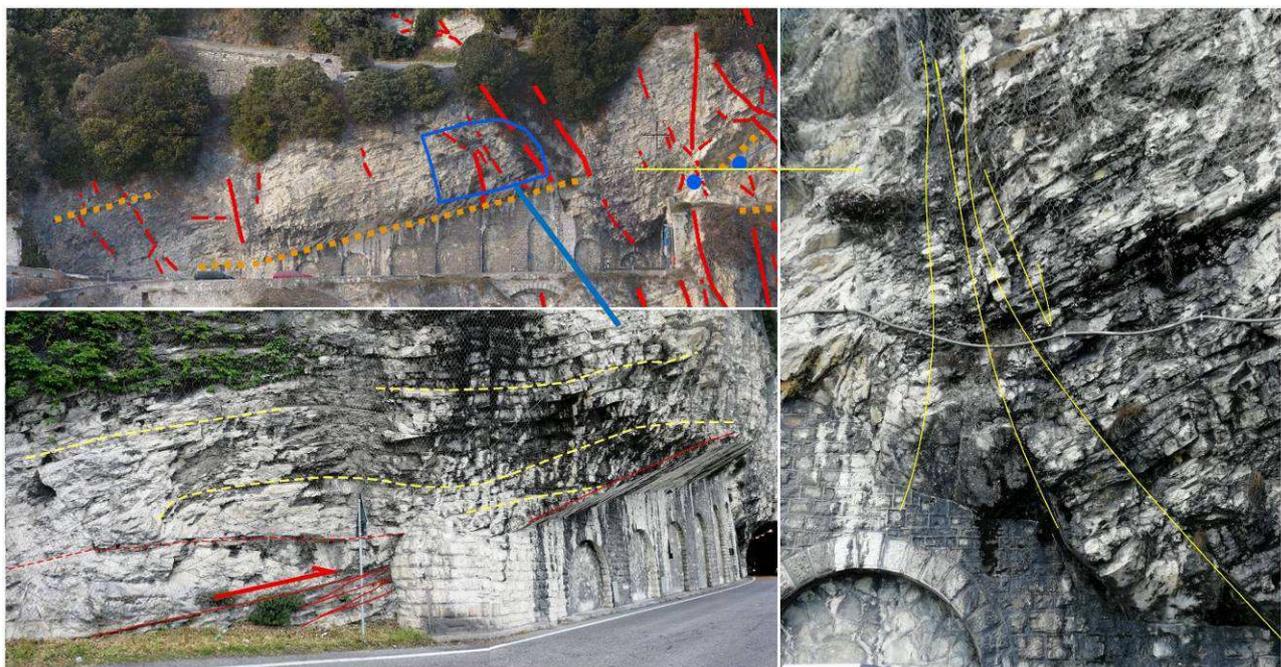


Figura 29 – In alto a destra panoramica della parete 3A Sud con evidenziati alcuni delle principali e più persistenti discontinuità strutturali. In basso ed a destra alcuni dettagli fotografici che evidenziano rispettivamente come in questo settore di parete siano evidenti i piani di sovrascorrimento e zone cataclastiche createsi ad opera di faglie verticali a medio-alto angolo NE immergenti (curvilinearari).



Figura 30 – Al centro panoramica della parete 4A con evidenziati alcuni delle principali e più persistenti discontinuità strutturali. In alto ed in basso alcuni dettagli fotografici che evidenziano l'elevata deformazione a cui è stato soggetto questo settore di parete. Nel dettaglio in basso risaltano una serie di pieghe.



Figura 31 – Porzione settentrionale della parete 1A con evidenziata fra le due linee rosse tratteggiate un settore interessato da stillicidio di acqua che altera il colore superficiale della roccia rendendola color ruggine.



Figura 32 – Confronto due dettagli in cui i livelli marnosi del Medolo sono regolarmente "scagliettati" parallelamente (foto in alto) ed intensamente destrutturati ed ad andamento irregolarmente "uncinato" (in basso).

Il parametro P21 è stato calcolato su gran parte degli affioramenti rocciosi ripresi dalle scansioni laser (Figura 33 e Figura 34). La successiva mappatura del P21 è servita principalmente in fase preliminare ad individuare i settori maggiormente disarticolati. Si ritiene che questi settori costituiscano le principali sorgenti di potenziali fenomeni di instabilità.

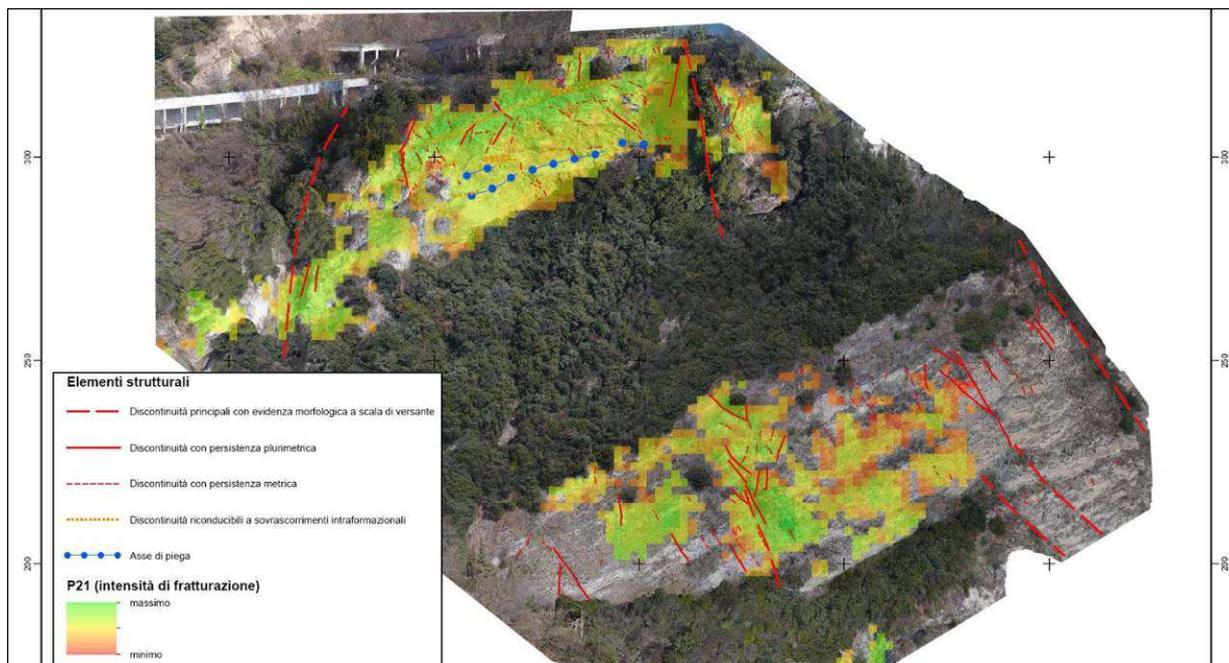


Figura 33 – Mappatura delle variazioni del parametro P21 su vista ortometrica verticale del settore d'indagine delle pareti 1A e 2A.

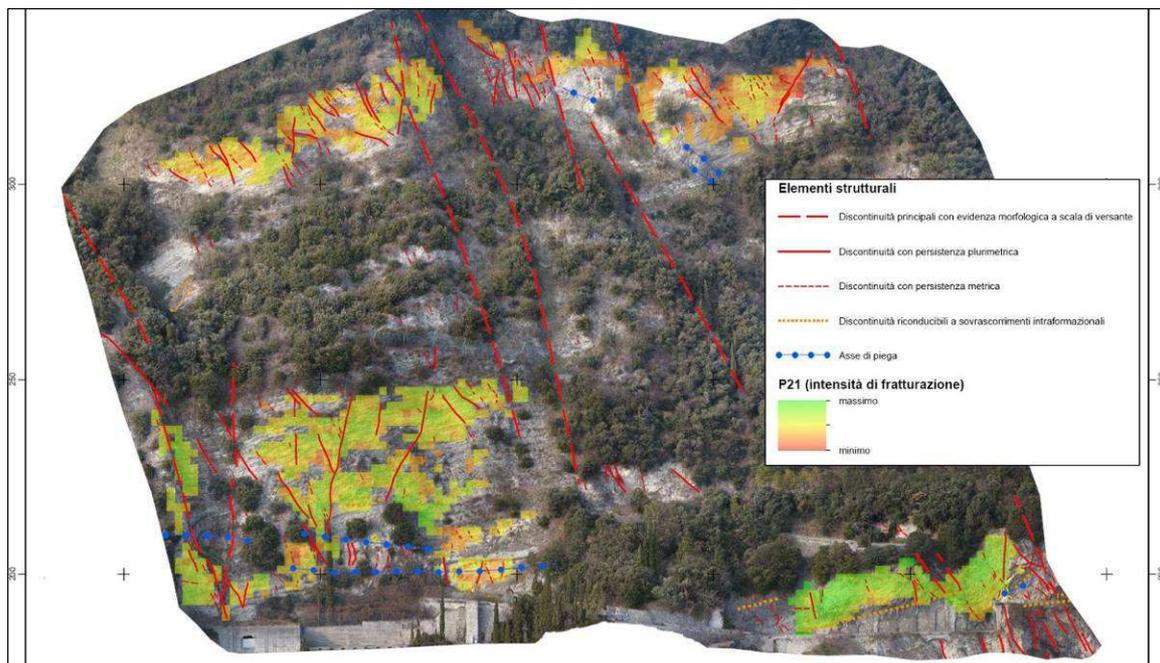


Figura 34 – Mappatura delle variazioni del parametro P21 su vista ortometrica verticale del settore d'indagine delle pareti 3A e 4A.

Successivamente sono quindi state eseguite delle analisi geomeccaniche di dettaglio sfruttando l'elevata risoluzione dei dati laser scanner; allo scopo sono state selezionate

porzioni di parete non vegetate e senza "zone d'ombra" all'interno delle rispettive nuvole di punti. Le fasi di filtraggio sono anche servite a eliminare le reti che spesso risultano in aderenza alle pareti. Quindi sulle porzioni di parete utilizzate per il campionamento dei piani di discontinuità sono state stimate le variazioni della spaziatura dei Set individuati, del J_v e quindi del VRU, col medesimo approccio già utilizzato per la mappatura del P21 alla scala dell'intera parete.

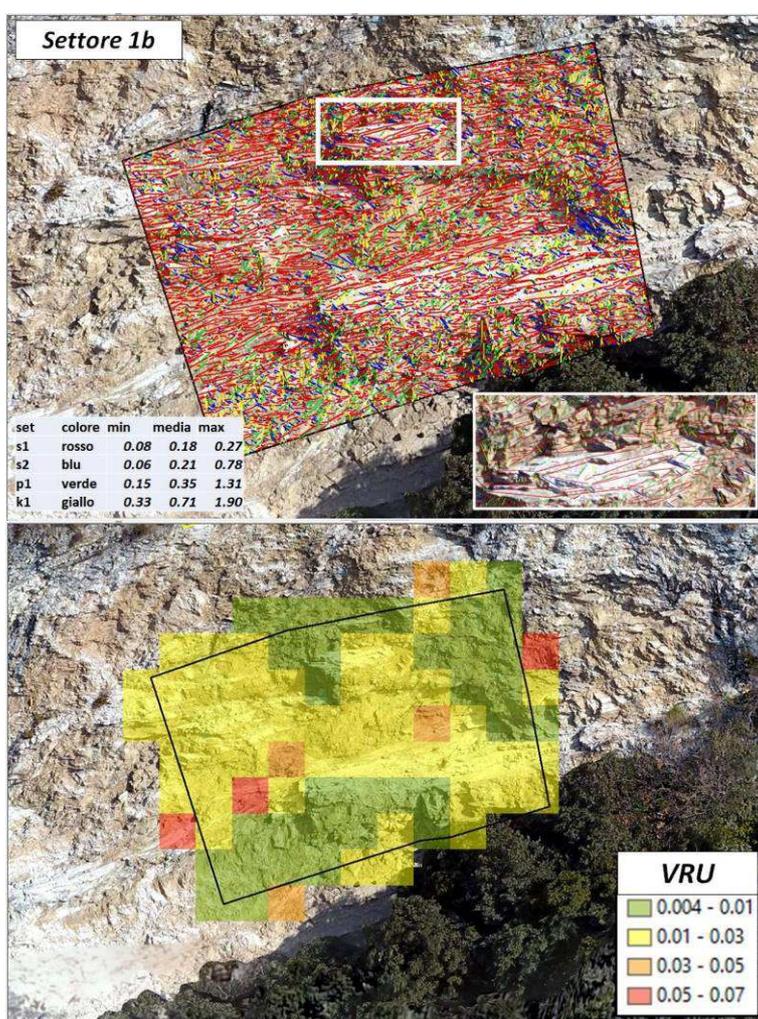


Figura 35 – Vista su vista ortometrica verticale del settore di parete 1A. In alto la classificazione delle tracce di discontinuità ed una tabella di sintesi della statistica delle varie spaziature. In basso la mappatura del VRU derivato dall'approccio della "finestra circolare". In questo caso le elaborazioni geomeccaniche con il metodo iterativo di campionamento delle tracce precedentemente anticipato, hanno permesso di calcolare i valori di spaziatura J_v da cui derivare il VRU su quasi 70 "finestre di osservazione circolari" del diametro di circa tre metri.

Riguardo la spaziatura delle discontinuità connesse alla stratificazione, identificata dal Set 1, sono stati stimati valori minimi e massimi di circa 8 cm e 27 cm, con un dato medio di circa 18 cm. Si evidenzia in questo frangente, che dalle nuvole di punti laser non è possibile identificare le tracce delle discontinuità "chiuse", che intersecano la parete e che non mostrano parte della loro superficie. Questo è quanto accade spesso nel caso della stratificazione. Dove la stratificazione risulta particolarmente "serrata", senza intersecare altre discontinuità in modo da creare "tetti", anche poco aggettanti, la sua spaziatura viene generalmente sovrastimata, soprattutto nella determinazione statistica dei suoi valori minimi.

Dai dati di spaziatura dei diversi Set è stata calcolata la variazione dell'indice J_v all'interno dei 14 settori selezionati per le analisi di approfondimento geomeccanico (4 nell'area delle pareti 1A e 2A, e 12 nelle pareti 3A e 4A). In base all'indice J_v le pareti caratterizzate dai blocchi di taglia minore appartengono alle pareti 1A e 3A Sud, variando rispettivamente fra 13 e 25 nel primo caso e 13 e 22 nel secondo, intervalli di valori che corrispondono secondo l'ISRM (1978) a un "blocchi di dimensioni piccole" (Figura 36). Anche i valori medi dei J_v di tutti i settori di approfondimento delle altre pareti (2A, 3A Nord e 4A) ricadono sempre in questa classe. Solo in poche aree delle Pareti 2A, 3A e 4A sono stati calcolati valori di J_v minori, ma comunque mai inferiori a 4.5. Tali valori ricadono invece nella classe che secondo l'ISRM corrisponde a "blocchi di dimensioni medie" (Figura 36).

| DESCRIZIONE | J_v (giunti m ²) |
|---------------------|--------------------------------|
| Very large blocks | < 1,0 |
| Large blocks | 1 - 3 |
| Medium-sized blocks | 3 - 10 |
| Small blocks | 10 - 30 |
| Very small blocks | > 30 |

Figura 36 – Termini descrittivi della dimensione media dei blocchi che caratterizzano un ammasso roccioso in base all'indice J_v corrispondente (ISRM, 1978).

Dall'indice J_v è stato ricavato il valore del VRU secondo le procedure proposte da Palmstrom (2005). Il VRU varia complessivamente da circa 0.004 m^3 ad un massimo di poco oltre i 0.6 m^3 , nella Parete 3A Sud. I valori medi di VRU più elevati si registrano, coerentemente con l'analisi del J_v , nella Parete 2A (circa 0.04 m^3) e nelle Pareti 3A Sud e 4A (circa 0.05 m^3).

In Figura 37 si può osservare uno dei blocchi più voluminosi individuati alla base della Parete 2A dai rilievi effettuati con drone. Il blocco è lastriforme e corrisponde ad una porzione di strato calcareo compatto. Il suo spessore non è facilmente misurabile, ma ipotizzando un suo spessore attorno ai 15 cm, il suo volume complessivo dovrebbe essere inferiore ai 0.05 m^3 , coerentemente con quanto desunto dalle elaborazioni di mappatura del VRU condotte sulla Parete 2. Anche nelle immagini di Figura 38 e Figura 39, si può constatare che gli accumuli detritici crollati sulla strada alla base della Parete 3A, sono generalmente costituiti da blocchi di dimensioni che variano da centimetriche a decimetriche, salvo qualche raro elemento compatto che supera i 0.3 m^3 .



Figura 37 – Esempio di blocco crollato alla base della Parete 2A. Natura calcarea, forma lastriforme ed aspetto compatto. Volume stimato in circa 0.05 m^3 .

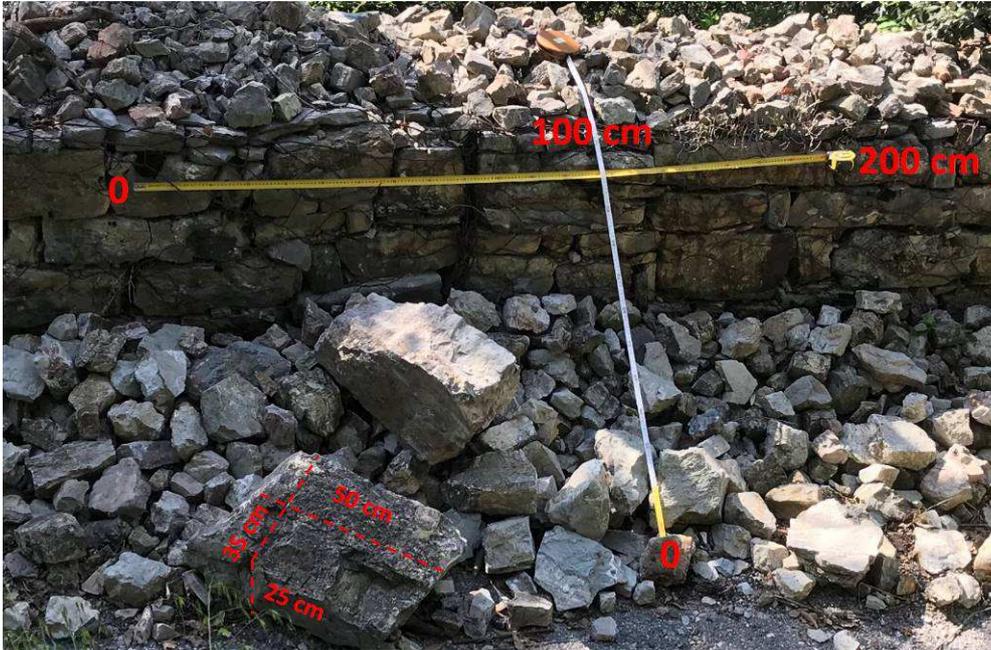


Figura 38 – Esempio di accumuli di blocchi depositatisi sulla strada chiusa che attraversa la Parete 3A Sud. Generalmente hanno dimensioni da centimetriche a decimetriche con un paio di blocchi più grandi con volumi attorno ai 0.04 m^3 .

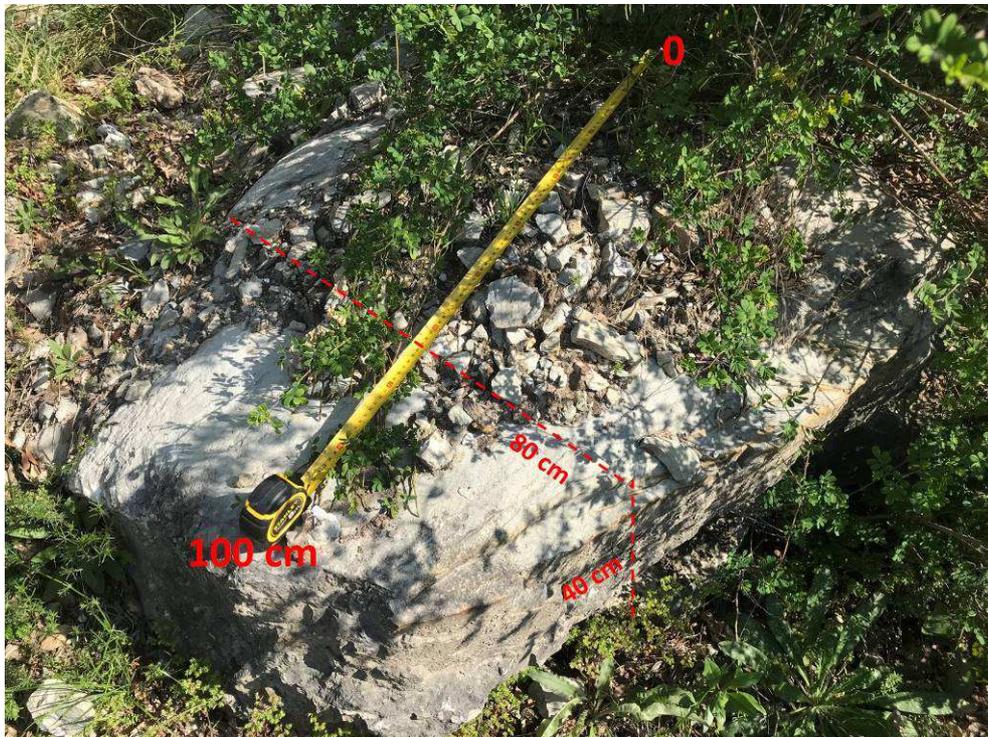


Figura 39 – Esempio di blocco crollato sulla strada chiusa che attraversa la Parete 3A Sud. Volume stimato in circa 0.3 m^3 .

4.4 Caratterizzazione dei set di discontinuità favorevoli allo sviluppo di instabilità

Nonostante una certa variabilità dei vari piani di discontinuità individuati nelle 4 Pareti oggetto d'indagine, l'andamento dei Set principali è comunque riconducibile ad un assetto strutturale comune.

Mediamente, tutte le pareti rocciose indagate immergono tra SSE e EEW, con inclinazioni comprese tra i 70° ed i 90°, a tratti strapiombanti. Gli affioramenti rocciosi considerati sono talmente acclivi che quasi sempre sussistono condizioni geometriche tra i vari piani di discontinuità favorevoli ad un qualche cinematismo.

Sono infatti possibili sia fenomeni di ribaltamento ad opera dei Set ascrivibili a P1 (discontinuità legate al "fracture cleavage"), che ai piani più inclinati localmente di T1 (discontinuità riconducibili ai sovrascorrimenti) ed S1 (fianchi lunghi della stratificazione). Fenomeni di scivolamento planare sono invece frequenti ad opera di S2 (fianchi corti della stratificazione nelle pieghe asimmetriche), oppure localmente quando i piani di "fracture cleavage" si verticalizzano immergendo verso Sud.

È altresì possibile lo sviluppo di scivolamento di cunei, quando si intersecano i piani di S2 con le discontinuità K1 e K2, oppure con i lineamenti più persistenti T1, legati a faglie di tipo estensionale.

Tramite i rilievi eseguiti sono state individuate, specialmente sulla Parete 3A Nord, alcune zone di distacco che sembra abbiano generato crolli di diverse decine di metri cubi di materiale disarticolato ma durante lo stesso fenomeno. I crolli che hanno generato sono relativamente freschi; ciò è desumibile dalla colorazione nettamente diversa della roccia, dall'assenza di vegetazione arbustiva che, invece, affligge tutte le porzioni di parete al

contorno e dalla presenza di abbondanti accumuli detritici "incastrati" nelle reti poco a decine di metri a valle delle sopra citate ed ipotetiche nicchie.

Dall'analisi di questi distacchi, si è notato che avvengono principalmente attraverso le discontinuità più persistenti appartenenti a 3 principali insiemi a seconda della loro orientazione:

1. stratificazione (S1), probabilmente nelle fasce dove questa è "tagliata" dai sovrascorrimenti intraformazionali a basso angolo (T1);
2. fianchi corti delle pieghe asimmetriche (S2) e/o lungo i piani più verticali di "fracture cleavage" (P1), che nell'insieme generano superfici che hanno giacitura media coincidente a quelle delle pareti in oggetto;
3. discontinuità talora ad andamento listrico (k1) o meno (k2), talvolta associate invece a faglie estensionali (F1), che nell'insieme tagliano più o meno verticalmente la parete, ortogonalmente alla stratificazione.

Grazie ad elaborazioni specifiche effettuate sui modelli 3D derivati dai rilievi laser scanner e 2D sulle ortofoto derivate dai rilievi da drone, è stato possibile campionare le spazature dei lineamenti a persistenza da metrica a decametrica che suddividono le pareti rocciose (Figura 40 e Figura 41). L'analisi statistica di questi dati ha permesso di stimare i volumi potenzialmente coinvolti da crolli in massa delle porzioni maggiormente disarticolate, come quelli già avvenuti ed individuati in (cfr. Tavv 5 e 6 dello studio IMAGEO).

In Tabella 3 è possibile osservare che i valori massimi statisticamente stimati coincidono come ordine di grandezza con quelli valutati tramite back analysis dei crolli avvenuti sulla Parete 3A Sud. In particolare nel settore di approfondimento denominato "W", per cui si è stimato un crollo in massa compreso tra i 15 ed 35 m³.

| statistica | SET | | | VOL. |
|------------|-------|-------|------------|------|
| | S1/T1 | S2/P1 | K1/K2 (F1) | |
| min | 0.2 | 0.3 | 0.6 | 0.0 |
| media | 0.5 | 1.8 | 1.4 | 1.3 |
| max | 1.8 | 4.4 | 3.8 | 30.1 |

Tabella 3 – Sintesi dell'analisi statistica dei dati che ha permesso di stimare i volumi potenzialmente coinvolti da crolli in massa delle porzioni maggiormente disarticolate nella Parete 2A.

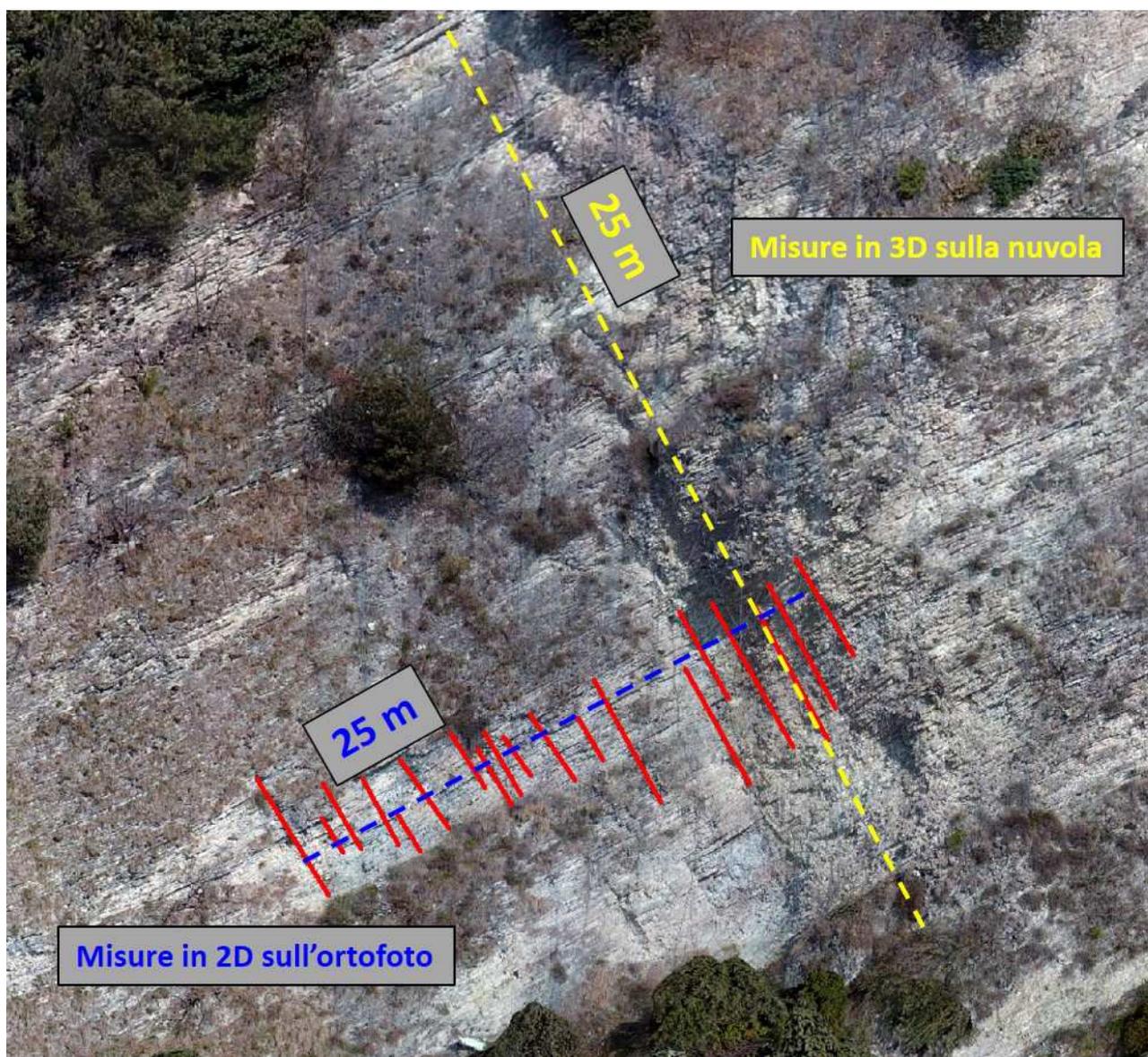


Figura 40 – Grazie ad elaborazioni specifiche effettuate sui modelli 3D derivati dai rilievi laser e 2D derivati dalle ortofoto dei rilievi da drone, è stato possibile campionare le spazature delle discontinuità a persistenza da metrica a decametrica che in questo caso suddividono la Parete 2A. Sull'ortofoto sono evidenziati in rosso i piani discontinuità k1 e/o k2 (talvolta F1), che nell'insieme tagliano più o meno verticalmente la parete, ortogonalmente alla stratificazione.

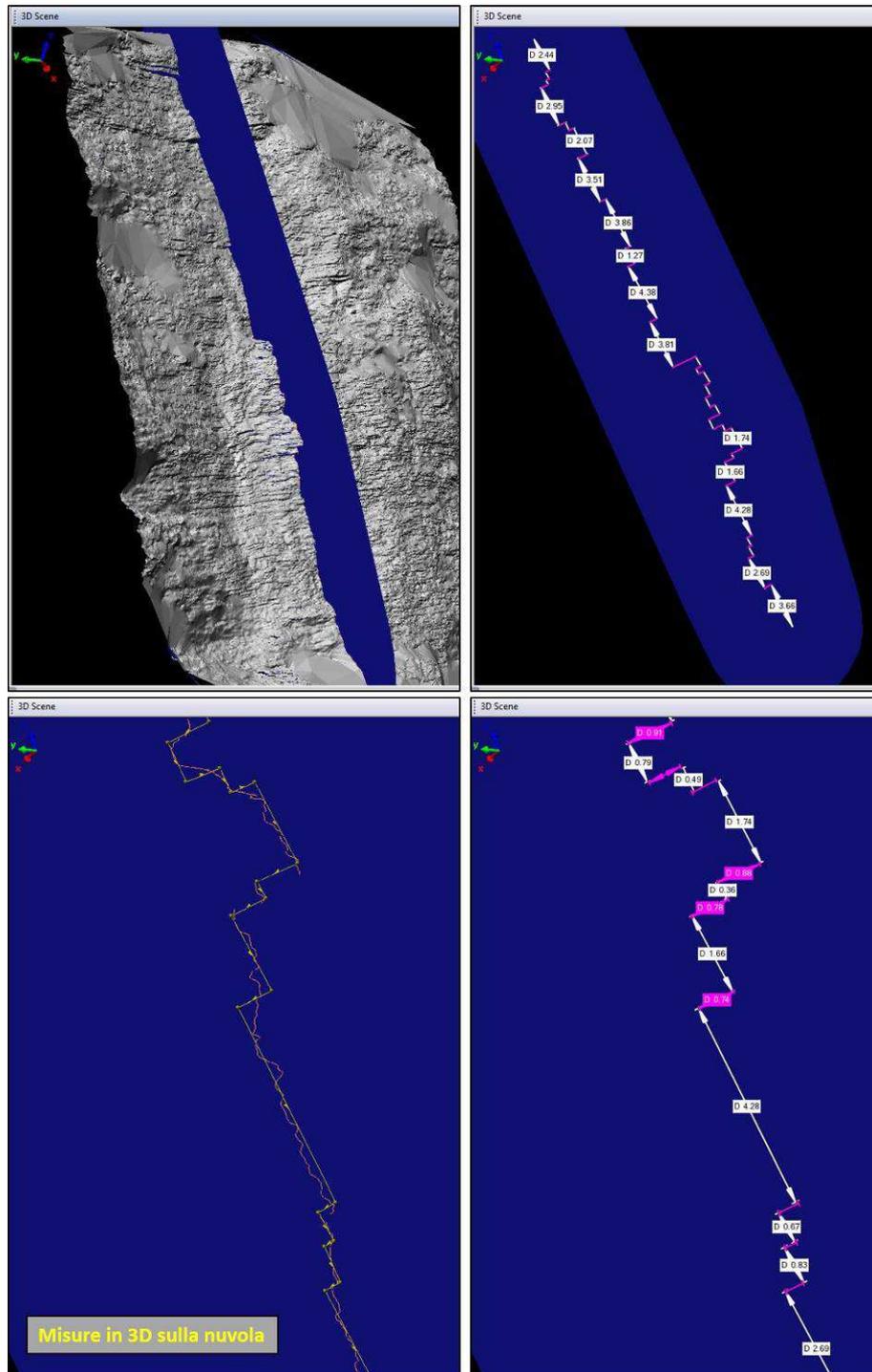


Figura 41 – Grazie ad elaborazioni specifiche effettuate sui modelli 3D derivati dai rilievi laser, è stato possibile campionare le spaziature delle discontinuità a persistenza da metrica a decametrica che in questo caso suddividono la Parete 2A. I piani S2 e/o P1 sono quelli paralleli al profilo, ovvero inclinati verso destra ad alto angolo verso il basso, mentre i piani di stratificazione S1 e/o T1, sono ortogonali ai precedenti ed immergono in basso a sinistra.

4.5 Rilievo geomeccanico su tre punti in affioramento

In aggiunta allo studio appena descritto è stato realizzato per il sito di interesse un rilievo geomeccanico di tipo areale eseguito su n. 3 affioramenti secondo la normativa ISRM 1978, al fine di descrivere le proprietà meccaniche dell'ammasso quali le caratteristiche della roccia intatta e le caratteristiche delle discontinuità. Per il rilievo geomeccanico areale sono state caratterizzate tutte le discontinuità in una finestra rettangolare di dimensioni pari a 1,5 X 1,5 m.

Si riportano di seguito una sintesi dei risultati per ogni affioramento analizzato, mentre si rimanda direttamente al rapporto redatto dalla Soc. Akron s.r.l. per le misurazioni effettuate in situ.

Il rilievo geomeccanico n. 1 è stato eseguito in prossimità della Galleria dei Ciclopi, ad una distanza di 140 m dall'imbocco sud (Figura 42).



Figura 42 – Rilievo geomeccanico n. 1.

Si riassumono nella tabella seguente i risultati ottenuti:

| | | |
|-------------------------------|-------|------------------|
| $J_v = 1/s_1 + \dots + 1/s_n$ | 8.57 | Palmstrom (1982) |
| VRU ($1/J_v$) | 11.70 | Palmstrom (1982) |
| RQD = $115 - 3.3 * J_v$ | 86.7 | Palmstrom (1982) |

Il rilievo geomeccanico n.2 è stato eseguito in prossimità dell'imbocco nord della Galleria dei Ciclopi (Figura 43).



Figura 43 – Rilievo geomeccanico n. 2.

Si riassumono nella tabella seguente i risultati ottenuti:

| | | |
|-------------------------------|-------|------------------|
| $J_v = 1/s_1 + \dots + 1/s_n$ | 8.57 | Palmstrom (1982) |
| VRU (1/ J_v) | 11.70 | |
| RQD = 115-3.3* J_v | 86.7 | |

Il rilievo geomeccanico n. 3 è stato eseguito in prossimità della prima nicchia della Galleria d'Acli (Figura 44).



Figura 44 – Rilievo geomeccanico n. 3.

Si riassumono nella tabella seguente i risultati ottenuti:

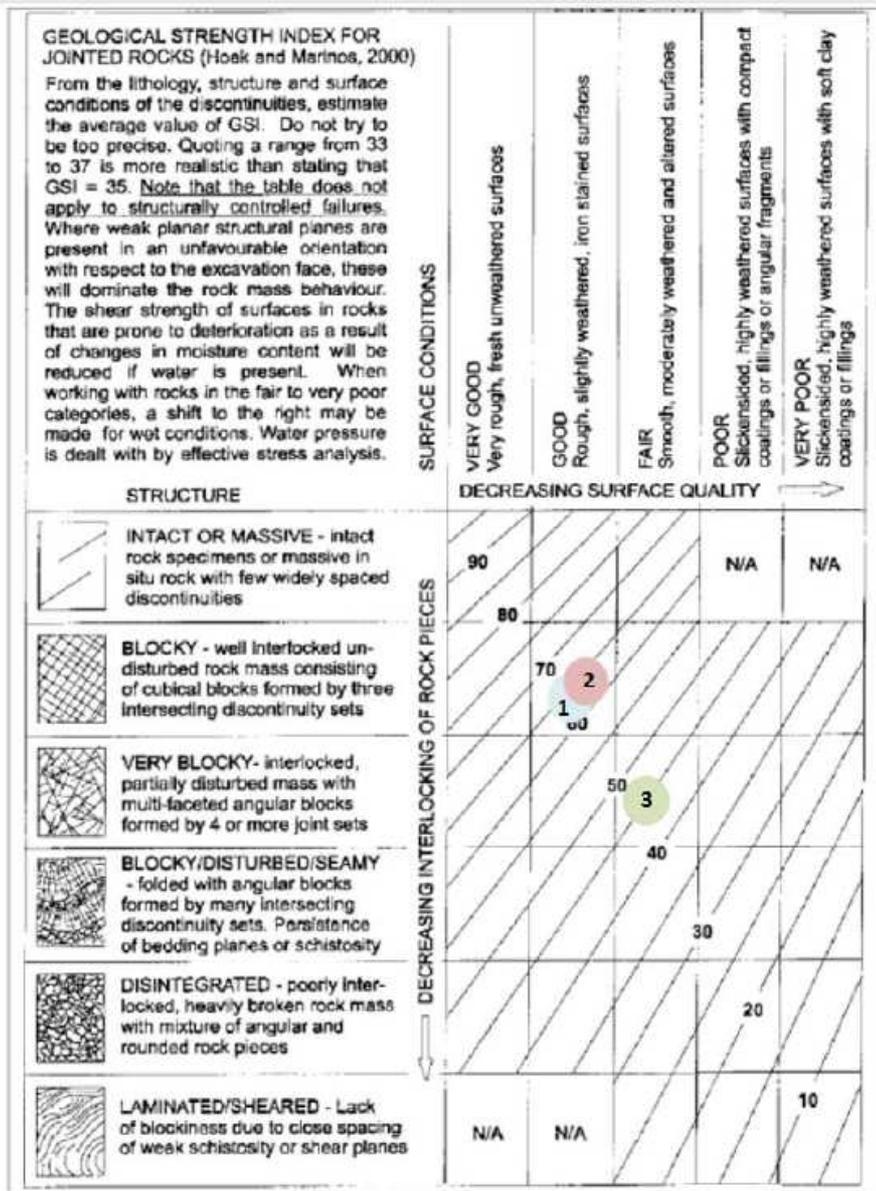
| | | |
|-------------------------------|-------|------------------|
| $J_v = 1/s_1 + \dots + 1/s_n$ | 24.77 | Palmstrom (1982) |
| VRU (1/ J_v) | 4.032 | Palmstrom (1982) |
| RQD = 115-3.3* J_v | 33.3 | Palmstrom (1982) |

I valori di J_v sono in linea con quelli ottenuti dallo studio eseguito da IMAGEO s.r.l. per le stesse litologie.

Infine per quanto attiene la definizione dell'indice GSI, è stata utilizzata la tabella di correlazione corretta da Marinos e Hoek nel 2000 in cui i parametri considerati sono la struttura in termini di blocchi e fratture dell'ammasso (n° di set, interconnessione, persistenza e pervasività delle discontinuità, forma blocchi, elementi strutturali) e la condizione delle superfici delle discontinuità (alterazione, rugosità, riempimento, etc.).

Con il metodo GSI è stata valutata la qualità di differenti ammassi rocciosi oggetto di rilievo geomeccanico. Sul grafico sono stati riportati i valori di stima di GSI per ogni affioramento.

Progetto Definitivo



I valori di GSI danno indicazione di un ammasso roccioso buono, con valori di GSI superiori a 25.

5 Bibliografia

- Bieniawski Z. (1989). "Engineering rock mass classification", J. Wiley & Sons.
- Bruschi A. (2004). "Meccanica delle Rocce". Flaccovio Editore.
- Castellarin & Ferrari (1972) "Evoluzione paleotettonica sinsedimentaria del limite tra" piattaforma veneta" e" bacino lombardo" a nord di Riva del Garda".
- Cita M.B., Vercesi P.L. & Pasquini C. (2006) "L'anfiteatro morenico del lago di Garda e i suoi vigneti", Boll. Soc. Geol. It., Volume Speciale n. 6 (2006), 29-39.
- Franklin J.A., Dusseault M.B. (1989) Rock Engineering, McGraw Hill Inc., 600p.
- Golder Associates (2001). "FracMan Tour." PowerPoint slideshow, slide 20. Available from: <http://fracman.golde.com/Gallery/guidtour.asp>.
- ISRM, (1978) – Suggested Methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses. Int. Journ. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstracts, 15, 6, 319-368.
- Jaboyedoff, M., Philipposian F., Mamin, M., Marro, Ch. & Rouiller, J.-D., (1996). Distribution spatiale des discontinuités dans une falaise. Approche statistique et probabiliste, PNR 31, Hochschulverlag AG an der ETH Zürich.
- Jaeger JC, Cook NGW (1977) Fundamentals of rock mechanics, 2nd edn. Wiley, New York.
- Palmström A. and Singh R., (2001) – The deformation modulus of rock masses - comparisons between in situ tests and indirect estimates. Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 16, No. 3, pp. 115 – 131.
- Zhang, L., Einstein, H.H., 1998. Estimating the mean trace length of rock discontinuities. Rock Mechanics and Rock Engineering 31 (4), 217–235.