



Il Commissario Straordinario del Governo
per il recupero e la valorizzazione dell'ex carcere borbonico
dell'isola di Santo Stefano - Ventotene



Comune di Ventotene
REGIONE LAZIO

CONTRATTO ISTITUZIONALE DI SVILUPPO

RECUPERO E RIFUNZIONALIZZAZIONE EX CARCERE BORBONICO DELL'ISOLA DI SANTO STEFANO VENTOTENE

Intervento 3.a "Realizzazione/adequamento degli approdi all'Isola di Santo Stefano, Opere di mitigazione del rischio crolli sulla Falesia "



STAZIONE APPALTANTE



Agenzia nazionale per l'attrazione
degli investimenti e lo sviluppo d'impresa SpA

Funzione Servizi di Ingegneria

ATTIVITA' TECNICHE
Beni Culturali e Architettura
Arch. Rosa di NUZZO

INVITALIA S.p.a.: Soggetto Attuatore in ottemperanza agli artt. 3 e 8 del Contratto Istituzionale di Sviluppo
"Recupero e rifunionalizzazione ex carcere borbonico dell'isola di Santo Stefano Ventotene"

RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO: Dott. Ing. ENRICO FUSCO

COORDINAMENTO PROGETTAZIONE: Dott. Arch. Rosa di NUZZO

PROGETTAZIONE ARCHITETTONICA
Dott. Arch. Massimo BARAGLI

PROGETTAZIONE STRUTTURALE
Dott. Ing. Letterio SONNESSA

PROGETTAZIONE OPERE MARITTIME
Dott. Ing. Daniele BENOTTI

RELAZIONE GEOLOGICA
Dott. Geol. Vincenzo GUIDO

PROGETTAZIONE IMPIANTI
Dott. Ing. Pierluigi ROSATI
Dott. Ing. Osvaldo PITORRI

PROGETTAZIONE DELLA SICUREZZA
Dott. Ing. Nunzio LAURO

PROGETTAZIONE AMBIENTALE e PROCEDURE VIA-Vinca
Dott. Luca DI NARDO

COMPUTI E STIME
Geom. Luigino D'ANGELANTONIO

RELAZIONE ARCHEOLOGICA: ASPSP Servizi Archeologici snc, Dott.ssa Laura SANNA e Francesco TIBONI

GRUPPO DI LAVORO INTERNO

PROGETTAZIONE ARCHITETTONICA:
Dott. Ing. Francesco DE SIMONE
Dott. Arch. Ahmed ELGAZZAR
Dott. Arch. Lucia PACITTO

PROGETTAZIONE STRUTTURALE:
Dott. Ing. Mario D'AMATO
Dott. Ing. Francesco DI LAURO

PROGETTAZIONE OPERE MARITTIME:
Dott. Ing. Leonardo GUALCO

PROGETTAZIONE IMPIANTI:
Sig. Ennio REGNICOLI

RILIEVI E RESTITUZIONE GRAFICA:
Geom. Gennaro DI MARTINO
Dott. Ing. Francesco DE SIMONE
Dott. Arch. Ahmed ELGAZZAR

PROGETTAZIONE DELLA SICUREZZA
Dott. Arch. Ahmed ELGAZZAR

SUPPORTO TECNICO OPERATIVO

PROGETTAZIONE OPERE MARITTIME:
3TI Progetti Italia - Ingegneria Integrata SpA
Dott. Ing. Stefano Luca POSSATI

PROGETTAZIONE AMBIENTALE e PROCEDURE VIA-Vinca:
SETIN Servizi tecnici Infrastrutture s.r.l.
Dott. Alessandro PIAZZI

PROGETTAZIONE GEOTECNICA:
STUDIO TECNICO ASSOCIATO - SINTESI
Dott. Ing. Germano GUIDUCCI

PROGETTAZIONE IDRAULICA E MARITTIMA
DHI Srl
Dott. Ing. Luis Alberto CUSATI

INGEGNERIA NAVALE
Dott. Ing. Francesco PRINZIVALLI

CONSULENZA TECNICO-SCIENTIFICA
Prof. Ing. Paolo SAMMARCO

INDAGINI GEOGNOSTICHE :
Geodes Laboratori
Dott.ssa M. Gabriella BEVILACQUA

INDAGINI E RILEVAZIONI AMBIENTALI, ARCHEOLOGICHE E STRUMENTALI A MARE :
Enviroconsult srl - Dott. Ing. Roberto SAGGIOMO

INDAGINI SULLE STRUTTURE :
ICS Centro Sperimentale di Ingegneria Srl
Dott. Ing. Giuseppe MONTELLA

INDAGINI GEOMECCANICO :
Geoapp Srl
Dott. Paolo FARINA

PROGETTO DEFINITIVO

ELABORATO

Documenti generali

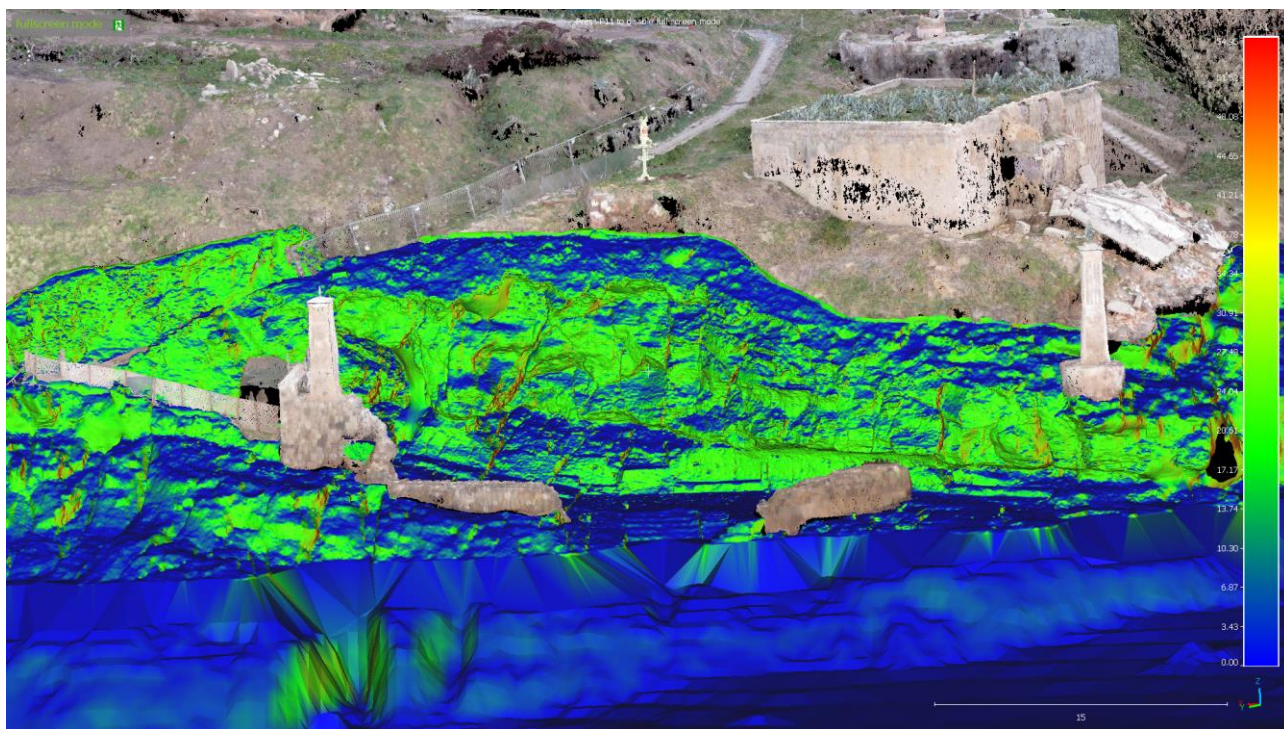
Rilievi geomeccanici integrativi da remoto

REVISIONE	DATA	AGGIORNAMENTI
Rev. 1	13-09-2021	Revisione in sede di procedura di VIA
Rev. 2	20-11-2023	Integrazione condizione ambientale n.6
Rev. 3		

	DATA	NOME	FIRMA
REDATTO	05/03/2021	GEAPP	
VERIFICATO	05/03/2021	GUIDO-SONNESSA	
APPROVATO	05/03/2021	Rosa di NUZZO	
DATA	05-03-2021	CODICE BREVE	
SCALA	----		
CODICE ELABORATO	2017E037INV-02-D-GE-IND002		
CODICE FILE	2017E037INV-02-D-GE-IND002.dwg		

GE-IND002

Rilievo geomeccanico da remoto dell'ammasso roccioso presso gli scali denominati "Marinella" e "Scalo n.4", mediante l'impiego di drone e laser scanner da terra e da mare, nell'ambito del "Contratto Istituzionale di Sviluppo - Recupero e rifunzionalizzazione ex Carcere Borbonico dell'isola di Santo Stefano Ventotene



RAPPORTO TECNICO

Alla cortese attenzione di

INVITALIA

Firenze, 17 aprile 2023

REVISIONE	AUTORE	REVISIONE		APPROVATO PER EMISSIONE		
		Nome	Firma	Nome	Firma	Data
	G. Ciabatti et al.	Paolo Farina	*on file	Paolo Farina	* on file	17/04/2023

Sommario

Sommario	2
GRUPPO DI LAVORO	3
1 Introduzione	4
2 Inquadramento geologico	6
3 Rilievi effettuati	13
3.1 Rilievi tradizionali geologici-geomeccanici-geomorfologici	13
3.2 Rilievo laser scanning	18
3.3 Rilievi fotogrammetrici da drone.....	23
4 Elaborazione dei dati.....	28
4.1 Elaborazione fotogrammetrica da drone	28
4.2 Rilievo geomeccanico tradizionale	30
4.2.1 Rilievo geostrutturale.....	30
4.2.2 Classificazione dell'ammasso: metodo di Bieniawski	41
4.3 Rilievo geomeccanico da remoto	48
4.4 Caratterizzazione ammasso roccioso	53
4.5 Analisi cinematica dei meccanismi di dissesto	57
4.5.1 Analisi cinematica Scalo 4	68
4.5.2 Analisi cinematica area Approdo Marinella	71
4.5.3 Analisi cinematica galleria approdo Marinella.....	75
4.6 Rilievi geomorfologici	79
5 Conclusioni	89
6 Bibliografia	92

GRUPPO DI LAVORO

Responsabile tecnico della commessa

Rilievi laser scanner e analisi cinematica

Rilievi laser scanner e analisi cinematica

Rilievi laser scanner e analisi cinematica

Rilievi geologici-geomorfologici-geomeccanici

Rilievi geologici-geomorfologici-geomeccanici

Rilievi drone

Rilievi drone

Dott. Geol. PAOLO FARINA

Dott. Geol. GIACOMO CIABATTI

Dott. Geol. LUCA LOMBARDI

Dott. Geol. MASSIMILIANO NOCENTINI

Dott. Geol. NICCOLO' DAINELLI

Dott. Geol. PIETRO ACCOLTI GIL

Dott. GUGLIELMO ROSSI

Dott. Geol. STEFANO TACCONI

1 Introduzione

Il presente documento rappresenta il rapporto tecnico relativo all'incarico per "Servizi di rilievo geomeccanico da remoto dell'ammasso roccioso, presso gli scali denominati "Marinella" e "Scalo n.4", mediante l'impiego di drone e laser scanner da terra e da mare, nell'ambito del "Contratto Istituzionale di Sviluppo - Recupero e rifunzionalizzazione ex Carcere Borbonico dell'isola di Santo Stefano Ventotene", ricevuto da Geoapp srl da parte di INVITALIA.

Le attività di campo sono state svolte nei giorni di 16-17 febbraio 2023 per quanto riguarda i rilievi laser scanner ed i rilievi geologici-geomorfologici, mentre in data 22 febbraio 2023 sono stati eseguiti i rilievi fotogrammetrici da drone.

L'obiettivo delle attività svolta è stato quello di acquisire un rilievo ad alta risoluzione delle aree oggetto delle indagini, per la creazione di un modello digitale del terreno di dettaglio dell'area e per l'integrazione del rilievo geomeccanico tradizionale, con informazioni estratte dalle nuvole di punti prodotte dal *laser scanner* e dai dati fotogrammetrici. Nella fattispecie, la tipologia dei fronti rocciosi oggetto di indagine e le connesse difficoltà di accesso agli stessi, a causa del mare hanno reso necessario l'impiego di tecnologie avanzate di rilevamento da remoto che, nel caso dei laser scanner terrestri e dei drone fotogrammetrici, possono raggiungere accurately millimetriche nella determinazione della posizione dei singoli punti, anche da centinaia di metri di distanza. L'elevata risoluzione spaziale (migliaia di punti al m²) e le notevoli prestazioni in acquisizione (superiori alle decine di migliaia di punti al secondo) hanno consentito di disporre, in tempi estremamente rapidi, di modelli 3D di dettaglio della scena investigata, in modo da poter apprezzare anche i minimi particolari.

L'analisi che è stata effettuata elaborando i dati acquisiti dal *laser scanner* e dai rilievi fotogrammetrici da drone è stata integrata effettuando degli stendimenti geomeccanici classici (utilizzando il metodo della *scanline survey*) in corrispondenza dei settori della scogliera accessibili da terra. I risultati delle analisi geomeccaniche così ottenute sono stati combinati con i risultati dell'analisi delle nuvole di punti acquisiti dai sistemi remoti.

Successivamente alla caratterizzazione geomeccanica della roccia intatta, dei sistemi di discontinuità e dell'ammasso i dati ottenuti sono stati utilizzati per effettuare un'analisi di stabilità cinematica 3D dell'ammasso roccioso. Questa tipologia di analisi applicata ai versanti, pur con le sue inevitabili semplificazioni, costituisce un efficace strumento per la comprensione del comportamento dell'ammasso roccioso consentendo una valutazione della propensione al dissesto per i diversi meccanismi di rottura plausibili nei settori dei versanti analizzati. Rispetto all'analisi cinematica tradizionale, normalmente risolta graficamente, è stata utilizzata un'analisi cinematica quantitativa definendo, per ogni meccanismo, un "indice di instabilità cinematica" che esprime la probabilità relativa di occorrenza di un determinato meccanismo di rottura in base alle condizioni strutturali e geomeccaniche dell'ammasso.

A partire dai rilievi fotogrammetrici da drone è stata anche effettuata un'interpretazione geomorfologica delle forme del rilievo nella zona a monte della falesia ubicata in corrispondenza dell'approdo Marinella e dello Scalo 4, finalizzata all'identificazione di potenziali fenomeni di instabilità nella parte del versante coperta da vegetazione. Tali valutazioni sono state integrate con le risultanze dei rilievi geomorfologici svolti a terra.

Il presente documento, dopo un inquadramento geologico iniziale, descrive i rilievi svolti, a partire da quelli geomeccanici-geomorfologici tradizionali fino a quelli con laser scanner terrestre e con fotogrammetria da drone, per poi illustrare le risultanze della classificazione e caratterizzazione dell'ammasso roccioso e dell'analisi cinematica per la valutazione della propensione al dissesto delle aree investigate e dei principali meccanismi di dissesto identificati.

2 Inquadramento geologico

Inquadramento generale

L'arcipelago pontino è ubicato al margine della piattaforma continentale italiana, circa 30Km a S del Golfo di Gaeta. La struttura della piattaforma è profondamente interessata dalla tettonica pliocenica del bacino Tirreno. Le fasi distensive principali, con allineamenti orientati E-W e NE-SW, ebbe inizio nel Pliocene inferiore ed ha interessato questa area fino al presente dando origine a due aree di sedimentazione principali: i bacini di Palmarola e di Ventotene.

L'arcipelago Pontino (Figura 1) è suddiviso in isole Pontine occidentali (Ponza, Palmarola, Zannone) e isole Pontine orientali (Ventotene e Santo Stefano).



Figura 1 - Ubicazione delle Isole Pontine (da Bellucci et Al., 1999).

Le isole occidentali sono collocate sull'alto strutturale della piattaforma continentale, in prossimità dell'orlo della scarpata continentale. Ponza e Palmarola consistono principalmente di prodotti vulcanici sottomarini mentre i prodotti vulcanici subaerei affiorano esclusivamente nella parte meridionale di Ponza. Il substrato prevulcanico, esposto soprattutto a Zannone, è rappresentato da scaglie di unità Mesozoiche con motivo strutturale simile a quello appenninico.

Secondo i dati paleontologici e strutturali, il vulcanismo nelle Pontine occidentali ebbe inizio nel Pleistocene inferiore e terminò 0,93 milioni di anni fa. La fine del vulcanismo nelle Pontine Occidentali è correlato petrograficamente e cronologicamente all'inizio del vulcanismo nelle Pontine orientali.

Le isole Pontine orientali sono localizzate al margine della piattaforma continentale e rappresentano la sommità di un grande strato-vulcano sottomarino che si ergeva circa 700m dal fondale marino con un diametro di base di circa 15-20 km; la giacitura dei prodotti vulcanici, immergenti verso NE nell'isola di Ventotene, e la morfologia del fondo marino hanno permesso di localizzare il centro

eruttivo principale ad Ovest dell'isola stessa. L'età dei prodotti vulcanici affioranti varia da 0,92 a 0,33 milioni di anni.

Situazione locale

L'isola di Santo Stefano, posizionata 1,4km ad Est di Ventotene, è di forma pressochè circolare, ha una superficie di circa 29 ettari e si eleva fino a 84m sul livello del mare. Pur essendo separata da essa, Santo Stefano fa parte dell'ampio edificio vulcanico di Ventotene e, conseguentemente, le unità affioranti hanno la stessa sequenza cronologica di quelle di Ventotene (Figura 2).

Santo Stefano è caratterizzata dalla presenza di due Sintemi ed un Litosoma:

Sintemi:

Santo Stefano 1: questo sintema include la cupola lavica di Santo Stefano e l'attività effusiva basale del vulcano di Ventotene. Il suo limite inferiore si trova sotto il livello del mare ed il suo limite superiore è rappresentato da uno spesso paleosuolo che confina con i Sintemi Santo Stefano 2 e Ventotene 1.

Santo Stefano 2: il sintema identifica i termini dell'unità Villa Giulia i cui affioramenti si trovano soprattutto sull'isola di Santo Stefano e, in minor misura, su Ventotene. Localmente il limite inferiore è un paleosuolo ed il limite superiore è rappresentato dalla superficie topografica.

Litosoma

Santo Stefano. E' una cupola lavica ben conservata; la lava mostra un tipo di deposizione radiale a testimonianza della presenza di un camino laterale.

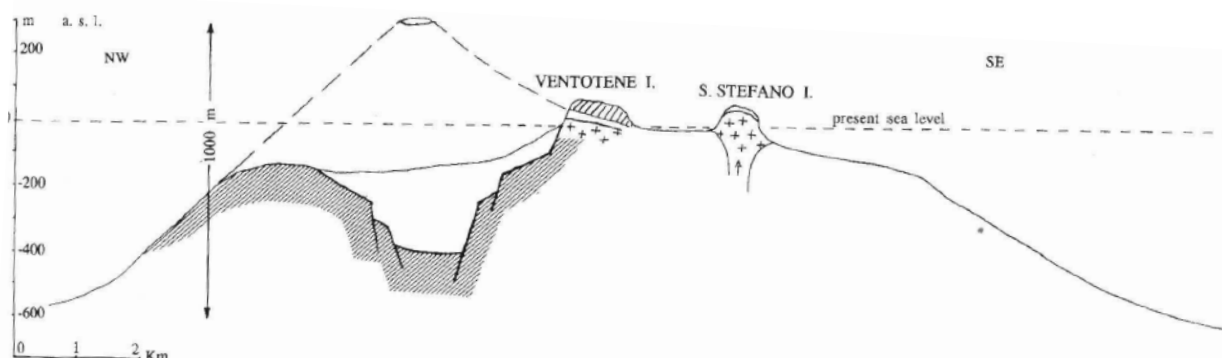


Figura 2 - Schema dello strato-vulcano di Ventotene con il camino laterale rappresentato dall'Isola di Santo Stefano (da Bergomi et Al., 1969).

Unità Litostratigrafiche

L'isola di Santo Stefano è caratterizzata dalla presenza di tre unità litostratigrafiche: la Formazione di Santo Stefano (suddivisa in due membri), l'Unità di Villa Giulia ed i depositi eolici.

Formazione di Santo Stefano (**SS**). Questa unità costituisce la base dell'edificio vulcanico dell'Isola di Santo Stefano e consiste di due membri (Figura 3):

- il membro SS1 è caratterizzato da un appilamento di flussi di lava con un sistema di giunti colonnari e stratificazione a rampa che passa verso l'alto a lava a schiuma (foam lava) seguita in genere da strati di scorie saldati e collassati
- il membro SS2 consiste in depositi piroclastici massivi con depositi pomicei grossolani saldati a gradazione inversa passanti verso l'alto a frammenti di pomice in matrice cineritica rossastra; nell'area SE dell'isola questo membro è coperto da uno strato di scorie nere. Questa sequenza può essere interpretata come dovuta alla messa in posto di una cupola di lava viscosa attraverso una frattura con andamento NW-SE che è successivamente collassata formando strati di scoria saldati e depositi piroclastici

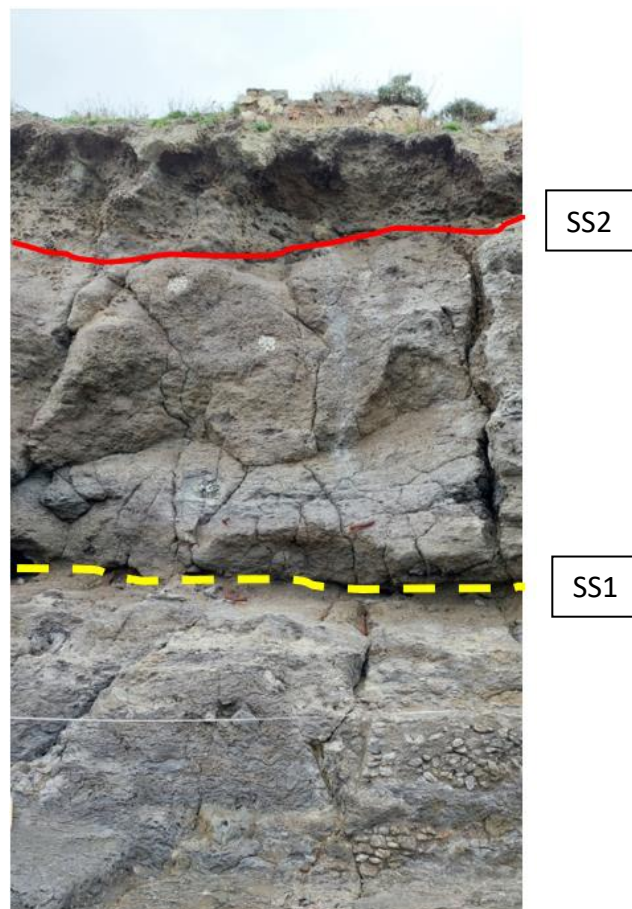


Figura 3 - Unità Santo Stefano. Ben distinguibili i membri SS1 e SS2. Il membro SS1 è interessato da una discontinuità dovuta con molta probabilità a due colate separate da un modesto episodio piroclastico (tratteggio giallo).

Unità Villa Giulia (**VG**). Questa unità affiora in modo estensivo nella parte alta dell'isola, dove avvolge la morfologia sottostante con una giacitura radiale. Consiste di depositi piroclastici da trachitici a fonolitici, caratterizzati da alternanze di letti da caduta di pomice bianca, paleosuoli e letti di ceneri stratificati (Figura 4).

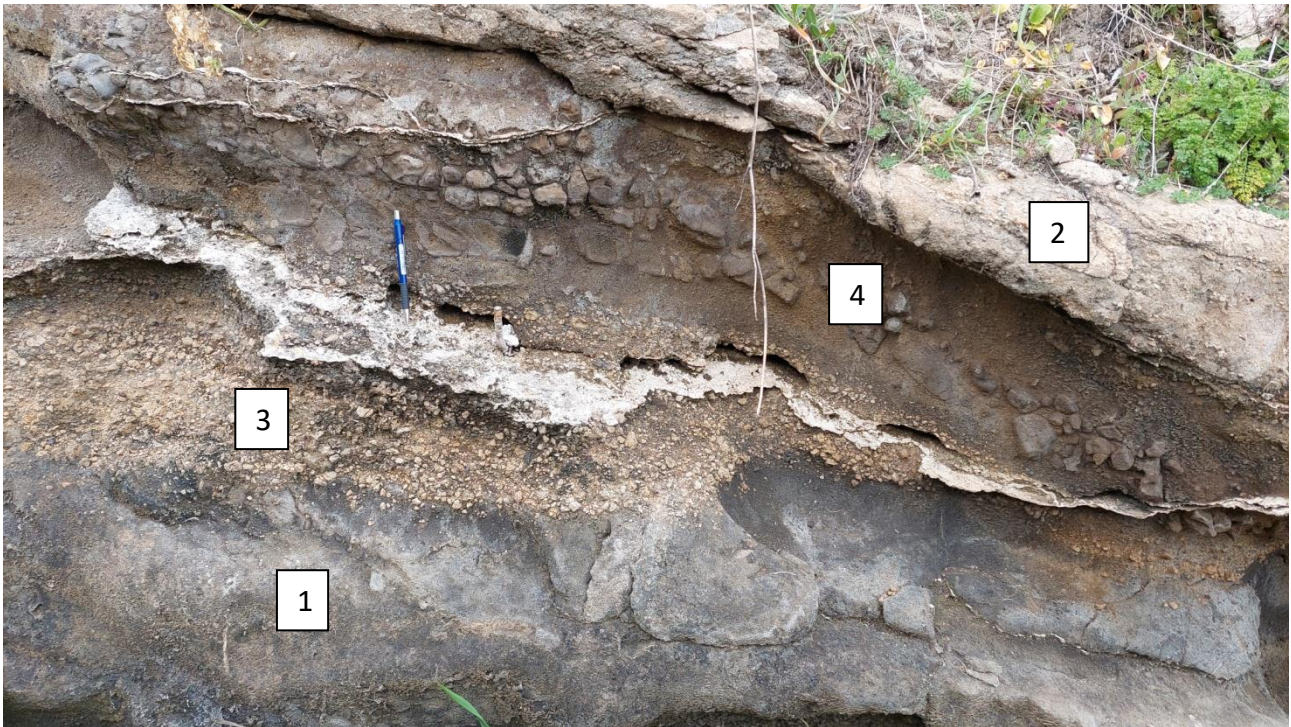


Figura 4 - Formazione Villa Giulia. Si distinguono le cineriti (1), le piroclastiti (2), le pomici bianche (3) e un probabile paleosuolo (4).

La giacitura delle formazioni litoidi è radiale, con bedding caratterizzato, di norma, da inclinazione inferiore a quella del pendio fino a inclinazione subparallela al pendio (Figura 5 e Figura 6).



Figura 5 - Scalo Marinella: bedding meno inclinato del pendio.



Figura 6 - Scalo n.4: bedding subparallelo al pendio.

Depositi eolici. I depositi eolici sono stati segnalati da Bellucci (Bellucci et Al., 1999) nella parte sommitale dell'Isola di Santo Stefano, ma non vi sono evidenze in affioramento. Probabilmente la loro presenza è meglio individuabile attraverso uno studio pedologico.

Le formazioni in posto sono coperte, ad esclusione delle falesie più ripide e delle aree soggette al dilavamento da parte delle acque marine, da una coltre regolitica-colluviale pedogenizzata di spessore variabile da pochi decimetri ad oltre un metro nelle zone di maggiore accumulo.

La successione stratigrafica-tipo dell'isola è graficamente illustrata in Figura 7 (da Sacchi e Petti, 2008).

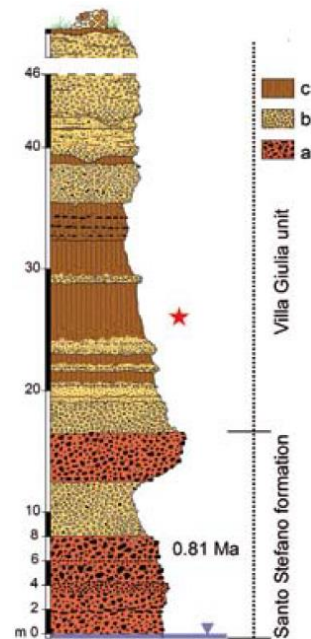


Figura 7 - Successione stratigrafica-tipo dell'Isola di Santo Stefano (da Sacchi, Petti, 2008). a) lave e scorie; b) piroclastiti; c) depositi piroclastici e livelli di pomici.

L'unico elaborato cartografico che rappresenta la geologia dell'isola di Santo Stefano ad una scala superiore a quella della Carta Geologica d'Italia in scala 1:100.000 è la carta geologica in scala 1:15.000 redatta da Bellucci et Al. (1999) riportata in Figura 8.

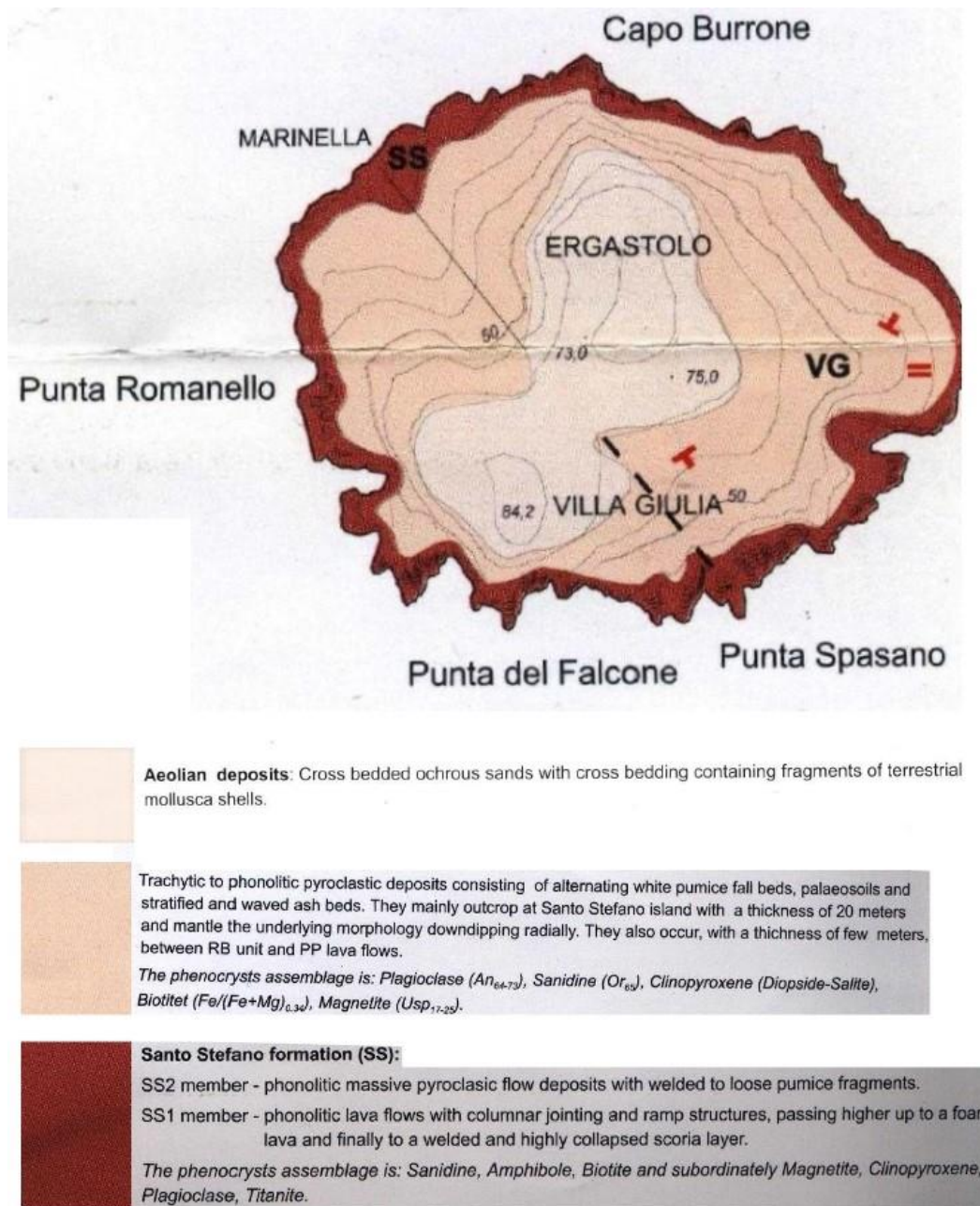


Figura 8 - Carta Geologica dell'Isola di Santo Stefano in scala 1:15.000 (Bellucci et Al., 1999).

3 Rilievi effettuati

Nella presente sezione vengono descritte le tecniche di rilievo impiegate e descritte le campagne di acquisizione dati effettuate in corrispondenza degli approdi Marinella ed Scalo 4 dell'Isola di Santo Stefano.

3.1 Rilievi tradizionali geologici-geomeccanici-geomorfologici

Nelle date del 16 e 17 febbraio 2023 è stato svolto un rilevamento geostrutturale e geomeccanico nelle aree degli approdi rispettivamente denominati "Scalo 4" e "Marinella", finalizzato ad acquisire il quadro di fratturazione degli affioramenti ivi presenti del substrato vulcanico e vulcanoclastico, per la caratterizzazione dell'ammasso roccioso in supporto al rilievo geomeccanico su nuvole di punti ottenute da laser scanner terrestri. I rilievi sono state eseguiti secondo le raccomandazioni ISRM (International Society for Rock Mechanics).

Data la difficile accessibilità dei luoghi, presso gli approdi dello "Scalo 4" e della "Marinella" sono stati effettuate 4 stazioni di rilevamento, così distribuite (Figura 9, Figura 10 e Figura 11):

- Stazione GM1, di tipo geomeccanico, presso l'approdo "Scalo 4";
- Stazione GM2, di tipo geomeccanico, presso l'approdo "Marinella";
- Stazione GM3, di tipo geomeccanico, sul sentiero immediatamente a monte dell'approdo "Marinella";
- Stazione GS4, di tipo geostrutturale, all'interno della cavità artificiale ubicata presso l'approdo "Marinella".

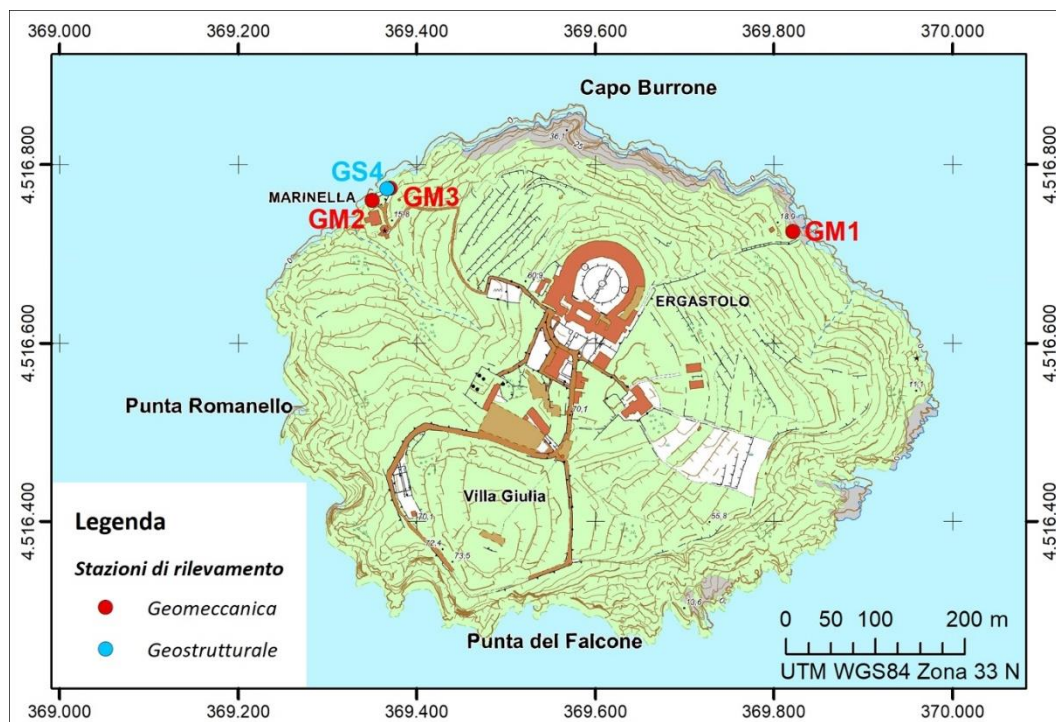


Figura 9 - Mappa di inquadramento con ubicazione delle stazioni geomeccaniche e geostrutturali.

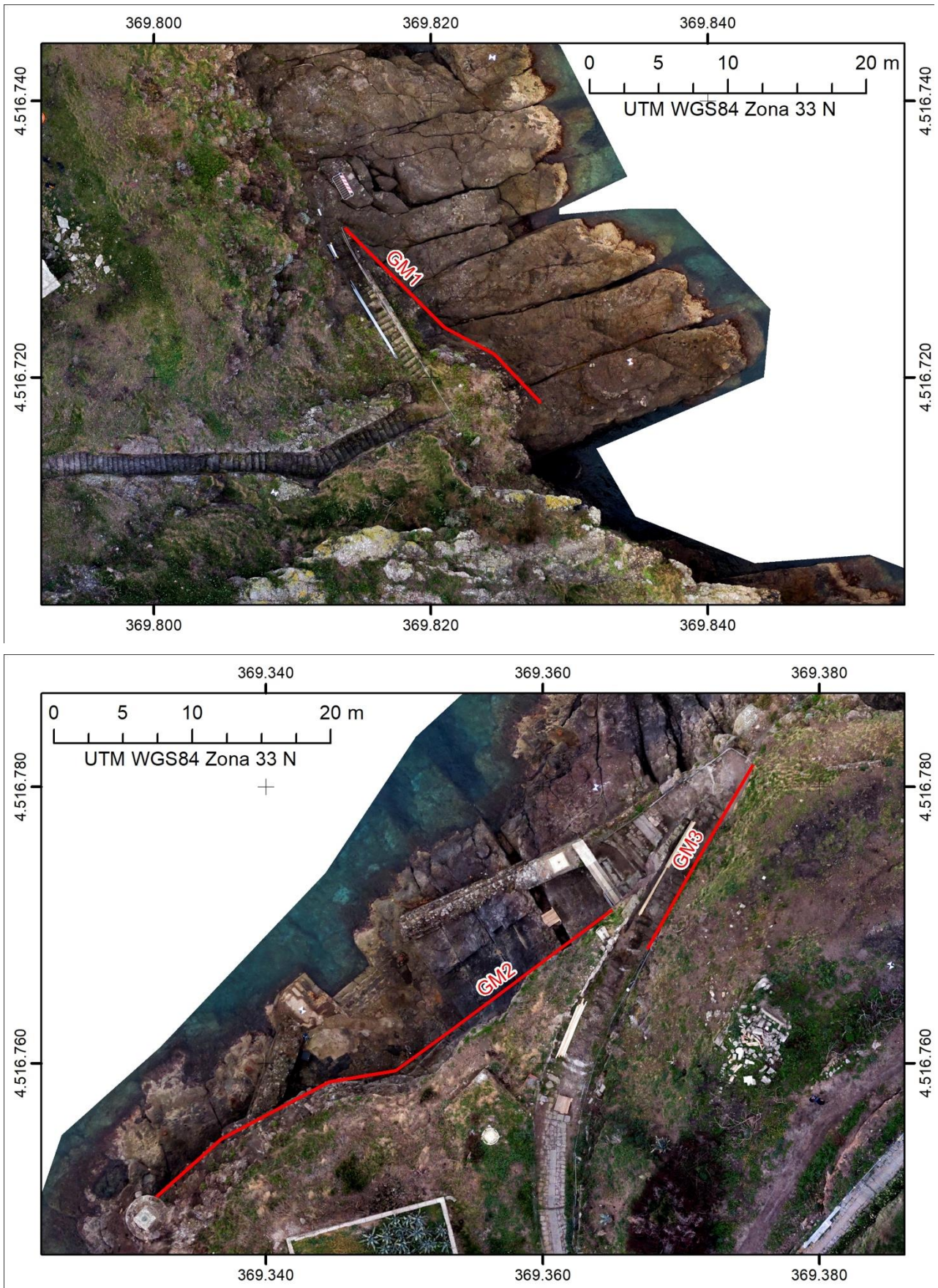


Figura 10 - Tracce delle scan line delle tre stazioni geomeccaniche GM1, GM2 e GM3.

Ciascuna stazione geomeccanica è stata realizzata attraverso il metodo della “*scan line*” (linea di scansione o stendimento), consistente nel posizionare una cordella metrica centimetrata lungo l’affioramento e registrare, ad ogni intersezione fra una discontinuità e la cordella metrica, vari parametri descrittivi della discontinuità stessa, come di seguito illustrato. Per la sola stazione geostrutturale GS4 si è invece proceduto a registrare i soli dati di giacitura delle discontinuità visibili all’interno della cavità artificiale.

Per ciascuna stazione geomeccanica è stata compilata una scheda (Figura 26, Figura 28, Figura 30 e Figura 32) dove sono registrati i seguenti parametri relativi alle discontinuità rilevate.

- *Intersezione o distanza dall’origine della linea di scansione.* Indica la distanza (in metri) tra il punto d’inizio della linea di scansione e il punto nel quale il piano di discontinuità interseca la linea.
- *Tipo.* Indica il tipo genetico di discontinuità (giunto, stratificazione, ecc.).
- *Giacitura della discontinuità (orientazione).* È costituita dai valori di direzione di immersione (*dip direction*, indicato con α) e di inclinazione (*dip*, indicato con β) del piano di discontinuità, misurate con una bussola munita di livella a bolla d’aria e di un coperchio piano, che viene poggiato sulla superficie della discontinuità facendolo ruotare attorno ad un asse orizzontale (clinometro). Le misure vengono eseguite lungo una linea di campionamento, materializzata sul fronte roccioso con una bandella metrica fissata alle estremità del rilievo, vengono quindi rilevate tutte le discontinuità incontrate procedendo da una estremità all’altra.
- *Persistenza o Continuità.* Indica la lunghezza della traccia della discontinuità osservata in un affioramento. Può dare una misura grossolana dell’estensione areale o della profondità di penetrazione di una discontinuità. Il fatto che il piano di discontinuità termini in roccia massiccia o contro altre discontinuità, riduce la persistenza. In termini di lunghezza, la persistenza può essere espressa come il limite del rapporto tra la somma delle lunghezze discontinue di una data traccia di tale piano e la lunghezza totale. Nella Tabella 1 è riportata la classificazione ISRM in funzione della persistenza.

Descrizione	Persistenza
Pers. molto bassa	<1 m
Persistenza bassa	1÷3 m
Persistenza media	3÷10 m
Persistenza alta	10÷20 m
Persistenza molto alta	>20 m

Tabella 1 - Classificazione ISRM in base alla persistenza.

- *Terminazione.* Indica il tipo di terminazione della semitraccia della discontinuità (*r* = in roccia intatta, *d* = contro un'altra frattura, *x* = fuori affioramento).
- *Apertura.* Rappresenta la distanza tra i lembi affacciati di una discontinuità in cui lo spazio interposto è riempito di aria o acqua. Le aperture sottili possono essere misurate con calibro, mentre quelle larghe con regolo graduato in mm. Esse sono rilevate lungo l’intersezione con l’allineamento del rilievo. In base alle misure eseguite, le Raccomandazioni ISRM propongono la seguente classificazione (Tabella 2).

Apertura (mm)	Descrizione	Discontinuità
<0,1	Molto stretta	Discontinuità chiuse
0,1÷0,25 mm	Stretta	
0,25÷2,5 mm	Parzialmente aperta	
0,5÷2,5	Aperta	Discontinuità semi-aperte
2,5÷10	Moderatamente larga	
>10	Larga	
10÷100	Molto larga	Discontinuità aperte
100÷1000	Estremamente larga	
> 1000	Cavernosa	

Tabella 2 - Classificazione ISRM in base all'apertura.

- Scabrezza: rugosità e ondulazione.** Fornisce indicazioni sull'irregolarità delle superfici dei giunti, che rappresenta uno dei principali fattori della resistenza al taglio, soprattutto nel caso di discontinuità serrata; la loro importanza diminuisce con l'aumento dell'apertura e la presenza di riempimento. Esistono due tipi di scabrezza: "ondulazione" a grande scala (o forma), e "rugosità" o "scabrezza" a piccola scala; quest'ultima è utilizzata per la stima della resistenza al taglio, specialmente nel caso di strutture interconnesse e senza spostamenti relativi. La scabrezza di ciascuna delle discontinuità rilevate, valutata attraverso l'uso del cosiddetto Pettine di Barton, è stata confrontata rispetto ai profili standard riportati nelle raccomandazioni ISRM e convertita in un valore del parametro JRC (*Joint Roughness Coefficient*) riportato nelle schede di rilevamento in associazione al tipo di scabrezza. L'importanza della rugosità diminuisce con l'aumentare dell'apertura della discontinuità stessa. In termini generali la rugosità può essere caratterizzata da una ondulazione e da una rugosità vera e propria; nel primo caso la forma della ondulazione provoca la dilatanza in caso di scorrimento trasversale, nel secondo caso la forma della rugosità tende ad essere rotta in caso di scorrimento.
- Resistenza.** Rappresenta la resistenza a compressione delle pareti della discontinuità. All'affioramento, in caso di indisponibilità del Martello di Schmidt, può essere applicato il cosiddetto *Manual index test*, previsto dalle raccomandazioni ISRM, che permette di correlare il grado di resistenza della roccia ad un intervallo di valori di resistenza a compressione uniassiale S_u , mediante valutazioni qualitative della risposta della roccia alla sua percussione con il martello da geologo. La Tabella 3 mostra i sei gradi di resistenza per le rocce litoidi.

Grado	Descrizione della roccia	Identificazione a scala dell'affioramento del comportamento della roccia alla percussione	Intervallo approssimato di S_u (MPa)
R0	Estremamente debole	Si incide con l'unghia o si sbriciola con le mani	0,25 – 1
R1	Molto debole	Si sbriciola sotto i colpi della punta, lastre sottili si rompono con facilità con le mani	1 – 5
R2	Debole	La punta lascia deboli buchi, lastre sottili si rompono con forti pressioni delle mani	5 – 25
R3	Moderatamente resistente	Si frattura con un colpo	25 – 50
R4	Resistente	Si frattura dopo due-tre colpi	50 – 100
R5	Molto resistente	Si frattura solo dopo molti colpi	100 – 200
R6	Estremamente resistente	Si scheggia solamente	> 200

Tabella 3 - Manual index test per la stima di S_u .

- Degradazione.** Indica il grado di alterazione del piano di discontinuità, attraverso quattro classi: fresca (0), decolorata (1), decomposta (2) e disgregata (3).

- *Riempimento*. Costituisce il materiale che separa le pareti adiacenti di una discontinuità ed è il risultato della deposizione fisica o chimica delle acque circolanti, oppure dell'alterazione della roccia intatta precedentemente presente sulle due pareti. In genere è di solito costituito da materiale di caratteristiche meccaniche più scadenti della roccia primitiva intatta, che possono influenzare notevolmente la resistenza al taglio, la deformabilità e la permeabilità del giunto; inoltre, se l'apertura del giunto è tale che le pareti non siano a contatto, la resistenza al taglio della discontinuità si identifica con quella del materiale di riempimento. Tipici materiali di riempimento sono sabbie, limi, argille, breccie più o meno fini, miloniti. Include anche sottili strati di minerali e discontinuità saldate, per esempio vene di quarzo e calcite "saldate" alla roccia in corrispondenza delle due pareti. La presenza di materiale di riempimento influenza il comportamento del giunto nei riguardi del movimento reciproco delle pareti della discontinuità; nel rilievo è stata indicata la tipologia di riempimento e la sua resistenza, basata su criteri analoghi a quelli del Manual index test, applicato ai materiali non litoidi.
- *Filtrazione*. È correlata al flusso idrico e abbondante umidità all'interno delle singole discontinuità o nella massa rocciosa nel suo insieme. Per stimare la facilità con cui l'acqua si muove all'interno delle discontinuità è necessario valutare la loro apertura e le caratteristiche dell'eventuale riempimento. Le raccomandazioni ISRM forniscono degli schemi descrittivi per stimare la filtrazione, distinguendo innanzitutto se la discontinuità sia con o senza riempimento e successivamente classificando sei casi diversi, da asciutto a completamente dilavato.

Sono stati inoltre registrati i seguenti dati generali relativi alla stazione e all'affioramento nel loro complesso.

- *Lunghezza della "Scan line"*. Lunghezza complessiva della linea di scansione.
- *Giacitura del piano di affioramento* - espressa mediante il valore dell'azimut della linea di massima pendenza (*dip direction*) e dell'inclinazione di questa rispetto all'orizzontale (*dip*). In alcuni casi, l'affioramento si presenta con giaciture diverse lungo la linea di scansione, per cui sono state misurate più giaciture riferendole poi alle diverse sezioni della "Scan line".
- *Altezza dell'affioramento*. Altezza espressa in metri dell'affioramento roccioso su cui è stata realizzata la stazione geomeccanica.

Successivamente all'acquisizione dei dati del rilievo, dopo aver riconosciuto il numero di famiglie di discontinuità per ogni stazione, è stata inoltre valutata la *Spaziatura*, così definita: si tratta della distanza tra discontinuità adiacenti misurata in direzione ortogonale alle discontinuità stesse. Normalmente ci si riferisce alla spaziatura media o modale di un sistema di fessure. Essa, unitamente all'orientazione ed alla persistenza, determina la forma e le dimensioni dei blocchi in cui si divide l'ammasso roccioso. Poiché la misura d , espressa in cm, viene eseguita ortogonalmente alla discontinuità, deve essere corretta tenendo conto dell'angolo δ tra la discontinuità e la linea di campionamento.

Per ciascuna famiglia si definisce così una distribuzione di frequenza che si può rappresentare con istogrammi; la distribuzione della spaziatura è alla base della classificazione ISRM riportata nella Tabella 4.

<i>Descrizione</i>	<i>Spaziatura</i>
Sp. estremamente stretta	< 2 cm
Spaziatura molto stretta	2÷6 cm
Spaziatura stretta	6÷20 cm
Spaziatura moderata	20÷60 cm
Spaziatura larga	60÷200 cm
Spaziatura molto larga	200÷600 cm
Sp. estremamente larga	> 600 cm

Tabella 4 - Classificazione ISRM in base alla spaziatura.

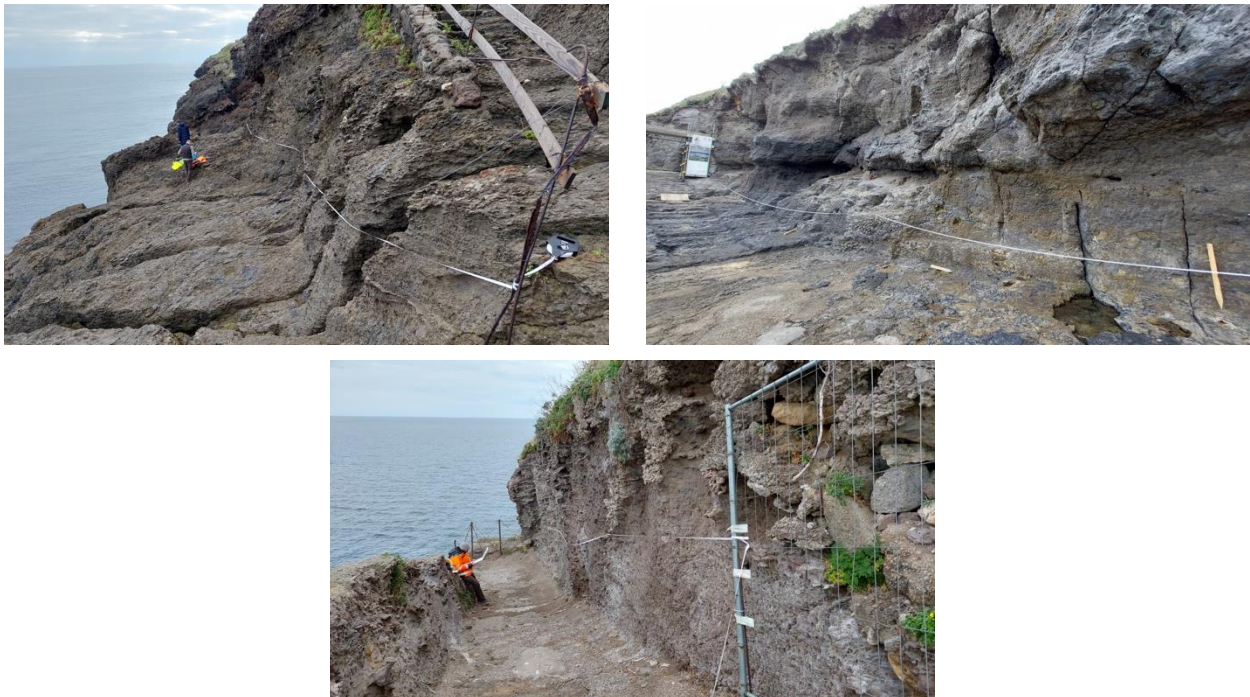


Figura 11 - Veduta delle stazioni di rilevamento geomeccanico. in alto, da sinistra a destra: GM1 e GM2; in basso GM3.

3.2 Rilievo laser scanning

Il rilievo *laser scanning* dell'area di studio è stato realizzato con le seguenti finalità:

- 1) Ricostruzione di un modello di dettaglio 3D aggiornato dell'area in esame;
- 2) Rilievo geomeccanico da remoto per l'integrazione del rilievo tradizionale nelle aree irraggiungibili;
- 3) Riconoscimento dei possibili blocchi in condizione critiche;
- 4) Individuazione dei possibili meccanismi e della propensione al dissesto all'interno dell'area di indagine (analisi cinematica).

La tecnica *laser scanning* utilizza un fascio di luce coerente (*laser*) di ridotte dimensioni per scansionare un determinato oggetto sotto un predefinito angolo solido e con un pattern di scansione regolare. Il risultato della scansione è una matrice di punti che materializza la superficie rilevata, le cui coordinate spaziali sono espresse in termini polari rispetto al centro dell'apparato ricevente

(range r , angolo sull'orizzontale θ e sulla verticale ϕ) (Figura 12). A parità di risoluzione angolare dello strumento la risoluzione spaziale dei punti è quindi funzione della distanza di ripresa.

La nuvola di punti (*point cloud*) prodotta dalla scansione laser costituisce direttamente il modello digitale tridimensionale dell'oggetto scansionato e può essere gestita con un qualsiasi software di elaborazione grafica 3D.

La tecnica *laser scanning* trova numerose applicazioni in diversi campi, quali quello topografico, geologico, architettonico, di conservazione dei beni culturali e industriale.

Lo strumento utilizzato nel presente studio si basa sul metodo del tempo di volo (*time of flight*). La distanza di un oggetto viene ricavata dal tempo che intercorre tra l'invio di un impulso laser di breve durata e il ritorno del segnale riflesso allo strumento ricevitore. La distanza del punto colpito è data dalla relazione $D=ct/2$, dove c è la velocità della luce. A differenza del caso ideale, in cui ad ogni impulso corrisponde un segnale di ritorno identico a quello emesso, nella realtà il segnale di ritorno presenta un certo grado di disturbo legato alle caratteristiche dell'oggetto riflettente, al fatto che il raggio laser, seppur molto concentrato, presenta una certa divergenza ed alle condizioni atmosferiche.

Il riconoscimento dell'impulso di ritorno, e quindi il segnale di stop al conteggio temporale, può essere effettuato con diverse tecniche che vanno dall'impostazione di soglie di ampiezza al segnale di ritorno, all'utilizzo di frazioni della lunghezza del segnale, fino al completo riconoscimento del segnale di ritorno (Thiel & Wehr, 2004; Wagner et al., 2006). Quest'ultimo metodo è utilizzato nelle applicazioni con laser aviotrasportati e consente di distinguere, per uno stesso impulso emesso, differenti impulsi di ritorno derivanti da oggetti posti a quote diverse (ad es. vegetazione, edifici e suolo).

Il *laser scanner* da terra (TLS) non necessita di sistemi di correzione del posizionamento, visto che le distanze vengono riferite ad una terna cartesiana che rimane fissa e centrata sullo strumento per ogni posizione di scansione. Il corretto posizionamento su una terna di riferimento geografica può essere fatto successivamente tramite la conoscenza delle coordinate geografiche di alcuni punti individuati nella scansione. Il principale vantaggio di questa tecnica sta nell'elevata risoluzione spaziale raggiungibile e nella possibilità di eseguire scansioni in aree di difficile accesso o non direttamente visibili da aereo. I moderni *laser scanner* terrestri utilizzati in ambito geologico applicato consentono accuratissime fino a sub-centimetriche, in relazione al metodo utilizzato per valutare la distanza dell'oggetto riflettente.

Nel presente studio le scansioni sono state eseguite con un dispositivo 3D *Laser Imaging Sensor*, modello VZ-1000 da terra, prodotto dalla Riegl Laser Instrument Systems che si basa sulla metodologia di misura del tempo di volo.

Le principali caratteristiche tecniche della strumentazione impiegata sono le seguenti:

- Distanza di misura: fino a 1400 m, in funzione delle caratteristiche di riflettività dell'oggetto
- Accuratezza: ± 10 mm
- Risoluzione angolare verticale minima: 0.0005°
- Risoluzione angolare orizzontale minima: 0.0005°
- Velocità di scansione: fino a 120000 punti/secondo
- Lunghezza d'onda: infrarosso vicino
- Apertura del raggio: 0.3 mrad.

La densità di punti battuti è legata quindi alla distanza dell'area di interesse in funzione del passo di scansione verticale ed orizzontale dello strumento, che possono essere inferiori anche al centesimo di grado. Questo comporta ad es., nel caso di passo di campionamento di 0.01° ad una distanza di 100 m, una densità lineare di 1 punto ogni 1.7 cm.

Il software di acquisizione ed elaborazione utilizzato per il presente studio è RISCANPRO 2.5 prodotto anch'esso da Riegl.

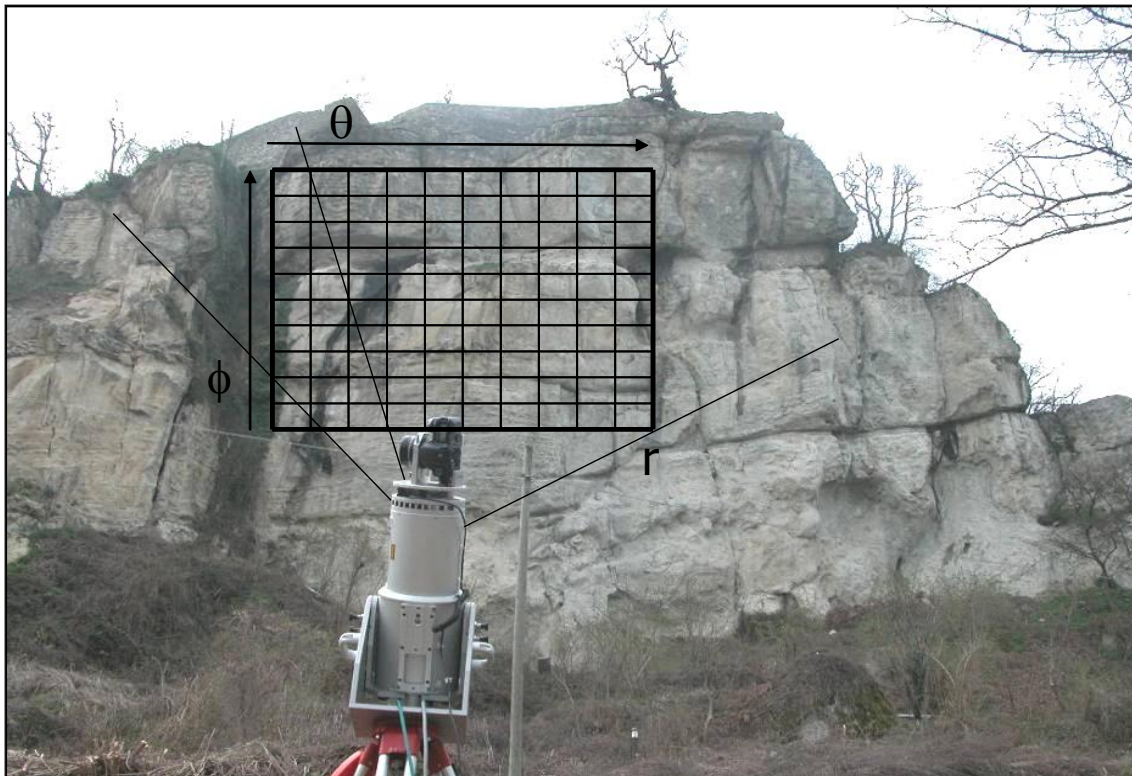


Figura 12 - Modalità di acquisizione di nuvola di punti 3D ad alta risoluzione mediante laser scanner terrestre.

La campagna di acquisizione laser è stata effettuata nei giorni 16 e 17 febbraio 2023. Essa si è concentrata presso le due diverse aree precedentemente individuate, denominate “Scalo Marinella” e “Scalo n.4” (Figura 13).

La presenza di asperità morfologiche ha imposto, al fine di ridurre al minimo le zone d'ombra, la pianificazione della campagna di acquisizione da diverse posizioni distinte. Per lo scalo Marinella la campagna di acquisizione è composta da 11 punti di scansione (Figura 14), di cui 7 all'esterno e 4 interni alla grotta presente nell'area rilevamento, mentre per lo Scalo n.4 la campagna di acquisizione è stata composta da 3 punti di scansione (Figura 15). Per ogni posizione di ripresa (Figura 16) sono state acquisite scansioni di inquadramento a bassa risoluzione oltre a quelli di dettaglio ad alta risoluzione.



Figura 13 - Vista dall'alto dell'isola di Santo Stefano e localizzazione delle due aree di scansione.



Figura 14 - Localizzazione dei punti di scansione presso lo scalo Marinella (in giallo i punti di acquisizione all'esterno, in blu quelli interni alla grotta).



Figura 15 - Localizzazione dei punti di scansione presso lo Scalo n.4.



Figura 16 - Laser scanner Riegl VZ-1000 mentre acquisisce dal punto di scansione.

Prima di procedere alla scansione *laser* sono stati posizionati all'interno della scena da investigare alcuni riflettori (Figura 17) per ciascuno dei quali sono state determinate le coordinate geografiche (sistema di riferimento WGS84) tramite rilievo GPS. L'utilizzo dei riflettori è legato alla possibilità da parte del software di acquisizione di riconoscere gli stessi nelle diverse scansioni per poterle poi unire in un'unica nuvola di punti minimizzando i problemi legati alla presenza di zone d'ombra.



Figura 17 - A sinistra foto del posizionamento di alcuni riflettori presso lo Scalo n.4; a destra un riflettore in dettaglio.

3.3 Rilievi fotogrammetrici da drone

I rilievi fotogrammetrici da drone sono stati svolti mediante l'utilizzo di un SAPR a sei rotori, specificamente progettato e realizzato per rilievi fotogrammetrici in aree difficilmente raggiungibili, equipaggiato con fotocamera digitale ad alta risoluzione, e sistema di georeferenziazione delle prese fotografiche. Più in dettaglio si tratta del drone Saturn Mini, di esclusiva progettazione, realizzazione e brevetto del Centro per la Protezione Civile dell'Università di Firenze.

Un drone, equipaggiato con fotocamere digitali, è in grado di acquisire immagini in automatico in posizioni geografiche definite dall'operatore tramite la programmazione di un piano di volo. Le immagini vengono acquisite in modo tale da ricoprire l'intera area di interesse e da garantire la parziale sovrapposizione tra fotogrammi geograficamente contigui. Tramite l'utilizzo di punti di controllo a terra, con coordinate note o misurate (GCP-Ground Control Points), i prodotti ottenuti dall'elaborazione aerofotogrammetrica vengono correttamente georeferenziati e scalati (Figura 18).

Nel giorno 22 febbraio 2023 è stato eseguito un rilievo aerofotogrammetrico dei due approdi dell'isola di Santo Stefano. Il rilievo è stato realizzato mediante l'uso del drone Saturn Mini 02 (classe Saturn Mini), realizzato e brevettato dal DST-UNIFI, equipaggiato con fotocamera digitale Canon IXUS 240, avente risoluzione di 16.1 Mpix (massima risoluzione dell'immagine: 4608x3456 pixel). La fotocamera è stata calibrata prima dell'inizio del rilievo, al fine di impostare con precisione i parametri ottici, utili in fase di elaborazione delle immagini tramite *software* dedicato. La risoluzione

dei prodotti ottenuti dipende dalla risoluzione dei fotogrammi acquisiti in fase di volo, la quale dipende, a sua volta, dalla quota di volo: tanto minore è la distanza tra fotocamera e bersaglio, tanto maggiore è la risoluzione. Rilievi effettuati, come in questo caso, mantenendo costante la quota di volo implicano una variabilità della risoluzione dei fotogrammi in funzione dell'altitudine rispetto al suolo (AGL - *Altitude Above Ground Level*) e, quindi, della topografia e degli accidenti morfologici dell'area.

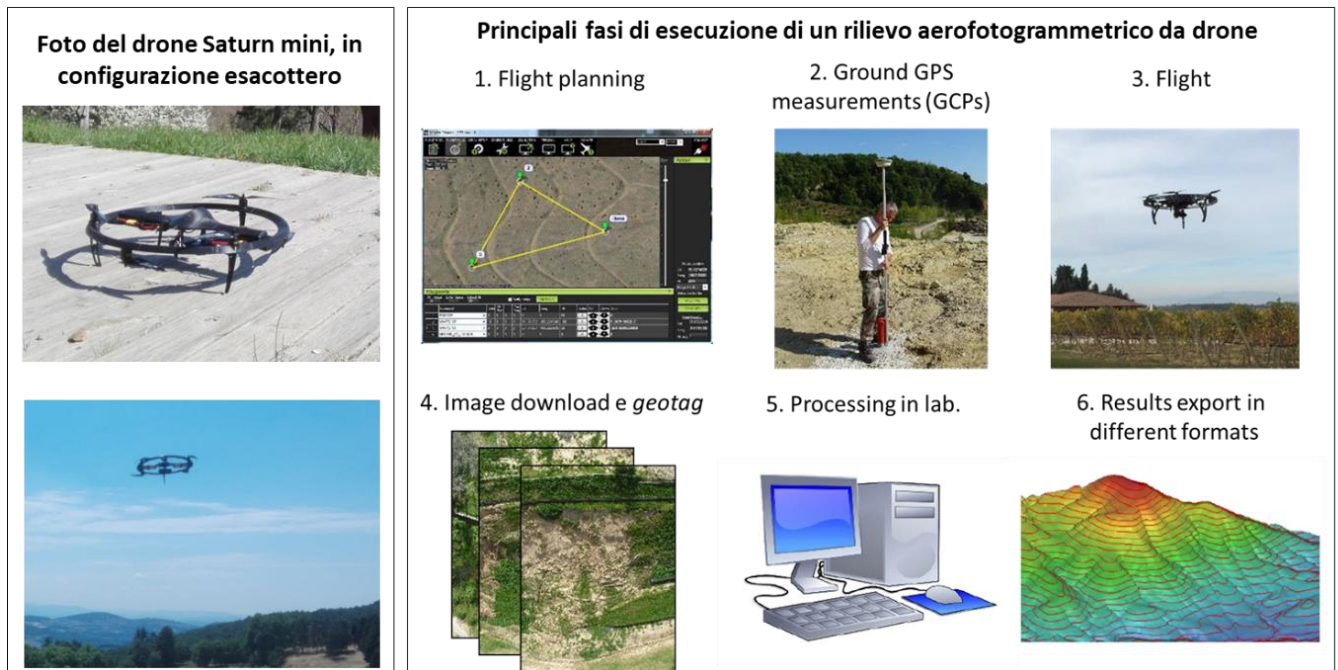


Figura 18 - Modalità di acquisizione di nuvola di punti 3D ad alta risoluzione mediante rilievi aerofotogrammetrici.

Il team di rilievo è stato composto da due persone, entrambe aventi la qualifica di pilota riconosciuto ENAC e con un know-how specifico per i rilievi fotogrammetrici in pareti rocciose ed aree a rischio idrogeologico.

Il rilievo fotogrammetrico ha riguardato, per entrambi gli approdi, sia la porzione inferiore del versante che la parte a monte dello stesso.

L'esecuzione del rilievo ha richiesto una fase preliminare di pianificazione nella quale le 2 aree sono state coperte in 2 diversi voli, realizzati impostando strisciate di acquisizione a geometria incrociata, all'incirca perpendicolare e parallela alla linea di costa (Figura 19, Scalo Marinella, e Figura 20, Scalo n.4). Per ciascun volo è stata pianificata una traiettoria ottimale con punti di presa delle immagini in specifici punti geografici, per ottenere una sovrapposizione ottimizzata tra le immagini, che è stata imposta non inferiore al 70% in direzione di volo (overlap) e non inferiore al 80% tra fotogrammi appartenenti a strisciate contigue (sidelap).

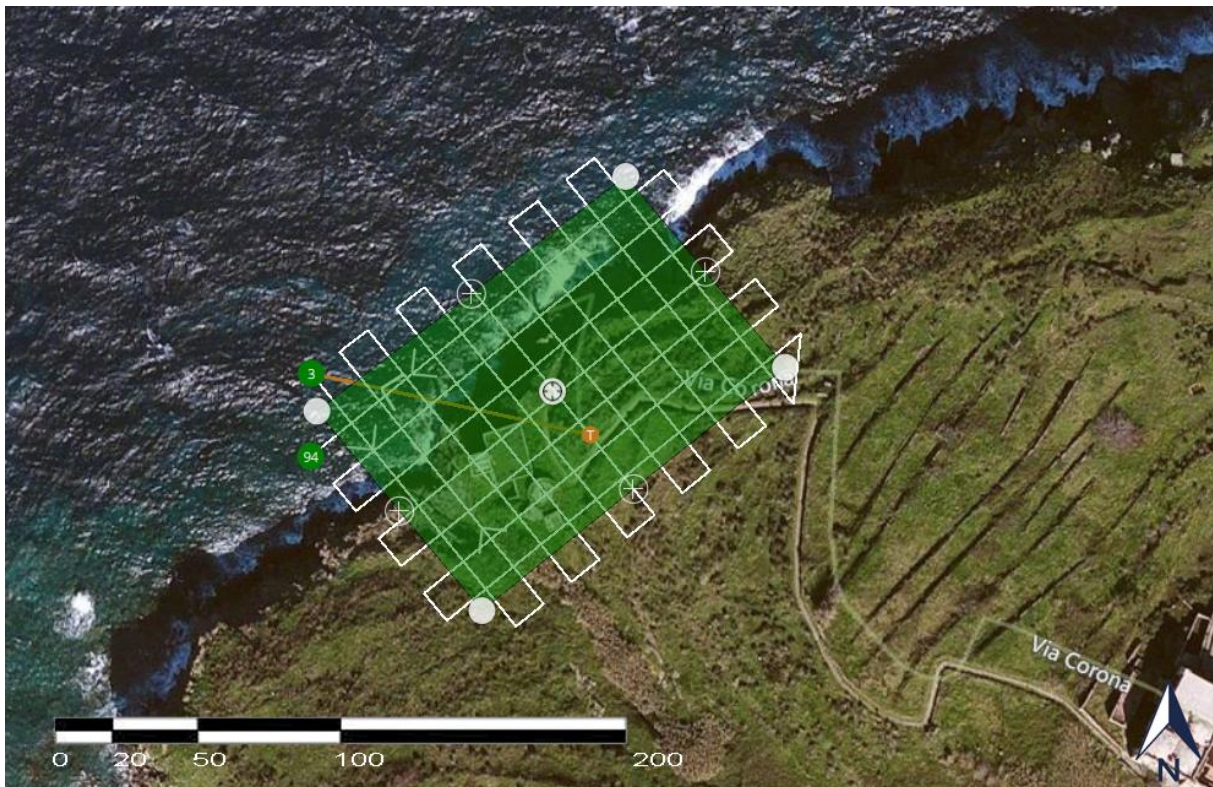


Figura 19 - Traiettoria del piano di volo eseguito durante l'esecuzione del rilievo nell'area dello scalo Marinella.

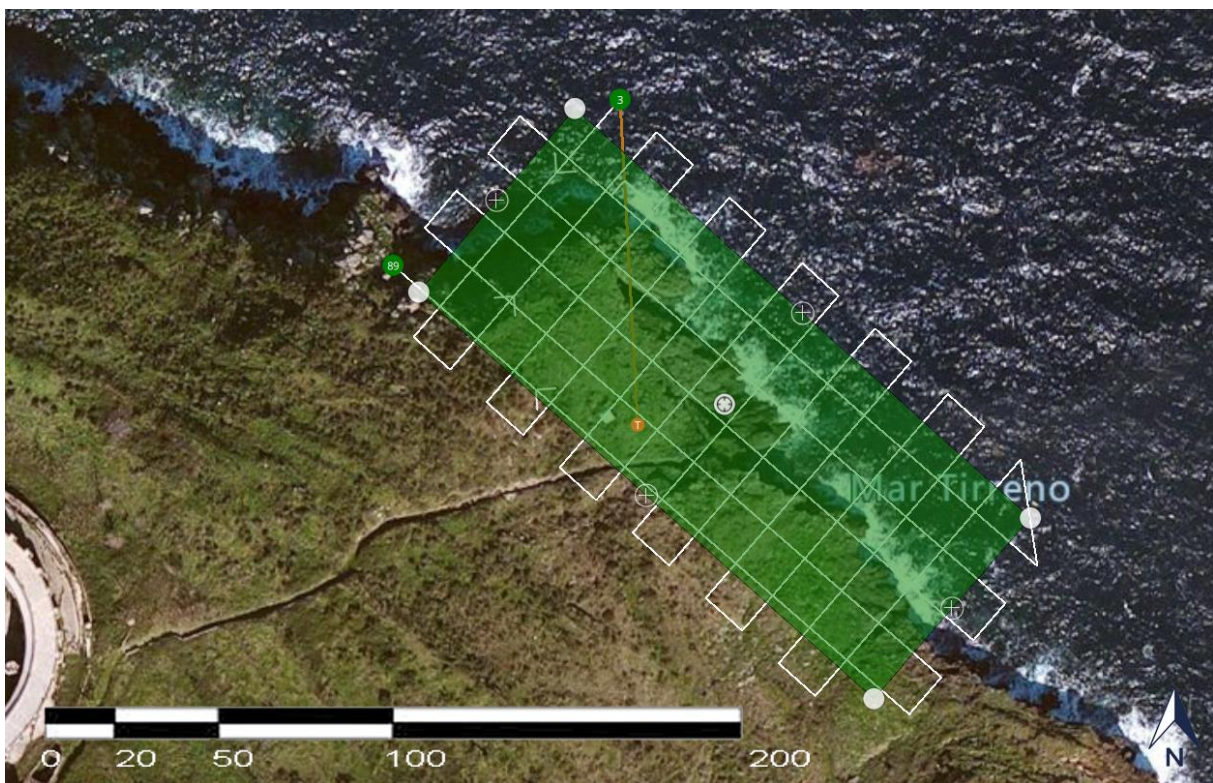


Figura 20 - Traiettoria del piano di volo eseguito durante l'esecuzione del rilievo nell'area dello Scalo n.4.

Come schematicamente illustrato in (Tabella 5), della fase di volo sono stati acquisiti principalmente fotogrammi in direzione nadirale a quota costante dal punto di decollo, mediamente circa a 30 m

AGL (Above Ground Level). L'elevato numero di fotogrammi acquisiti è stato in gran parte dovuto alla complessità morfologica delle aree, ricche di aggetti e crepe.

La campagna di rilevamento GPS è stata eseguita mediante GPS Emlid Reach RS+ con correzione RTK tramite servizio Italtos, finalizzata alla misura delle coordinate di n. 5 punti di controllo (GCP) per ogni area di rilievo (Figura 21). I punti di controllo sono stati utilizzati per la georeferenziazione e validazione del modello tridimensionale ottenuto in fase di rilievo aerofotogrammetrico e per la valutazione dell'accuratezza dei dati risultanti.

Il corretto funzionamento del GPS Emlid Reach RS+ è stato verificato tramite misura di un punto IGM (Firenze San Miniato al Monte) pre e post rilievo, non mostrando deviazioni oltre l'errore di misura.

Caratteristiche dei rilievi fotogrammetrici da drone		
Fotogrammi utilizzati	178	207
Estensione rilievo (m²)	8900	8500
Overlap minimo	~70%	~70%
Sidelap minimo	~80%	~80%
Punti di controllo (GCPs)	5	5
Accuratezza (GCPs)	< 5 cm	< 5 cm
Fotogrammi utilizzati	178	207

Tabella 5 - Caratteristiche dei rilievi fotogrammetrici da drone.



Figura 21 - Marker al suolo per rilevamento delle coordinate GPS dei Ground Control Points.

I dati risultanti dal rilievo vengono forniti nei più comuni formati GIS o CAD, unitamente a nuvole di punti georeferenziate in vari formati (ad es. .las o .txt) compatibili con i più comuni software di visualizzazione ed editing, permettendo la navigazione e la misurazione realistica dei modelli ricostruiti. Tutti i dati sono georiferiti nel sistema geodetico WGS 84 (EPSG:4326).

4 Elaborazione dei dati

4.1 Elaborazione fotogrammetrica da drone

Le immagini acquisite sono state elaborate tramite *software Structure-from-Motion (SfM) Agisoft Metashape Pro* (versione 1.8.4) al fine di ottenere rappresentazioni tridimensionali delle superfici visibili in formato “nuvola di punti” (*point cloud*), modelli poligonali 3D delle superfici rilevate (*Mesh*), modelli digitali di terreno (DTM) e di superficie (DSM), nonché un’ortofoto mosaicata ad alta definizione.

Le immagini sono state allineate alla massima risoluzione sfruttando il dato di *geotagging* del drone (WGS 84 EPSG:4326) con accuratezza sub-metrica, le calibrazioni di lente e tramite l’individuazione di punti omologhi sul terreno, visibili su più immagini contigue. Perfezionato l’allineamento tra i voli e le immagini, è stata creata una nuvola di punti ad alta densità partendo dalle immagini alla massima risoluzione (Figura 22).

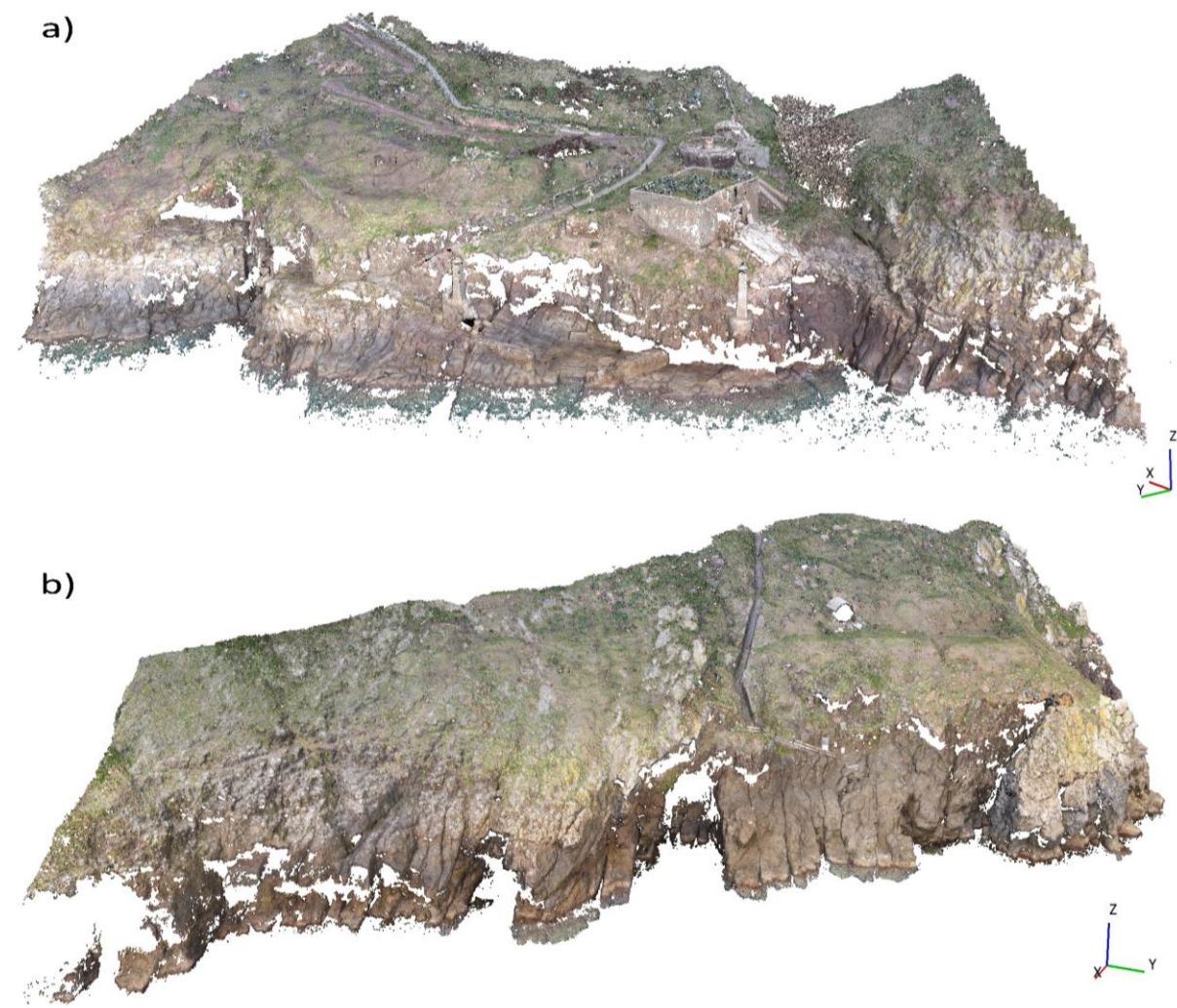


Figura 22 - Istantanee delle due nuvole di punti del rilievo effettuato tramite drone dello Scalo Marinella (a) e dello Scalo n.4 (b). Le lacune visibili lungo le pareti delle scogliere sono dovute ad oggetti che nascondono le aree in ombra dai fotogrammi nadirali.

Tramite l'inserimento delle coordinate dei punti di controllo è stata corretta e verificata la georeferenziazione. In Tabella 6 è riportato l'errore totale medio calcolato sui punti di controllo.

Entro i primi 30 cm l'accuratezza del rilievo nelle zone a bassa profondità d'acqua rientra nell'errore totale individuato nelle zone asciutte. Zone a profondità maggiore presentano una rumorosità elevata fino alla completa decorrelazione del rilievo, per cui sono state rimosse.

Rilievo	n. punti	Errore medio totale (cm)
Scalo Marinella	5	4
Scalo n.4	5	4

Tabella 6 - Accuratezza media di georeferenziazione nei prodotti tridimensionali elaborati.

Durante il passo successivo è stato creato un DTM. I modelli hanno subito una fase di controllo da parte dell'elaboratore per ottimizzare eventuali errori di classificazione e per ottenere una ragionata e ragionevole interpolazione ove sia stata rimossa la vegetazione o manufatti (edifici, automezzi, persone, manufatti di varia dimensione, ecc.). In presenza di una consistente interpolazione sono state controllate le immagini corrispondenti per verificare la ragionevolezza dell'interpolazione prodotta dagli algoritmi del software utilizzato. *Metashape Pro* consente due tipi di interpolazione: una minimale che chiude gli eventuali buchi di piccole dimensioni estrapolando una superficie a seconda delle condizioni al contorno della zona che presenta una lacuna (metodo adottato), la seconda estrapola zone molto più ampie, anche nelle zone perimetrali del rilievo. Entrambi i metodi, sebbene consentano di presentare risultati senza lacune tipiche del metodo fotogrammetrico, non garantiscono l'effettiva rappresentazione della realtà in quanto non vi è una misura diretta. L'interpolazione può essere disabilitata in modo da avere solamente il dato misurato. Per questi rilievi sono stati prodotti modelli DTM con interpolazione nelle zone di lacuna della nuvola di punti.

I prodotti ottenuti sono georiferiti nel sistema geodetico WGS 84 (EPSG:4326) (Figura 23):

- Nuvola di punti (Point Cloud), con colori reali.
- Ortofoto ad altissima risoluzione (~2 cm/pix).
- Modello DSM *raster* con risoluzione pari a ~2 cm/pixel.

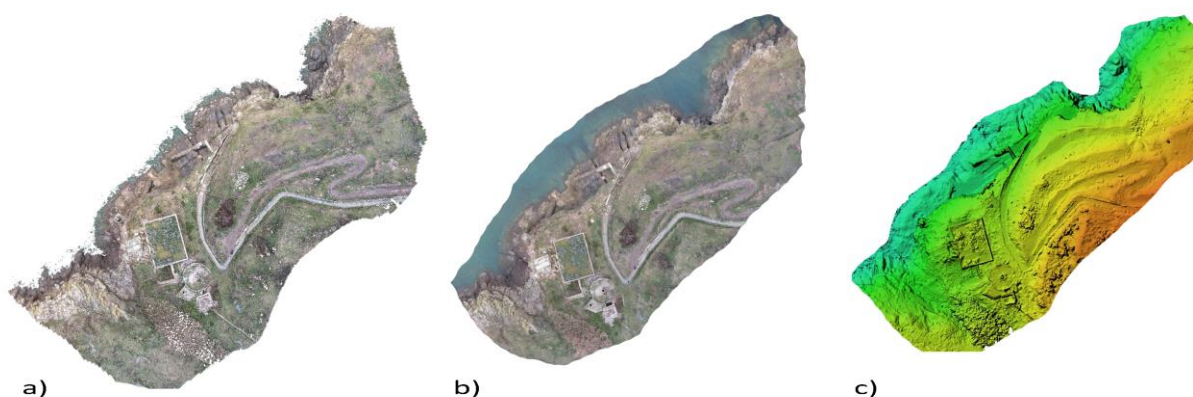


Figura 23 - Prodotti ottenuti dal rilievo fotogrammetrico da drone per Scalo Marinella: a) Nuvola di punti, b) Ortofoto, c) DSM.

4.2 Rilievo geomeccanico tradizionale

A seguito della raccolta dei dati in campagna si è proceduto all'analisi statistica degli stessi, al fine di individuare i principali sistemi di discontinuità che suddividono l'ammasso roccioso, con l'obiettivo di confrontarli ed integrarli con quelli desunti dalla scansione *laser* e di classificare qualitativamente l'ammasso roccioso.

4.2.1 Rilievo geostrutturale

Le giaciture delle discontinuità misurate lungo le linee di scansione sono state rappresentate su diagrammi polari, identificando i poli dei piani in proiezione stereografica equiangolare (Reticolo di Wulff, emisfero inferiore) e utilizzando l'applicativo *Geomechanical Survey* della Società GeoStru per la rappresentazione e l'analisi statistica dei dati. Tale software permette di elaborare e visualizzare dati ottenuti dal rilievo geostrutturale di discontinuità di ammassi rocciosi, fornendo proiezioni stereografiche e caratteristiche sia qualitative che quantitative, identificando gruppi omogenei in funzione della densità di dati rilevata sui diagrammi polari e i relativi baricentri (dato identificativo di ogni famiglia di discontinuità).

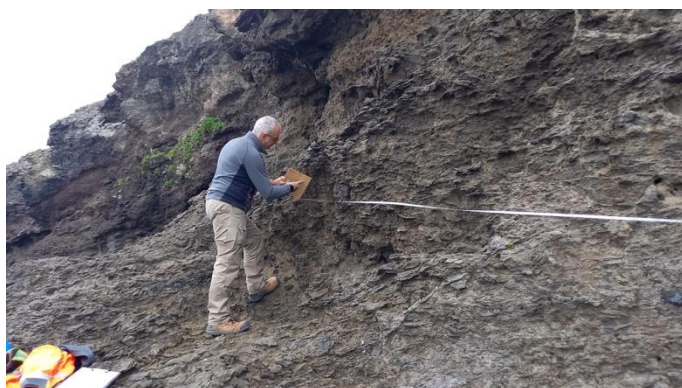


Figura 24 - Attività di rilevamento geomeccanico.

La metodologia adottata ha permesso di individuare le concentrazioni statisticamente significative di poli, caratterizzate da giaciture simili tra loro e quindi le diverse famiglie di discontinuità che tagliano l'ammasso roccioso, oltre che di trattare statisticamente le informazioni raccolte.

Alla fine dell'elaborazione possono essere presenti alcuni "outsider", ovvero campioni che di fatto non appartengono a nessuna famiglia o a famiglie molto piccole

rispetto a quelle principali; si tratta di discontinuità disposte in modo casuale che in quanto tali, non essendo ripetitive, sono insignificanti ai fini di eventuali successive elaborazioni.

Nelle pagine seguenti sono riportate le rappresentazioni relative all'orientazione delle discontinuità, raggruppate sia per stazione di rilevamento, sia per zona (approdo della Marinella), in cui si manifestano i domini strutturali tramite proiezioni stereografiche dei poli e tracce ciclografiche. Per ogni stazione o area di analisi, sono state rappresentate su proiezioni di Wulff sia la totalità delle misure di discontinuità effettuate, sia le ciclografiche medie delle famiglie riconosciute.

Stazione Geomeccanica GM1 (Area dell'approdo "Scalo 4")

La stazione geomeccanica GM1 è stata realizzata all'approdo "Scalo 4", nella parte orientale dell'isola, sulla parete che affaccia sull'approdo e sul primo tratto di salita inciso su roccia, prima dell'inizio delle scalette (Figura 9, Figura 10 e Figura 11).

La stazione consiste di uno stendimento (scan line) di lunghezza pari a 19,3 m su una parete di altezza compresa da 4 a 6 m, avente giacitura variabile (come da scheda di rilevamento riportata in Figura 26), espressa in valori di angolo di immersione e angolo di inclinazione, da 38°/67° a 20°/75° a 43°/70° da sudest verso nordovest.

Alla stazione GM1 sono stati osservati nelle rocce vulcaniche affioranti, appartenenti al membro SS1 della Formazione di Santo Stefano, essenzialmente giunti di raffreddamento, raggruppabili in due famiglie principali e tre occasionali.

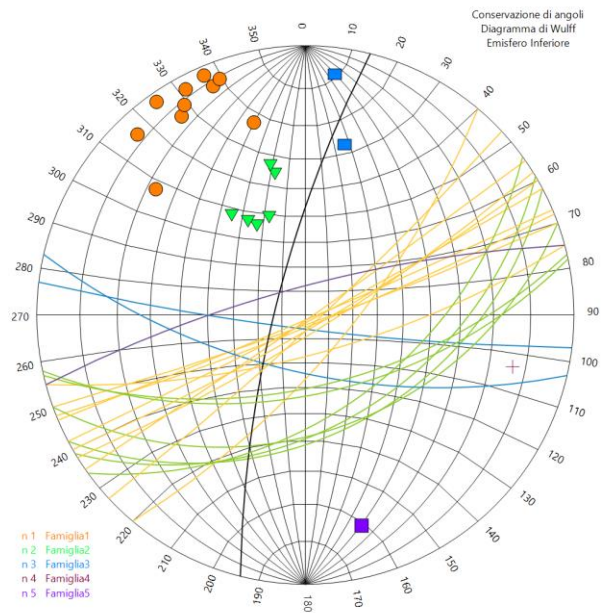


Figura 25 - Diagramma di Wulff con le tracce ciclografiche e i nodi delle discontinuità misurate alla stazione GM1.

Come si può osservare in Figura 25, la famiglia più rappresentata, denominata Famiglia 1 (10 occorrenze), è quella avente giacitura media a $150^{\circ}/83^{\circ}$, mentre seconda in termini di numero di discontinuità (Famiglia 2, con 6 occorrenze) è quella avente immersione simile alla precedente, ossia a 157° ma con inclinazione inferiore, mediamente intorno a 50° . Costituiscono famiglie occasionali quelle con giacitura media $190^{\circ}/75^{\circ}$ (Famiglia 3, con 2 occorrenze), $284^{\circ}/77^{\circ}$ (Famiglia 4, con 1 occorrenza) e $345^{\circ}/78^{\circ}$ (Famiglia 5, con 1 occorrenza).

Analizzando statisticamente le proprietà di apertura, spaziatura e persistenza delle due principali famiglie di discontinuità, si possono fare le seguenti osservazioni.

Le discontinuità della Famiglia 1 si presentano generalmente piuttosto aperte, in prevalenza fra 10 e 100 mm, con una spaziatura media di circa 1,70 m ed una persistenza con valori relativamente alti, soprattutto compresa fra 1 e 3 m.

La Famiglia 2 presenta invece aperture prevalentemente più strette, fra 0,25 e 2,5 mm, con spaziatura media di 0,90 m, ma con persistenza ugualmente rappresentata dagli intervalli di valori di 1-3 m e 3-10 m.

SCHEDA DI CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA DELLE DISCONTINUITA'																	
dati generali							affioramento					stendimento					
Progetto: S.Stefano			Committente: GEOAPP				Immersione (°): vedi note					ID stendimento: GM1					
N. Scheda 1			Rilevatore/i: PAG, ND				Inclinazione (°): vedi note					Immersione (°):					
Località: Scalo n.4 (approd			Data rilevamento 16/02/23				Altezza (m): da 4 a 6					Inclinazione (°):					
Stazione: GM1			N. Foto:				Formazione:					Lunghezza (m): 19,3					
ID GPS: GM1							Litologia:										
N.	intersezione		orientazione			persistenza		apertura	rugosità		resistenza			riempim.		filtrazione	
	x (m)	tipo (1)	α (°)	β (°)	stria (°)	termin. (2)	traccia (m)	A mm	tipo (3)	JRC 1-20	stima (4)	sclerometro orient. R	degrad. (5)	tipo (6)	resist. (4)	tipo (7)	portata l/min
1	0,85	JN	158	85	-	dr	1,5	3	2	16	R3		0	3 S3	F2	-	
2	1,03	JN	160	86	-	xx	30	200	2	16	R3		0	3 S3	F2	-	
3	3,01	JN	152	42	-	rd	4	4	2	18	R3		0	3 S3	F2	-	
4	4,30	JN	187	84	-	rd	6	3	2	16	R3		0	3 S3	F2	-	
5	5,77	JN	149	45	-	rd	2	3	2	17	R3		0	3 S3	F2	-	
6	5,94	JN	160	43	-	dd	2,5	2	2	14	R3		0	3 S3	F2	-	
7	8,10	JN	148	82	-	dd	7	10	2	19	R3		0	3 S3	F5	-	
8	8,55	JN	157	88	-	xx	30	100	2	12	R3		0	0	F6	-	
9	9,36	JN	130	72	-	rr	3	2	2	18	R3		0	3 S3	F2	-	
10	9,80	JN	165	73	-	xd	20	70	2	14	R3		0	3 S3	F5	-	
11	10,70	JN	193	66	-	dd	2,5	5	2	12	R3		0	3 S3	F2	-	
12	11,61	JN	152	87	-	dd	7	3	2	8	R3		0	3 S3	F2	-	
13	12,09	JN	145	88	-	dx	20	20	2	16	R3		0	3 S3	F5	-	
14	12,46	JN	284	77	-	dd	1	3	2	18	R3		0	3 S3	F2	-	
15	12,99	JN	144	50	-	dd	1	2	2	16	R3		0	3 S3	F2	-	
16	13,15	JN	168	57	-	dd	1	2	2	15	R3		0	3 S3	F2	-	
17	13,45	JN	167	60	-	xd	20	100	2	16	R3		0	3 S3	F5	-	
18	14,80	JN	137	85	-	dd	3	80	2	18	R3		0	3 S3	F5	-	
19	15,05	JN	345	78	-	dd	3	120	2	18	R3		0	3 S3	F5	-	
20	16,95	JN	150	84	-	xd	25	200	2	14	R3		0	3 S3	F5	-	
21																	
22																	
23																	
24																	
25																	
26																	
27																	
28																	
29																	
30																	
31																	
32																	
33																	
34																	
35																	
36																	
37																	
38																	
39																	
40																	
41																	
42																	
43																	
44																	
45																	
46																	
47																	
48																	
49																	
50																	

Note:
 giacitura affioramento, da 0,00 a 4,50 m: 38°/67°; da 4,50 a 9,00 m: 20°/75°; da 9,00 a 19,30 m: 43°/70°
 le terminazioni sono prese in ordine da monte verso valle

Famiglie di discontinuità:
 Famiglia 1
 Famiglia 2
 Famiglia 3
 Famiglia 4
 Famiglia 5

(1) tipo discont. BG - stratificazione JN - giunto FL - faglia FR - fessura FS - fessilità ST - stilolite SC - scistosità CL - clivaggio FO - foliazione VN - vena SH - zona di taglio	(2) terminazione x - oltre affioramento r - contro roccia d - contro discontin. (3) tipo rugosità S - a gradini U - ondulato P - planare 1 - liscio 2 - scabro 3 - striato	(4) resistenza S1 - molto molle (<25kPa) S1 - molto molle (<25kPa) S2 - molle (25-50kPa) S3 - moder. consist. (50-100kPa) S4 - consistente (100-250kPa) S5 - molto consistente (250-500kPa) S6 - estrem. consistente (>500kPa) R0 - estrem. debole (<1MPa) R1 - molto debole (1-5MPa) R2 - debole (5-25MPa) R3 - moder. resistente (25-50MPa) R4 - resistente (50-100MPa) R5 - molto resistente (100-250MPa) R6 - estrem. resistente (>250MPa)	(5) degradazione 0 - fresca 1 - decolorata 2 - decomposta 3 - disgregata (6) riempimento 0 - assente 1 - coloraz. superficiale 2 - terra coesiva 3 - terra granulare 4 - cementazione 7 - calcite 8 - clorite, talco, gesso 9 - altro (specificare)	(7) filtrazione Senza riempimento U1 - chiusa/secca U2 - aperta asciutta U3 - aperta tracce flusso U4 - aperta umida U5 - aperta bagnata U6 - flusso continuo Riempimento F1 - asciutto F2 - umido F3 - bagnato F4 - tracce dilavamento F5 - localmente dilavato F6 - complet. dilavato
--	--	---	--	---

Figura 26 - Scheda di rilevamento della stazione geomeccanica GM1.

Stazione Geomeccanica GM2 (Area dell'approdo "Marinella")

La stazione geomeccanica GM2 è stata realizzata presso l'approdo "Marinella", sulla parte bassa della parete che sovrasta la piattaforma rocciosa costituente l'approdo stesso (Figura 9, Figura 10 e Figura 11).

La scan line della stazione GM2 ha una lunghezza di 39,5 m ed è orientata grosso modo da nordest verso sudovest. La parete rilevata ha un'altezza variabile fra 6 ed 8 m ed è costituita da i termini vulcanici della Formazione di Santo Stefano, così distinti: una parte inferiore, costituita dalle lave effusive del membro SS1, in cui sono riconoscibili due probabili episodi eruttivi sovrapposti, ed una superiore, aggettante, rappresentata da piroclastiti del membro SS2. La parete ha giacitura variabile, tra 315°/65 e 336°/80° (come da scheda di rilevamento riportata in Figura 28).

Analogamente alla stazione GM1, anche in questo sito sono state osservati giunti di raffreddamento, raggruppabili in tre famiglie principali e due occasionali. È stato anche misurato un presunto piano di "stratificazione" che separa le due porzioni di parete costituita da flussi lavici del membro di SS1 e che potrebbe essere riferibile ad una superficie di scorrimento della lava.

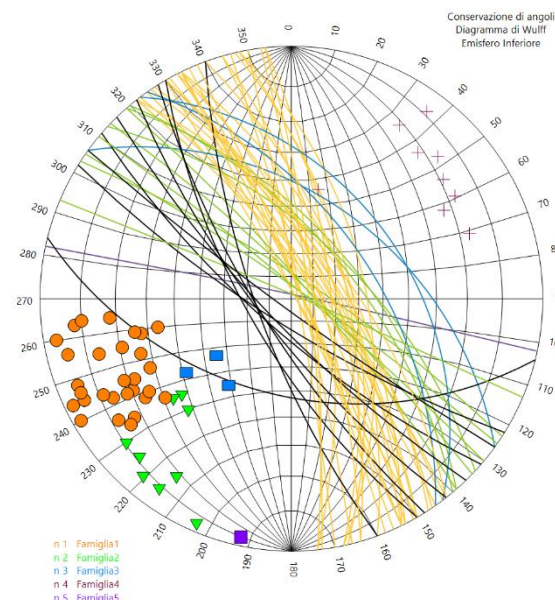


Figura 27 - Diagramma di Wulff con le tracce ciclografiche e i nodi delle discontinuità misurate alla stazione GM2.

Come si osserva dai diagrammi in Figura 27, la Famiglia 1, che costituisce il gruppo di discontinuità più rappresentativo, con 31 occorrenze, assume una giacitura media di 66°/75°; la Famiglia 2 e la Famiglia 3, la prima con 9 occorrenze e la seconda con 3, hanno giacitura simile in termini di direzione di immersione, ma con inclinazioni diverse, rispettivamente 41°/76° e 45°/44°. Altre famiglie sono la Famiglia 4 (9 occorrenze), con giacitura media 221°/74° e la Famiglia 5 (1 occorrenza) con giacitura 12°/88°.

Da un punto di vista dell'analisi statistica di apertura, spaziatura e persistenza, si possono fare le seguenti osservazioni.

In termini di apertura, le famiglie 1 e 2 tendono ad avere prevalentemente valori bassi, fra 1 e 3 mm, con rari casi di aperture metriche come quella, appartenente alla Famiglia 1, osservata alla

progressiva 4,60 m della scan line. La Famiglia 3 presenta soprattutto aperture piccole, prevalentemente 2 mm.

La spaziatura, per la Famiglia 1, è mediamente pari a 1,30 m, per la Famiglia 2 è maggiore, intorno a 2,50 m, mentre per la Famiglia 3 è circa 2,20 m.

Per quanto riguarda la persistenza, i giunti appartenenti alle famiglie 1 e 2 hanno prevalentemente tracce corte, nell'intervallo 1-3 m, mentre la Famiglia 3 presenta soprattutto giunti con persistenza maggiore, fra 3 e 10 m.

SCHEDA DI CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA DELLE DISCONTINUITA'																		
dati generali							affioramento				stendimento							
Progetto: S.Stefano			Committente: GEOAPP				Immersione (°): vedi note				ID stendimento: GM2							
N. Scheda: 2			Rilevatore/i: PAG, ND				Inclinazione (°): vedi note				Immersione (°):							
Località: Marinella (approdo Data rilevamento: 16/02/23)							Altezza (m): da 6 a 8				Inclinazione (°):							
Stazione: GM2							Formazione:				Lunghezza (m): 39,5							
ID GPS: GM2							Litologia:											
N.	intersezione		orientazione			persistenza		apertura		rugosità		resistenza			riempim.		filtrazione	
	x (m)	tipo (1)	α (°)	β (°)	stria (°)	termin. (2)	traccia (m)	A (mm)	tipo (3)	JRC (1-20)	stima (4)	sclerometro orient.	R	degrad. (5)	tipo (6)	resist. (4)	tipo (7)	portata l/min
1	0,56	JN	12	88	-	xd	1	1	2	18	R3			0	3 S3	F2	-	
2	0,89	JN	80	87	-	dx	5	15	2	16	R3			0	3 S3	F2	-	
3	1,64	JN	76	85	-	dd	5	3	2	18	R3			0	3 S3	F2	-	
4	1,85	JN	84	72	-	dd	2	5	2	14	R3			0	3 S3	F2	-	
5	2,00	JN	78	57	-	rd	0,3	1	2	14	R3			0	0	-	U2	-
6	2,20	JN	64	85	-	dd	2	2	2	16	R3			0	3 S3	F2	-	
7	2,80	JN	56	70	-	rd	3	3	2	18	R3			0	3 S3	F2	-	
8	3,18	JN	55	80	-	dd	2	2	2	16	R3			0	3 E0	F2	-	
9	3,67	JN	44	82	-	dd	1,5	2	2	16	R3			0	3 S3	F2	-	
10	4,60	JN	60	88	-	xx	>20	1000	2	20	R4			0	3 S3	F5	-	
11	5,28	JN	64	64	-	dd	2	3	2	12	R4			0	3 S3	F5	-	
12	5,46	JN	53	76	-	dd	2	4	2	14	R4			0	3 S3	F2	-	
13	5,96	JN	33	80	-	dd	2	18	2	14	R4			0	0	-	U2	-
14	6,43	JN	57	68	-	rr	1	1	2	14	R4			0	0	-	U2	-
15	6,79	JN	49	60	-	dd	1,5	3	2	18	R4			0	0	-	U2	-
16	6,90	JN	83	82	-	dd	1,5	2	2	18	R4			0	0	-	U2	-
17	7,12	JN	77	63	-	dd	1,5	1	2	18	R4			0	0	-	U2	-
18	7,39	JN	78	65	-	dd	1,5	2	2	18	R4			0	3 S3	F2	-	
19	7,67	JN	74	70	-	dd	1,5	1	2	18	R4			0	0	-	U2	-
20	8,27	JN	60	72	-	rd	2	180	2	16	R4			0	3 S3	F5	-	
21	8,69	JN	49	82	-	rr	2	2	2	16	R4			0	3 S3	F5	-	
22	9,40	JN	64	85	-	xx	>20	150	2	18	R4			0	3 S3	F5	-	
23	9,86	JN	52	78	-	dx	15	3	2	16	R4			0	3 S3	F5	-	
24	10,11	JN	36	46	-	dr	3	2	2	14	R4			0	0	-	U2	-
25	10,21	JN	43	62	-	dd	1,5	2	2	18	R4			0	0	-	U2	-
26	10,72	JN	63	70	-	dr	3	3	2	14	R4			0	0	-	U2	-
27	11,35	JN	60	74	-	dd	2	2	2	16	R4			0	0	-	U2	-
28	11,70	JN	35	85	-	dd	2	3	2	18	R4			0	0	-	U2	-
29	11,95	JN	55	54	-	dd	4	2	2	18	R4			0	0	-	U2	-
30	12,26	JN	50	63	-	dd	4	2	2	16	R4			0	0	-	U2	-
31	12,93	JN	70	65	-	xx	>20	50	2	18	R4			0	0	-	U2	-
32	14,08	JN	194	48	-	dd	1	1	2	16	R3			0	0	-	U2	-
33	14,54	JN	61	78	-	dx	20	3	2	14	R4			0	3 S3	F5	-	
34	15,44	JN	221	75	-	dx	20	2	2	16	R4			0	3 S3	F5	-	
35	15,92	JN	53	41	-	xd	20	20	2	16	R4			0	0	-	U2	-
36	18,50	JN	212	78	-	xx	20	10	2	14	R3			0	3 S3	F5	-	
37	19,34	JN	64	73	-	dd	4	5	2	16	R3			0	0	-	U2	-
38	19,75	JN	40	85	-	dd	3	3	2	16	R3			0	0	-	U2	-
39	20,13	JN	250	74	-	rd	5	2	2	16	R3			0	0	-	U2	-
40	21,90	JN	68	85	-	xx	20	20	2	18	R4			0	0	-	U2	-
41	23,83	JN	23	88	-	dd	10	30	2	14	R5			0	0	-	U2	-
42	25,15	JN	63	80	-	dd	7	20	2	16	R5			0	0	-	U2	-
43	26,45	JN	238	75	-	rd	6	15	2	12	R5			0	0	-	U2	-
44	27,15	JN	216	85	-	rd	2	2	2	16	R5			0	0	-	U2	-
45	27,82	JN	52	65	-	rx	7	3	2	16	R5			0	0	-	U2	-
46	29,00	JN	66	85	-	rd	4	1	2	16	R5			0	0	-	U2	-
47	29,50	JN	240	70	-	rx	>10	1	2	18	R4			0	0	-	U2	-
48	30,30	JN	232	75	-	rx	>10	15	2	16	R3			0	3 S3	F5	-	
49	32,20	JN	226	78	-	rx	>10	10	2	16	R3			0	0	-	U2	-
50	33,57	JN	64	88	-	xx	10	25	2	12	R4			0	0	-	U2	-
51	36,90	JN	74	77	-	rd	2	2	2	18	R3			0	0	-	U2	-
52	38,90	JN	84	80	-	xx	>20	150	2	14	R4			0	3 S3	F4	-	
53																		
54	BG		197	10														
55																		

Note:
 giacitura affioramento. da 0,00 a 20,00 m: 315°/65°; da 20,00 a 39,50 m: 336°/80°
 le terminazioni sono prese in ordine da monte verso valle
 dalla misura 10 in poi si osserva un cambio di facies

Famiglie di discontinuità:

Famiglia 1
Famiglia 2
Famiglia 3
Famiglia 4
Famiglia 5

(1) tipo discont. BG - stratificazione JN - giunto FL - faglia FR - fessura FS - fessilità ST - stitilità SC - scistosità CL - clivaggio FO - foliazione VN - vena SH - zona di taglio	(2) terminazione x - oltre affioramento r - contro roccia d - contro discontin. (3) tipo rugosità S - a gradini U - ondulato P - planare 1 - liscio 2 - scabro 3 - striato	(4) resistenza S1 - molto molle (<25kPa) S1 - molto molle (<25kPa) S2 - molle (25-50kPa) S3 - moder. consist. (50-100kPa) S4 - consistente (100-250kPa) S5 - molto consistente (250-500kPa) S6 - estrem. consistente (>500kPa) R0 - estrem. debole (<1MPa) R1 - molto debole (1-5MPa) R2 - debole (5-25MPa) R3 - moder. resistente (25-50MPa) R4 - resistente (50-100MPa) R5 - molto resistente (100-250MPa) R6 - estrem. resistente (>250MPa)	(5) degradazione 0 - fresca 1 - decolorata 2 - decomposta 3 - disgregata (6) riempimento 0 - assente 1 - coloraz. superficiale 2 - terra coesiva 3 - terra granulare 4 - cementazione 7 - calcite 8 - clorite, talco, gesso 9 - altro (specificare)	(7) filtrazione <i>Senza riempimento</i> U1 - chiusa/secca U2 - aperta asciutta U3 - aperta tracce flusso U4 - aperta umida U5 - aperta bagnata U6 - flusso continuo <i>Riempimento</i> F1 - asciutto F2 - umido F3 - bagnato F4 - tracce dilavato F5 - localmente dilavato F6 - complet. dilavato
--	--	---	--	---

Figura 28 - Scheda di rilevamento della stazione geomeccanica GM2.

Stazione Geomeccanica GM3 (Sentiero a monte dell'approdo "Marinella")

La stazione geomeccanica GM3 è stata realizzata presso l'approdo "Marinella", lungo il sentiero che porta al carcere, appena sopra alla parete rilevata alla stazione GM2 (Figura 9, Figura 10 e Figura 11).

Lo stendimento, di lunghezza pari a 15,4 m e orientato nordest – sudovest, è stato posto lungo la parete di monte che sovrasta il sentiero, avente un'altezza variabile fra i 3 e i 4 metri. La giacitura del pendio è costante ed è pari a $303^\circ/85^\circ$ (come da scheda di rilevamento riportata in Figura 30).

Le rocce affioranti nel sito in questione possono essere attribuite al membro SS2 della Formazione di Santo Stefano, costituito da piroclastiti massive con depositi pomicei. Come nelle precedenti stazioni, anche qui le discontinuità osservate possono essere attribuite geneticamente ad eventi di raffreddamento del materiale vulcanico.

Le discontinuità osservate sono raggruppabili in due famiglie principali e due occasionali.

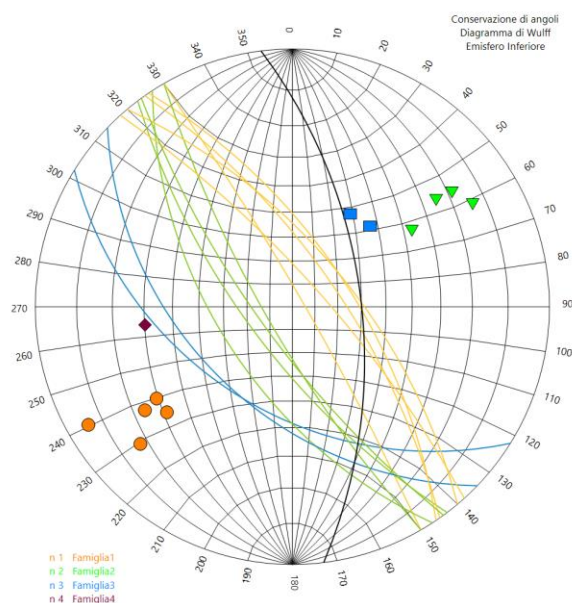


Figura 29 - Diagramma di Wulff con le tracce ciclografiche e i nodi delle discontinuità misurate alla stazione GM3.

La Famiglia 1 risulta l'insieme di discontinuità più rappresentativo (Figura 29), con 5 occorrenze. La sua giacitura media è $54^\circ/72^\circ$ ed è correlabile alla Famiglia 1 della sottostante stazione GM2 avente giacitura media $66^\circ/75^\circ$.

La Famiglia 2, seconda in termini di rappresentatività, con 4 occorrenze, ha una giacitura media di $236^\circ/70^\circ$. Tale insieme potrebbe essere correlabile alla Famiglia 4 della stazione GM2, con giacitura $221^\circ/75^\circ$.

Occasionali risultano le famiglie 3 e 4, rispettivamente con 2 e 1 occorrenze e giacitura media di $218^\circ/47^\circ$ e $83^\circ/60^\circ$.

Per quanto riguarda l'analisi statistica di apertura, spaziatura e persistenza, si fanno le seguenti considerazioni.

L'apertura, per la Famiglia 1, è prevalentemente di 2 mm, con anche un paio di occorrenze a 20 mm. La Famiglia 2 presenta invece valori di apertura maggiori, mediamente pari a 25 mm con un valore massimo di 60 mm.

La spaziatura media per la Famiglia 1 è intorno a 2,10 m, mentre per la Famiglia 2 è di 2,60 m.

Riguardo alla persistenza, le due famiglie principali hanno valori prevalenti nell'intervallo 3-10 m, con una buona rappresentatività anche nell'intervallo inferiore tra 1 e 3 m.

SCHEDA DI CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA DELLE DISCONTINUITA'																	
dati generali							affioramento				stendimento						
Progetto: S. Stefano			Committente: GEOAPP				Immersione (°): 303				ID stendimento: GM3						
N. Scheda: 3			Rilevatore/i: PAG, ND				Inclinazione (°): 85				Immersione (°):						
Località: Marinella (sentiero) Data rilevamento: 16/02/23							Altezza (m): da 3 a 4				Inclinazione (°):						
Stazione: GM3			N. Foto:				Formazione:				Lunghezza (m): 15,4						
ID GPS: GM3							Litologia:										
intersezione		orientazione			persistenza		apertura	rugosità		resistenza			riempim.		filtrazione		
N.	x (m)	tipo (1)	α (°)	β (°)	stria (°)	termin. (2)	traccia (m)	A (mm)	tipo (3)	JRC 1-20	stima (4)	sclerometro orient. R	degrad. (5)	tipo (6)	resist. (4)	tipo (7)	portata l/min
1	3,00	JN	212	46	-	xd	4,0	10	2	18	R3		0	3	S3	F5	-
2	3,37	JN	60	85	-	xx	6,0	20	2	18	R3		0	3	S3	F5	-
3	5,47	JN	233	70	-	rx	2,5	1	2	18	R3		0	0		U2	-
4	7,03	JN	55	70	-	dx	2,0	2	2	16	R3		0	3	S3	F5	-
5	7,30	JN	237	58	-	xx	6,0	30	2	14	R4		0	3	S3	F5	-
6	8,28	JN	224	47	-	dx	5,0	45	2	18	R4		0	3	S3	F5	-
7	9,55	JN	56	65	-	dx	4,0	2	2	18	R4		0	3	S3	F2	-
8	10,10	JN	240	78	-	xx	5,0	60	2	16	R4		0	3	S3	F5	-
9	12,06	JN	48	77	-	xx	3,0	20	2	18	R4		0	3	S4	F2	-
10	12,30	JN	50	65	-	rd	1,0	2	2	18	R4		0	3	S4	F2	-
11	13,73	JN	234	75	-	rx	2,5	10	2	18	R3		0	3	S3	F2	-
12	14,32	JN	83	60	-	rx	2,0	10	2	16	R3		0	3	S3	F2	-
13																	
14																	
15																	
16																	
17																	
18																	
19																	
20																	
21																	
22																	
23																	
24																	
25																	
26																	
27																	
28																	
29																	
30																	
31																	
32																	
33																	
34																	
35																	
36																	
37																	
38																	
39																	
40																	
41																	
42																	
43																	
44																	
45																	
46																	
47																	
48																	
49																	
50																	

Note:
le terminazioni sono prese in ordine da monte verso valle

Famiglie di discontinuità:

Famiglia 1
Famiglia 2
Famiglia 3
Famiglia 4

(1) tipo discont. BG - stratificazione JN - giunto FL - faglia FR - fessura FS - fessilità ST - stiolite SC - scistosità CL - clivaggio FO - foliazione VN - vena SH - zona di taglio	(2) terminazione x - oltre affioramento r - contro roccia d - contro discontin. (3) tipo rugosità S - a gradini U - ondulato P - planare 1 - liscio 2 - scabro 3 - striato	(4) resistenza S1 - molto molle (<25kPa) S1 - molto molle (<25kPa) S2 - molle (25-50kPa) S3 - moder. consist. (50-100kPa) S4 - consistente (100-250kPa) S5 - molto consistente (250-500kPa) S6 - estem. consistente (>500kPa) R0 - estrem. debole (<1MPa) R1 - molto debole (1-5MPa) R2 - debole (5-25MPa) R3 - moder. resistente (25-50MPa) R4 - resistente (50-100MPa) R5 - molto resistente (100-250MPa) R6 - estrem. resistente (>250MPa)	(5) degradazione 0 - fresca 1 - decolorata 2 - decomposta 3 - disgregata (6) riempimento 0 - assente 1 - coloraz. superficiale 2 - terra coesiva 3 - terra granulare 4 - cementazione 7 - calcite 8 - clorite, talco, gesso 9 - altro (specificare)	(7) filtrazione Senza riempimento U1 - chiusa/secca U2 - aperta asciutta U3 - aperta tracce flusso U4 - aperta umida U5 - aperta bagnata U6 - flusso continuo Riempimento F1 - asciutto F2 - umido F3 - bagnato F4 - tracce dilavamento F5 - localmente dilavato F6 - complet. dilavato
--	--	---	--	---

Figura 30 - Scheda di rilevamento della stazione geomeccanica GM3.

Stazione Geostrutturale GS4 (Cavità artificiale presso l'approdo "Marinella")

Alla stazione GS4, ubicata all'interno di una cavità artificiale presso l'approdo Marinella, sono state effettuate varie misure di giacitura di discontinuità ma non è stato possibile, per le condizioni del luogo, eseguire un vero e proprio stendimento geomeccanico. Per questo motivo la stazione è da considerarsi di tipo geostrutturale (vedi scheda di rilevamento riportata in Figura 32).

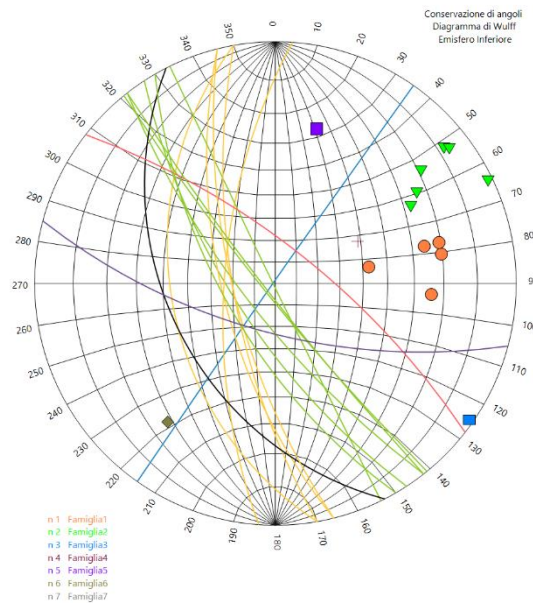


Figura 31 - Diagramma di Wulff con le tracce ciclografiche e i nodi delle discontinuità misurate alla stazione GS4.

Alla stazione GS4 sono state riconosciute essenzialmente due famiglie di discontinuità principali. Sono state misurate anche altre giaciture di discontinuità singole, non raggruppabili in famiglie con i dati a disposizione (sebbene riportate nel diagramma di Figura 31 e nella scheda di rilevamento di Figura 32 come "Famiglie" da 3 a 7).

La Famiglia 2 risulta essere la più rappresentativa, con 6 occorrenze, ed ha una giacitura media di $236^{\circ}/78^{\circ}$. Si nota a tal proposito la congruenza di assetto con la Famiglia 2 misurata alla stazione GM3 ($236^{\circ}/70^{\circ}$) e probabilmente la Famiglia 4 della stazione GM2 ($221^{\circ}/74^{\circ}$), tant'è che le tre famiglie possono tentativamente essere considerate appartenere al medesimo trend.

La Famiglia 1, seconda in rappresentatività con 4 occorrenze, ha una giacitura media di $262^{\circ}/68^{\circ}$, vicina a quella della Famiglia 2, ma più spostata verso ovest.

Altre discontinuità misurate sono simili in direzione di immersione a quelle delle famiglie 1 e 2 (243° e 260° rispettivamente), ma presentano inclinazioni minori intorno a 40° (analogamente a quanto osservato anche alle altre stazioni).

SCHEDA DI CARATTERIZZAZIONE GEOMECCANICA DELLE DISCONTINUITA'																	
dati generali									affioramento				stendimento				
Progetto: S.Stefano			Committente: GEOAPP			Immersione (°):				ID stendimento:							
N. Scheda 4			Rilevatore/i: PAG, ND			Inclinazione (°):				Immersione (°):							
Località: Marinella (grotta)			Data rilevamento: 16/02/23			Altezza (m):				Inclinazione (°):							
Stazione: GS4			N. Foto:			Formazione:				Lunghezza (m):							
ID GPS:									Litologia:								
intersezione		orientazione			persistenza		apertura	rugosità		resistenza			riempim.		filtrazione		
N.	x (m)	tipo (1)	α (°)	β (°)	stria	termin. (2)	traccia (m)	A (mm)	tipo (3)	JRC 1-20	stima (4)	sclerometro orient. R	degrad. (5)	tipo (6)	resist. (4)	tipo (7)	portata l/min
1	-	JN	260	43	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2	-	JN	305	89	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	-	JN	237	70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4	-	JN	256	65	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	-	JN	274	66	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6	-	JN	244	89	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
7	-	JN	260	70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	-	JN	232	75	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9	-	JN	231	84	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10	-	JN	243	42	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
11	-	JN	38	72	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
12	-	JN	256	70	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
13	-	JN	232	85	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
14	-	JN	240	66	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
15	-	JN	195	67	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16																	
17																	
18																	
19																	
20																	
21																	
22																	
23																	
24																	
25																	
26																	
27																	
28																	
29																	
30																	
31																	
32																	
33																	
34																	
35																	
36																	
37																	
38																	
39																	
40																	
41																	
42																	
43																	
44																	
45																	
46																	
47																	
48																	
49																	
50																	

Note:
 Alla presente stazione sono stati misurati solo parametri geostruturali
 Le misure da 1 a 6 sono prese sulla parete dx entrando; quelle da 7 a 8 sulla parete sx entrando; quelle da 9 a 11 sulla parete sx della camera lunga; quelle da 12 a 15 sulla parete dx della camera lunga (lato mare)

Famiglie di discontinuità:

Famiglia 1
Famiglia 2
Famiglia 3
Famiglia 4
Famiglia 5
Famiglia 6
Famiglia 7

FS - fessilità	(3) tipo rugosità	S4 - consistente (100-250kPa)	(6) riempimento	U4 - aperta umida
ST - stiolite	S - a gradini	S5 - molto consistente (250-500kPa)	0 - assente	U5 - aperta bagnata
SC - scistosità	U - ondulato	S6 - estrem. consistente (>500kPa)	1 - coloraz. superficiale	U6 - flusso continuo
CL - clivaggio	P - planare	R0 - estrem. debole (<1MPa)	2 - terra coesiva	Riempimento
FO - foliazione	1 - liscio	R1 - molto debole (1-5MPa)	3 - terra granulare	F1 - asciutto
VN - vena	2 - scabro	R2 - debole (5-25MPa)	4 - cementazione	F2 - umido
SH - zona di taglio	3 - striato	R3 - moder. resistente (25-50MPa)	7 - calcite	F3 - bagnato
		R4 - resistente (50-100MPa)	8 - clorite, talco, gesso	F4 - tracce dilavamento
		R5 - molto resistente (100-250MPa)	9 - altro (specificare)	F5 - localmente dilavato
		R6 - estrem. resistente (>250MPa)		F6 - complet. dilavato

Figura 32 - Scheda di rilevamento della stazione geostruturale GS4.

4.2.2 Classificazione dell'ammasso: metodo di Bieniawski

I dati ricavati dal rilievo geomeccanico sono stati utilizzati per la determinazione della qualità dell'ammasso roccioso, esprimibile attraverso appositi indici, che hanno lo scopo di permettere una valutazione delle caratteristiche meccaniche dell'ammasso nel suo complesso. Il metodo prescelto è quello di Bieniawski.

Nel campo della progettazione di infrastrutture di ingegneria civile, siano esse legate alla stabilità di un versante o alla stabilità di un'opera in sotterraneo, difficilmente si possono avere informazioni dettagliate sulle caratteristiche di resistenza e di deformabilità dell'ammasso roccioso interessato alla progettazione. Allora diventa importante poter utilizzare uno schema che possa soddisfare le richieste, un metodo empirico che permetta di risolvere i problemi dovuti alla scarsa conoscenza o esperienza di una determinata area.

Per consentire di soddisfare i quesiti richiesti e le problematiche relative alla caratterizzazione degli ammassi rocciosi, si è applicato il metodo di classificazione di Bieniawski, *Rock Mass Rating* (RMR) (Bieniawski, 1989), nato per risolvere problematiche legate alle gallerie ma in seguito esteso da Romana (1995) a valutazioni di stabilità dei pendii, con la formulazione dello *Slope Mass Rating* (SMR). Il metodo di calcolo dell'RMR utilizza cinque o sei parametri, denominati da A1 ad A6, per giungere rispettivamente al cosiddetto indice RMR base (RMR_b) e all'RMR corretto (RMR_c). I parametri in questione sono elencati di seguito:

- 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.

L'indice *Rock Mass Rating* base (RMR_b) si ottiene quindi da:

$$RMR_b = A1 + A2 + A3 + A4 + A5$$

L'indice RMR corretto è invece dato da:

$$RMR_c = A1 + A2 + A3 + A4 + A5 + A6$$

Nel caso in esame, si è valutato l'indice RMR base, espresso attraverso un punteggio che fornisce una valutazione della qualità dell'ammasso; tale numero, variabile fra 0 e 100, è tanto più alto quanto migliore è la qualità della roccia. È possibile individuare 5 classi per ciascuna delle quali viene riportato un giudizio di qualità: Ottima – Buona – Mediocre – Scadente – Molto scadente.

Nei successivi paragrafi viene illustrata la procedura di calcolo dei parametri che concorrono alla determinazione degli indici RMR base e SMR.

4.2.2.1 Determinazione di A1

A1 si può ricavare da prove speditive applicando il codice Standard ISRM, definendo la resistenza a compressione uniaassiale S_u .

Nel caso manchino prove di campagna con martello di Schmidt o analisi di laboratorio (*Point Load Test*), il valore di S_u può essere stimata osservando la risposta della roccia alla sua percussione con il martello da geologo, secondo il *Manual index test* illustrato nella Tabella 7.

Definita la resistenza a compressione S_u è possibile ricavare il valore del primo parametro A1.

Utilizzando lo Standard ISRM si usa pertanto la tabella proposta da Bieniawsky 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

Tabella 7 - Relazione fra intervalli di S_u e coefficiente A1.

Dai calcoli così impostati si ricavano i seguenti valori di A1 per le tre stazioni geomeccaniche:

Stazione GM1

Per GM1 (vedere scheda rilevamento allegata) si ha una stima della resistenza esclusivamente in classe R3, da cui deriva un intervallo di valori di S_u pari a 25-50 MPa, da cui si ricava:

$$A1_{GM1} = 4$$

Stazione GM2

Alla stazione GM2 si hanno stime diverse della resistenza, nelle classi R3, R4 e R5, per cui è stata applicato un metodo per calcolare un valore medio di S_u in base alle classi di resistenza del *Manual index test*. Da esso è risultata essere rappresentativa per la stazione la classe R4, corrispondente ad un intervallo di valori di S_u pari a 50 – 100 MPa, da cui si deriva:

$$A1_{GM2} = 7$$

Stazione GM3

Anche alla stazione GM3 si hanno stime diverse della resistenza, nelle classi R3 e R4, da cui, applicando una media, si ha la classe R4 come più rappresentativa per la stazione. Risulta quindi:

$$A1_{GM3} = 7$$

4.2.2.2 Determinazione di A2

Il coefficiente A2 è funzione dell'indice RQD (*Rock Quality Designation Index*), che normalmente è determinato attraverso la valutazione della percentuale di recupero delle carote di sondaggio (Tabella 8). In mancanza di queste ultime, vi sono vari metodi indiretti per il calcolo di RQD.

Un primo criterio (Palmstrom, 1982) lega approssimativamente RQD al valore del *Volumetric Joint Count* (J_v), ossia la somma del numero di discontinuità per metro cubo di roccia, così come segue:

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

J_v è dato da:

$$J_v = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2} + \frac{1}{S_3} + \dots + \frac{1}{S_n}$$

Dove $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$ sono le spazature delle discontinuità

Palmstrom nel 2005 ha proposto una variante al calcolo di RQD, considerando la forma dei blocchi. La formula suddetta risulterebbe più appropriata per blocchi lunghi o piatti, mentre, per forme cubiche, risulta più attendibile la seguente formula:

$$RQD = 110 - 2,5 \cdot J_v$$

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

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

Dove n rappresenta il numero medio di giunti per metro.

Una volta calcolato RQD con uno dei suddetti metodi, si ricava il coefficiente A_2 mediante le equazioni contenute nella Tabella 8, derivanti dai diagrammi di Beniaowski (1989)

Valore di RQD (%)	Equazioni per il calcolo di A_2
$RQD \leq 26,5$	$A_2 = \frac{3}{26,6} RQD + 3$
$26,5 \leq RQD \leq 39,0$	$A_2 = \frac{2}{12,4} RQD + 1,71$
$39,0 \leq RQD \leq 76,6$	$A_2 = \frac{7}{37,6} RQD + 0,739$
$RQD > 76,6$	$A_2 = \frac{5}{23,4} RQD - 1,367$

Tabella 8 - Relazioni fra RQD e il coefficiente A_2 .

Data la maggiore applicabilità del metodo di Priest & Hudson al contesto in oggetto, si è deciso di applicare quest'ultimo per il calcolo di RQD e, conseguentemente, di A_2 , ottenendo i seguenti risultati:

Stazione GM1

RQD = 99,50%

$A_2 = 19,89$

Stazione GM2

RQD = 99,21%

$A_2 = 19,83$

Stazione GM3

RQD = 99,71%

$A_2 = 19,94$

4.2.2.3 Determinazione di A3

Il coefficiente A3 dipende dalla spaziatura media, ossia dalla distanza media che intercorre fra due discontinuità adiacenti appartenenti alla stessa famiglia, misurata perpendicolarmente al piano di discontinuità.

Al fine di ottenere il valore di spaziatura media, dai dati raccolti sul terreno per ogni stazione di rilevamento geomeccanico, sono state eseguite le seguenti elaborazioni:

- Sono state identificate le varie famiglie di discontinuità per ogni stazione sulla base degli stereogrammi.
- È stata misurata la spaziatura fra discontinuità adiacenti appartenenti alla stessa famiglia, tenendo conto dell'angolo formato fra la discontinuità e la scan line
- Per ogni famiglia di discontinuità è stata calcolata la spaziatura media.
- È stata infine calcolata la spaziatura media per l'intera scan line.

Una volta ricavata la spaziatura media (\bar{s}), il valore del coefficiente A3 è stato calcolato utilizzando le relazioni contenute nella Tabella 9.

Spaziatura media (m)	Equazione per il calcolo di A3
$s \leq 0,20$	$A3 = 15 s + 5$
$0,20 \leq s \leq 0,40$	$A3 = 10 s + 6$
$0,40 \leq s \leq 0,66$	$A3 = 7,752 s + 5,9$
$0,66 \leq s \leq 0,94$	$A3 = 7,067 s + 7,35$
$0,94 \leq s \leq 1,60$	$A3 = 6,07 s + 8,288$
$1,60 \leq s \leq 2,00$	$A3 = 5 s + 10$
$s > 2,00$	$A3=20$

Tabella 9 - Relazioni fra spaziatura s e il coefficiente A3.

Applicando le equazioni in Tabella 9, si è calcolato A3 come segue.

Stazione GM1

$$\bar{s} = 1,31 \text{ m}$$

$$A3_{GM1} = \mathbf{16,54}$$

Stazione GM2

$$\bar{s} = 2,13 \text{ m}$$

$$A3_{GM2} = \mathbf{20,00}$$

Stazione GM3

$$\bar{s} = 2,85 \text{ m}$$

$$A3_{GM3} = \mathbf{20,00}$$

4.2.2.4 Determinazione di A4

La valutazione di A4 viene fatta a partire da cinque parametri numerici correlati ad altrettante proprietà dei giunti, in particolare:

V1, correlato alla persistenza secondo la seguente tabella (Tabella 10):

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

Tabella 10 - Relazioni fra parametro V1 e persistenza.

Nel caso in esame, si ha:

Stazione GM1

$$V1_{GM1} = 2$$

Stazione GM2

$$V1_{GM2} = 2$$

Stazione GM3

$$V1_{GM3} = 2$$

V2 correlato all'apertura secondo la Tabella 11:

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

Tabella 11 - Relazioni fra parametro V2 e apertura.

In questo caso, a causa delle aperture mediamente piuttosto grandi, si ha:

Stazione GM1

$$V2_{GM1} = 0$$

Stazione GM2

$$V2_{GM2} = 0$$

Stazione GM3

$$V2_{GM3} = 0$$

V3 è legato alla rugosità secondo la Tabella 12:

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

Tabella 12 - Relazioni fra parametro V3 e rugosità.

In tutte e tre le stazioni le discontinuità si presentano sempre con la caratteristica di essere “Rugose”, da cui il valore costante di V3 per GM1, GM2 e GM3 di 5

Stazione GM1

$$V3_{GM1} = 5$$

Stazione GM2

$$V3_{GM2} = 5$$

Stazione GM3

$$V3_{GM3} = 5$$

V4, relativo all'alterazione delle pareti della discontinuità, è ad essa correlata come da Tabella 13:

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

Tabella 13 - Relazioni fra parametro V4 e alterazione.

Tutte e tre le stazioni presentano pareti delle discontinuità non alterate, da cui si ricava un valore costante di V4 uguale a 6.

Stazione GM1

$$V4_{GM1} = 6$$

Stazione GM2

$$V4_{GM2} = 6$$

Stazione GM3

$$V4_{GM3} = 6$$

Infine, il parametro V5 è correlato al riempimento sulla base della seguente tabella (Tabella 14):

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

Tabella 14 - Relazioni fra parametro V5 e riempimento.

Nel caso in esame si hanno condizioni di riempimento diverse per le tre stazioni, come di seguito illustrato.

Stazione GM1

È presente nella quasi totalità delle discontinuità riempimento soffice con spessori maggiori di 5 mm, da cui:

$$V5_{GM1} = 0$$

Stazione GM2

Le discontinuità presentano in prevalenza assenza di riempimento, quindi:

$$V5_{GM2} = 6$$

Stazione GM3

Le discontinuità sono quasi totalmente occupate da riempimento soffice con spessore maggiore di 5 mm, per cui:

$$V5_{GM3} = 0$$

In conclusione, quindi, è possibile calcolare il valore di A4 mediante la seguente equazione:

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

Da cui si hanno, per ciascuna stazione, i seguenti valori del parametro:

Stazione GM1

$$A4_{GM1} = 13$$

Stazione GM2

$$A4_{GM2} = 19$$

Stazione GM3

$$A4_{GM3} = 13$$

4.2.2.5 Determinazione di A5

Questo valore viene derivato dalle condizioni idrauliche riferite ad un fronte di lunghezza pari a 10 m. Dalle tabelle fornite da Bieniawski si ottiene (Tabella 15):

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

Tabella 15 - Valore del coefficiente A5 in funzione delle condizioni idrauliche riferite ad un fronte di lunghezza pari a 10 m secondo Bieniawski .

In tutte le tre stazioni si sono evidenziate esclusivamente condizioni asciutte, per cui il valore del parametro risulta ovunque $A5 = 15$.

Stazione GM1

$$A5_{GM1} = 15$$

Stazione GM2

$$A5_{GM2} = 15$$

Stazione GM3

$$A5_{GM3} = 15$$

4.2.2.6 Valore di RMR e parametri caratteristici dell'ammasso

Attribuiti tutti i coefficienti, sulla base del valore RMR base calcolato si identificano 5 intervalli a cui corrispondono 5 classi di qualità caratterizzanti l'ammasso roccioso, oltre a parametri geotecnici della roccia quali la coesione e l'angolo di attrito (Tabella 16):

RMR _b	100 - 81	80 - 61	60 - 41	40 - 21	<= 20
Classe	I	II	III	IV	V
Qualità dell'ammasso	Molto buono	Buono	Mediocre	Scadente	Molto scadente
Coesione c(MPa)	> 0,4	0,3 - 0,4	0,2 - 0,3	0,1 - 0,2	< 0,1
Angolo di attrito φ (°)	< 45	33 - 45	25 - 35	15 - 25	< 15

Tabella 16 - Classi di qualità dell'ammasso roccioso, valori di coesione e angolo di attrito ricavabili in funzione del valore di RMR_b.

La somma di tutti i parametri suddetti (A1+A2+A3+A4+A5) permette di ottenere i seguenti valori dell'indice RMR di base:

GM1 RMR_b = **68,4**

GM2 RMR_b = **80,8**

GM3 RMR_b = **74,9**

Tali valori attribuiscono, nel caso specifico, una **Classe II (Buona)** di qualità agli ammassi rocciosi relativi a tutte le tre stazioni rilevate.

4.3 Rilievo geomeccanico da remoto

Il rilievo geo-meccanico tradizionale risulta fortemente limitato se l'area da investigare è impervia o irraggiungibile, inoltre nel caso di ammassi molto estesi può fornire risultati parziali vincolati all'accessibilità degli affioramenti. La possibilità di integrare tali indagini con misurazioni effettuate su nuvole di punti a d altissima risoluzione consente di ottenere risultati più accurati sui sistemi di discontinuità sia relativamente al riconoscimento delle famiglie presenti che dei dati di persistenza e spaziatura.

Nel caso specifico i dati del rilievo geomeccanico tradizionale sono stati integrati con il riconoscimento delle discontinuità effettuato sulle nuvole di punti ottenute integrando 13 scansioni *laser scanner* da terra con i risultati del rilievo aereofotogrammetrico effettuato da drone. Tale metodologia ha consentito di estrarre informazioni geometriche accurate, utili per la ricostruzione e la caratterizzazione dell'ammasso roccioso.

L'analisi è stata effettuata per ciascuno dei due scali rilevati tramite l'utilizzo dei rilievi *laser* e aereofotogrammetrici, ed ha consentito di estrarre 245 superfici di discontinuità, 164 per lo scalo Marinella e 81 per lo Scalo n.4. Nello specifico l'estrazione dei piani di discontinuità è stata effettuata manualmente interpolando singolarmente, tramite superfici planari, le porzioni delle nuvole di punti appartenenti alla stessa discontinuità. L'utilizzo dell'estrazione manuale si è resa necessaria considerando che le discontinuità non danno origine a piani evidenti. Questo ha consentito di

estrapolare successivamente oltre ai parametri di orientazione anche i valori di persistenza delle discontinuità individuate.

I poligoni 3D che delimitano i piani di discontinuità con persistenza maggiore di 15 cm così individuati sono riportati in Figura 34 e Figura 35, mentre in e Figura 36 e Figura 37 sono riportati i poli e le relative linee di isodensità considerando anche i piani determinati tramite il rilievo geomeccanico classico .



Figura 32 - Nuvola di punti relativa allo Scalo 4 utilizzata per la ricerca dei piani di discontinuità.



Figura 33 - Nuvola di punti relativa allo scalo Marinella utilizzata per la ricerca dei piani di discontinuità.

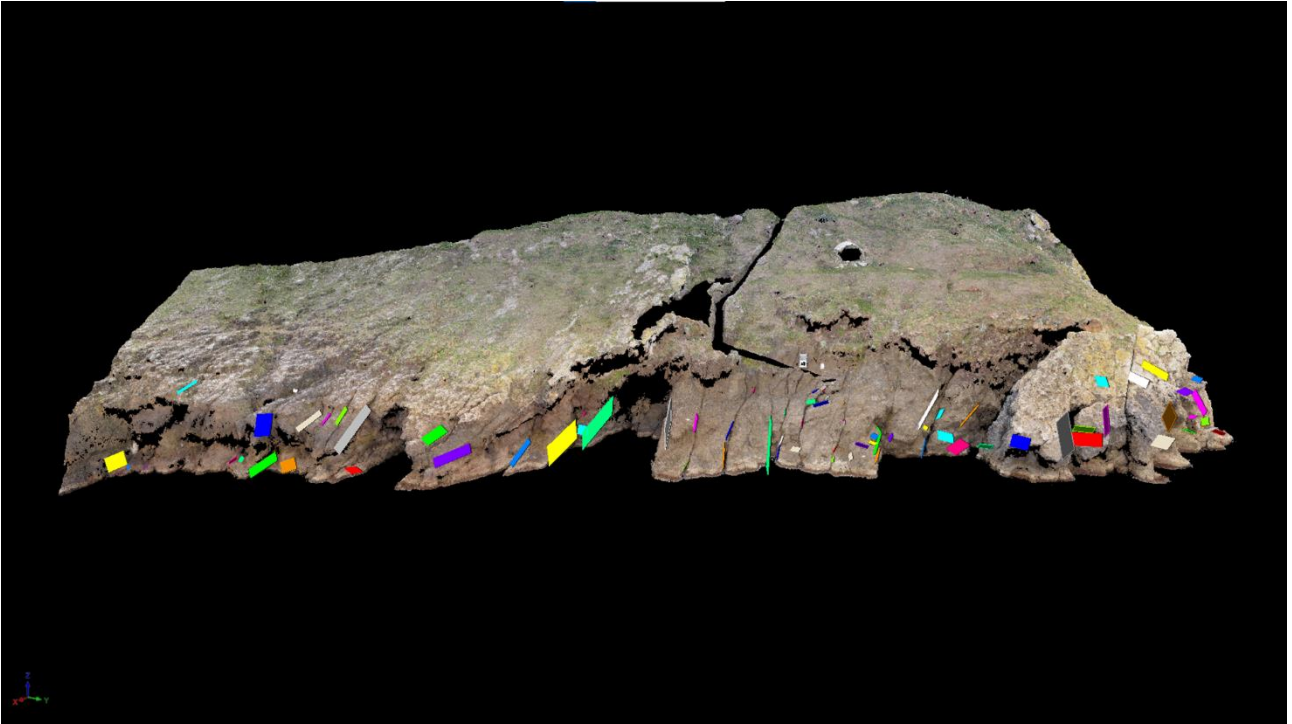


Figura 34 - Estrazione dei piani di discontinuità da nuvola di punti TLS relativa allo Scalo 4.

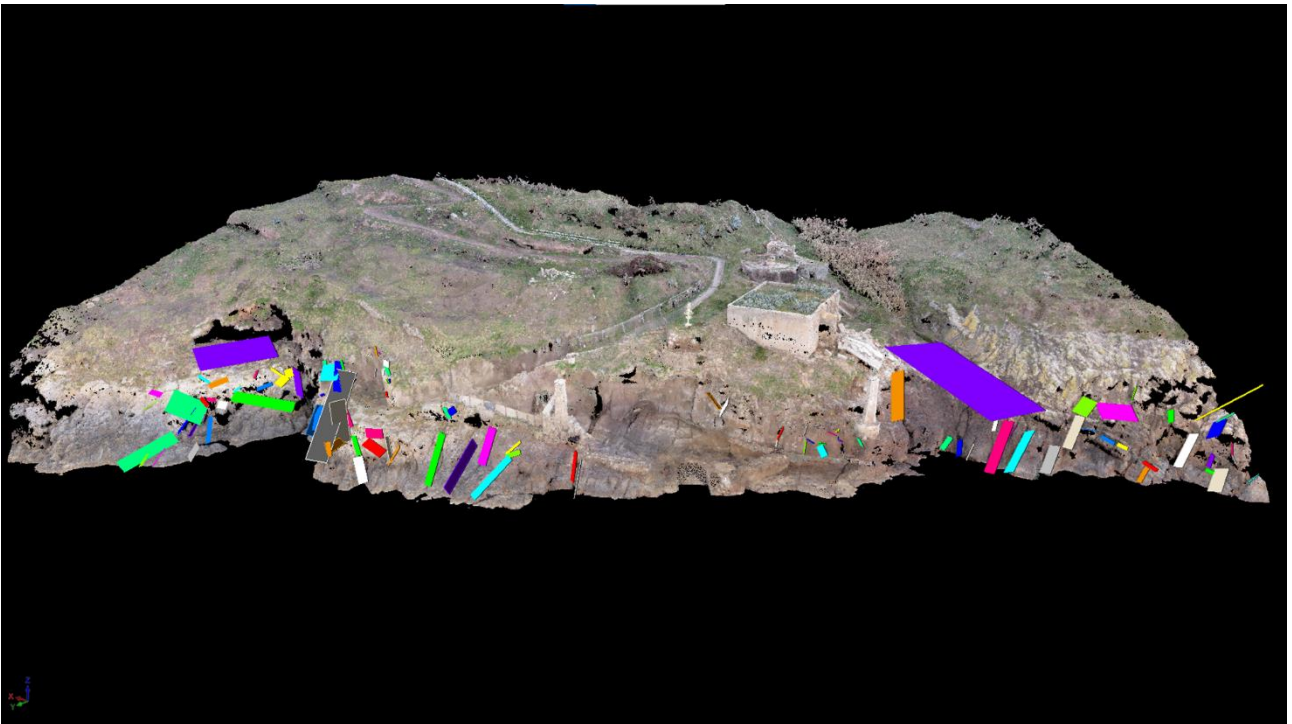


Figura 35 - Estrazione dei piani di discontinuità da nuvola di punti TLS relativa allo Scalo Marinella.

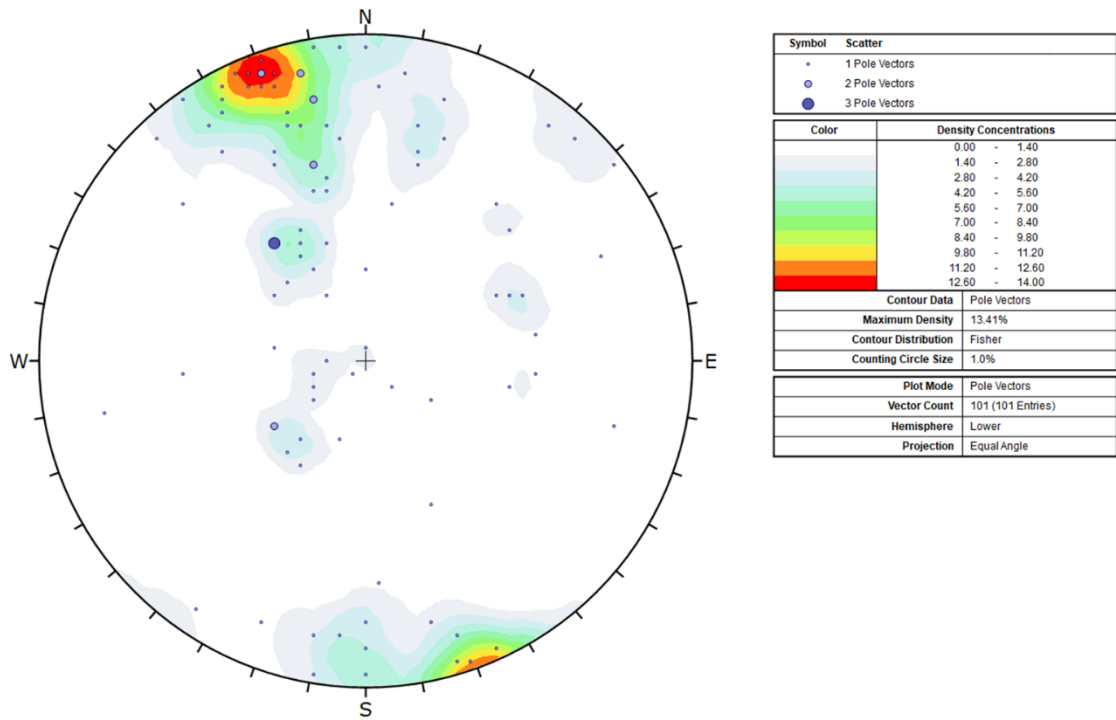


Figura 36 - Proiezione stereografica delle linee di isodensità dei poli dei piani di discontinuità relativi al scalo n.4.

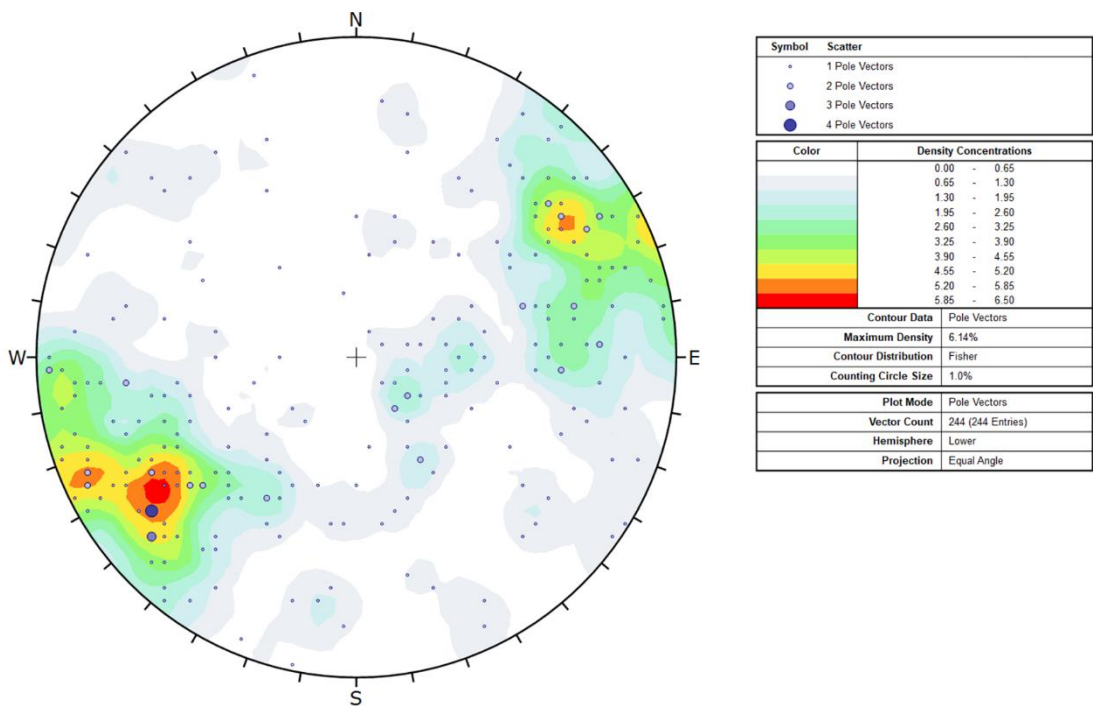


Figura 37 - Proiezione stereografica delle linee di isodensità dei poli dei piani di discontinuità relativi allo scalo Marinella.

Le delimitazioni delle principali famiglie individuate sono presentate in proiezione stereografica in Figura 38e Figura 39.

Le orientazioni dei piani modali delle famiglie individuate sono:

Scalo n.4

JN1: 86°/160°

JN2: 45°/149°

JN3: 85°/001°

JN4: 70°/176°

JN5: 38°/044°

Scalo Marinella

JN1: 73°/340°

JN2: 86°/066°

JN3: 75°/237°

JN4: 85°/085°

JN5: 69°/262°

JN6: 27°/290°

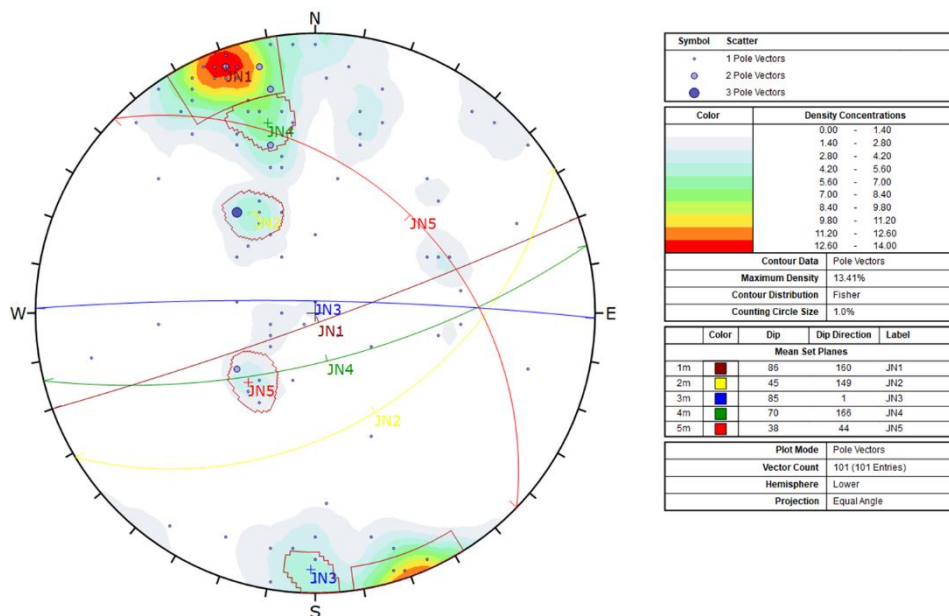


Figura 38 - Proiezione stereografica dei poli e isolinee di concentrazione dei piani di discontinuità estratti, Scalo n.4.

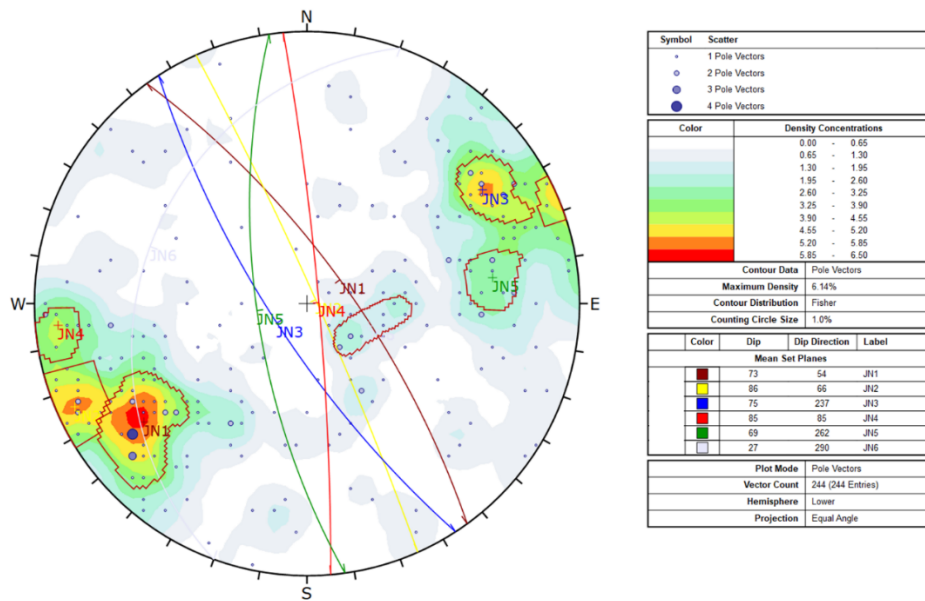


Figura 39 - Proiezione stereografica dei poli e isolinee di concentrazione dei piani di discontinuità estratti, scalo Marinella.

4.4 Caratterizzazione ammasso roccioso

Per realizzare la caratterizzazione dell'ammasso roccioso ed ottenere i valori dei parametri geomeccanici dell'ammasso roccioso è stato utilizzato il criterio di rottura empirico di Hoek & Brown (1980):

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

Per l'applicazione del criterio di Hoek & Brown sono necessari quattro parametri:

1) La resistenza a compressione uniaassiale σ_{ci} degli elementi di roccia intatta che costituiscono l'ammasso, ottenibile da prove di Point Load o di compressione uniaassiale.

Tale valore è stato valutato in relazione alle caratteristiche litotecniche dell'ammasso basandosi su dati di letteratura Hoek et al. (2002).

2) La costante litologica m_i , che definisce le caratteristiche frizionali dei componenti minerali degli elementi di roccia intatta, approssimabile al rapporto fra resistenza a compressione e resistenza a trazione uniaassiale della roccia intatta (σ_{ci}/σ_{ti}), ricavabile sperimentalmente da prove triassiali oppure seguendo le tabelle proposte da Hoek (1999) e Hoek et al. (2002). Davarpanahet et al. (2022), forniscono una serie di correlazioni sperimentali per la valutazione della costante in relazione alla tipologia della roccia (Tabella 17).

Tipo di roccia	Equazione
Ignea	$m_i = \frac{\sigma_c}{ \sigma_t } - 0.179$
Sedimentaria	$m_i = \frac{\sigma_c}{ \sigma_t } - 0.188$
Metamorfica	$m_i = \frac{\sigma_c}{ \sigma_t } - 0.379$
Tutti i tipi	$m_i = \frac{\sigma_c}{ \sigma_t } - 0.21$

Tabella 17 - Relazioni per la valutazione della costante m_i , Davarpanahet et al. (2022).

Non disponendo di valori resistenza compressione e trazione uniassiale per la roccia in sito la costante m_i è stata valutata da dati di letteratura (Hoek et al., 2002).

3) L'indice geologico di resistenza GSI (Geological Strength Index), che relaziona le proprietà degli elementi di roccia intatta a quelle dell'intero ammasso, è stato introdotto da Hoek et al., (1995) e fornisce un sistema per stimare la riduzione della resistenza dell'ammasso in differenti condizioni geologiche (Hoek, 1999). Il valore di GSI si può ricavare da tabelle che prendono in considerazione la struttura generale dell'ammasso e le condizioni delle superfici di discontinuità (Hoek, 1999), oppure in base ai più comuni sistemi di classificazione geomeccanica, secondo le relazioni Hoek et al. (2002):

$$GSI = RMR'_b - 5$$

$$GSI = 9 \ln Q + 44$$

Nel presente lavoro l'indice è stato valutato seguendo un approccio visivo (Figura 40), come indicato da Hoek et al. (2002) sulla base delle tabelle di comparazione proposte da Marinos et al. (2001) in relazione alle caratteristiche dell'ammasso.

4) Il fattore di disturbo, D , dell'ammasso, che dipende dalla tecnica di scavo o da rilascio tensionale. Per l'ammasso in questione tale parametro è stato assunto pari a 0 (ammasso in condizioni naturali non disturbato).

Noti GSI, D ed m_i , i parametri m_b , s ed a possono essere determinati in base alle seguenti relazioni empiriche (Hoek et al., 2002):

$$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28 - 14D}\right)$$

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

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

Spesso, al fine di simulare il comportamento meccanico dell'ammasso, è necessario esprimerne la resistenza in termini di coesione c' e angolo d'attrito ϕ' .

Non essendoci una correlazione diretta, tra il criterio di Mohr-Coulomb e il criterio non lineare di Hoek & Brown, la determinazione dei parametri c' e ϕ' , non è immediata; la soluzione più pratica è trattare il problema analizzando un insieme di prove triassiali simulate usando la relazione di Hoek & Brown, per generare una serie di valori di σ'_1 e σ'_3 ; la relazione di Mohr-Coulomb $\sigma'_1 = \sigma_{cm} + k\sigma'_3$, viene adattata ai risultati delle prove, tramite un'analisi di regressione lineare.

I valori c' e ϕ' , vengono determinati tramite le seguenti relazioni (Hoek, 1999):

$$\sin \phi' = \frac{k-1}{k+1}$$

$$c' = \frac{\sigma_{cm}}{2\sqrt{k}}$$

con σ_{cm} resistenza a compressione uniassiale dell'ammasso roccioso, e k pendenza della retta.

È così possibile ottenere i valori di coesione e di angolo di attrito medi (c' e ϕ'), riferiti alla approssimazione lineare del criterio di rottura, nell'intervallo tensionale di interesse, scelto in funzione del tipo di opera e della sua profondità.

I parametri medi c' e ϕ' sono stati determinati utilizzando il *software* ORMAS V.1.0 basato sul criterio di Hoek & Brown generalizzato (www.roozbehgm.com/) (Figura 41); i risultati sono stati ottenuti considerando per il campo tensionale quello caratteristico di affioramenti su pendii.

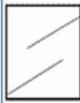
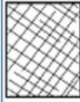




		SURFACE CONDITIONS				
		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
STRUCTURE		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	INTACT OR MASSIVE - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90	80	70	N/A	N/A
	BLOCKY - well interlocked undisturbed rock mass consisting of cubical blocks formed by three intersecting discontinuity sets		70	60		
	VERY BLOCKY- interlocked, partially disturbed mass with multi-faceted angular blocks formed by 4 or more joint sets			50		
	BLOCKY/DISTURBED/SEAMY - folded with angular blocks formed by many intersecting discontinuity sets. Persistence of bedding planes or schistosity			40	30	
	DISINTEGRATED - poorly interlocked, heavily broken rock mass with mixture of angular and rounded rock pieces				20	
	LAMINATED/SHEARED - Lack of blockiness due to close spacing of weak schistosity or shear planes	N/A	N/A			10

Figura 40 - Valutazione dell'indice GSI.

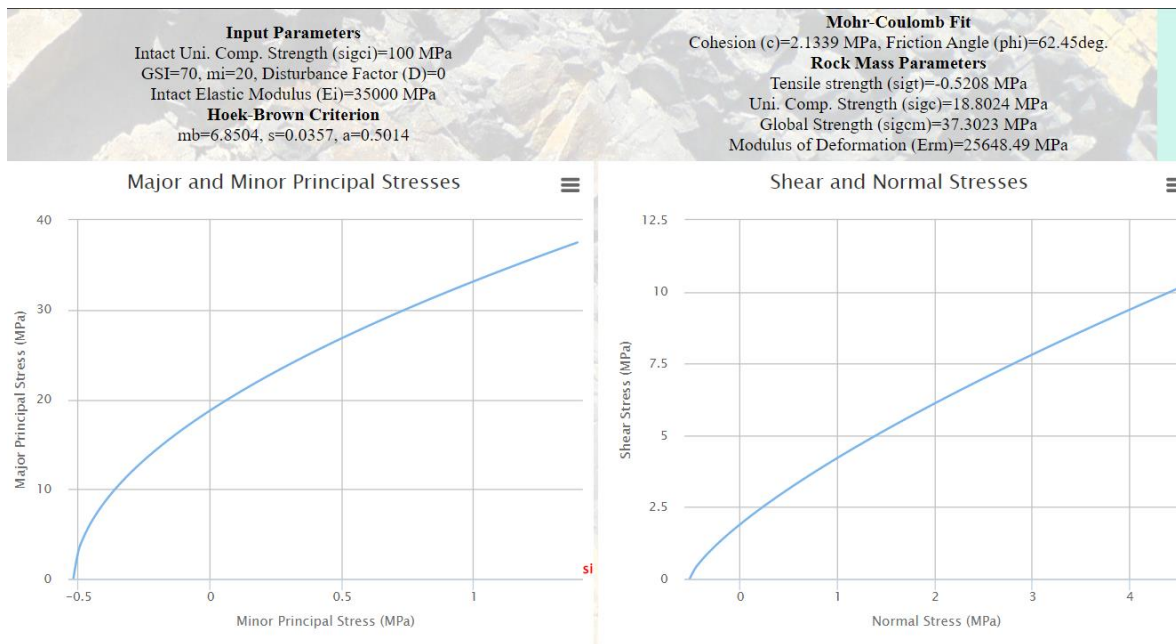


Figura 41 - Valutazione dei parametri dell'ammasso sulla base del criterio di Hoek-Brown generalizzato.

Infine, per quanto riguarda il calcolo del modulo di deformazione dell'ammasso, è stata applicata la relazione di Hoek (1999), valida per $\sigma_{ci} < 100$ Mpa.

Riassumendo, i parametri geomeccanici dell'ammasso roccioso sono risultati i seguenti (Tabella 18):

Parametri geomeccanici	
GSI	70
m_i (roccia intatta)	20
σ_c (roccia intatta) [MPa]	100
m_b	6.9
s	0.04
a	0.5
c [MPa]	2.1
phi	62
sigt [MPa]	-0.52
sigcm [MPa]	37.3
E [GPa]	2.6

Tabella 18 - Sintesi dei parametri dell'ammasso roccioso.

4.5 Analisi cinematica dei meccanismi di dissesto

Al fine di valutare la propensione al dissesto delle due zone investigate è stata realizzata un'analisi cinematica 3D di entrambe le aree. La stabilità dei blocchi secondo cui è suddiviso un ammasso roccioso è controllata essenzialmente dalle proprietà geometriche e geo-meccaniche delle discontinuità. Con il termine "analisi cinematica" si intende l'analisi del comportamento di blocchi di roccia sotto il proprio peso e con resistenza allo scorrimento puramente attrittiva lungo le superfici di discontinuità.

L'analisi cinematica della stabilità dei versanti costituisce un efficace strumento per la comprensione del comportamento dell'ammasso roccioso e rappresenta un valido punto di raccordo fra la fase di rilevamento geologico tecnico e quella di progettazione.

L'analisi cinematica della stabilità dei versanti viene in genere effettuata verificando graficamente determinate condizioni geometriche sulla proiezione emisferica; di solito si utilizza la proiezione equiangolare, in quanto essa permette di mantenere le relazioni fra gli angoli.

Le assunzioni di base per l'analisi cinematica sono:

- l'ammasso roccioso è suddiviso in blocchi da discontinuità piane e infinitamente persistenti;
- la resistenza al taglio lungo i piani di discontinuità è puramente attrittiva;
- il sistema di blocchi è soggetto alla sola forza peso.

I meccanismi di rottura più frequenti, considerati in questo tipo di analisi, sono (Figura 42):

- scorrimento planare (*plane failure* - Hoek & Bray, 1981);
- scorrimento di cunei (*wedge failure* - Hoek & Bray, 1981);
- ribaltamento diretto (*block toppling* - Goodman & Bray, 1976);
- ribaltamento diretto con scivolamento (*block toppling and sliding*);
- ribaltamento di flessura (*flexural toppling* - Goodman & Bray, 1976).

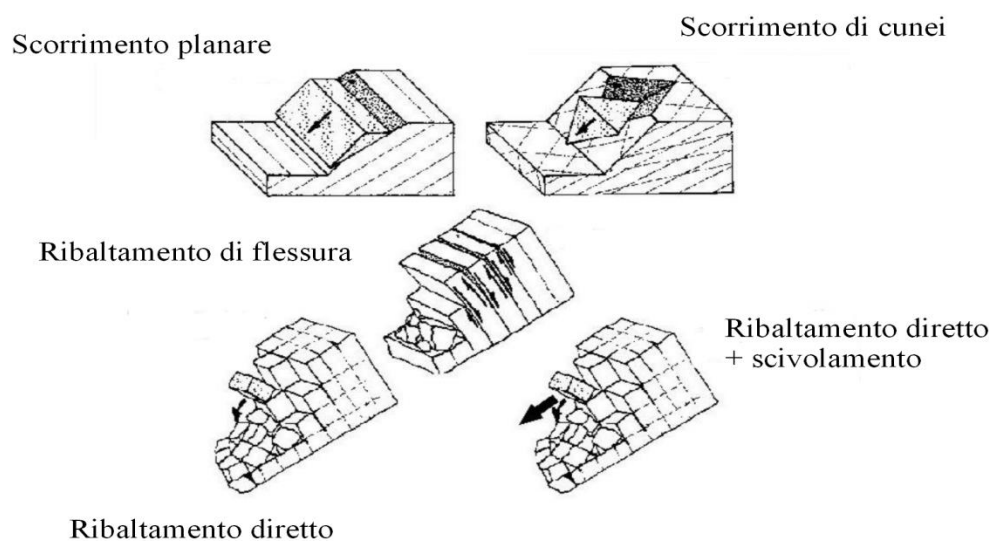


Figura 42 - Principali meccanismi di instabilità in roccia.

Le analisi descritte possono assumere un carattere quantitativo se per ogni meccanismo viene definito un indice di pericolosità cinematica (Casagli & Pini, 1993), analogo al potenziale di rottura definito da Matheson (1989), il quale esprime la probabilità relativa che un determinato meccanismo di rottura possa avvenire in base alle condizioni strutturali e geomeccaniche dell'ammasso. Tali indici possono essere calcolati effettuando il conteggio delle seguenti quantità:

- N_{pf} numero dei poli delle discontinuità che soddisfano le condizioni per lo scivolamento planare;
- N_{wf} numero dei poli delle discontinuità che soddisfano le condizioni per lo scivolamento di cunei;
- N_{bt} numero dei poli delle discontinuità che soddisfano le condizioni per il ribaltamento diretto;
- I_{bt} numero delle linee di intersezione che soddisfano le condizioni per il ribaltamento diretto;
- I_{ft} numero delle linee di intersezione che soddisfano le condizioni per il ribaltamento di flessura.

Indicando con N il numero totale di discontinuità campionate nel dominio e con $I=0.5(N^2-N)$ il numero di tutte le possibili intersezioni, è possibile calcolare i seguenti "indici di pericolosità o suscettibilità cinematica":

- $S_{pf} = N_{pf}/N$ (%) per scivolamento planare;
- $S_{wf} = I_{wf}/I$ (%) per scivolamento di cunei;
- $S_{btf} = N_{btf}/N \times I_{btf}/I$ (%) per ribaltamento di blocchi;
- $S_{ftf} = N_{ftf}/N$ (%) per ribaltamento di flessura.

L'utilizzo del *computer*, rispetto all'analisi grafica sulla proiezione stereografica, consente di lavorare contestualmente su tutti i dati a disposizione, sia poli che intersezioni, e di utilizzare angoli di attrito diversi per discontinuità differenti.

Considerando la morfologia locale delle pareti in oggetto, le analisi cinematiche sono state effettuate applicando una nuova metodologia (Gigli et al. 2022) basata sugli indici definiti da Casagli e Pini (1993), ma che estende la validità dei concetti dell'analisi cinematica classica anche ai versanti aggettanti introducendo il meccanismo di caduta libera ed un indice cinematico globale (GKI), che esprime la probabilità che si verifichi almeno uno dei meccanismi di dissesto investigati.

- $S_{fff} = 1 - (1 - S_{pfff}) \times (1 - S_{wfff})$ per caduta libera,

dove $S_{pfff} = N_{pfff}/N$ e $S_{wfff} = I_{wfff}/I$

- $GKI = 1 - (1 - S_{pf} - N_{pfff} - S_{ft})(1 - S_{wf} - I_{fff})(1 - S_{btf})$

Il primo termine in parentesi definisce il contributo alla suscettibilità cinematica da parte di piani di discontinuità con orientazione sfavorevole (scivolamento planare, caduta libera planare e ribaltamento di flessura), il secondo termine definisce il contributo di linee di intersezioni di discontinuità con orientazione sfavorevole (scivolamento di cunei e caduta libera di cuneo) ed il terzo termine definisce il contributo del ribaltamento di blocchi o diretto che è l'unico controllato sia piani che intersezioni. Il GKI definisce la probabilità relativa che almeno uno tra tutti i possibili meccanismi sia cinematicamente possibile.

Nella Figura 43, Figura 44, Figura 45, Figura 46e Figura 47 vengono mostrate delle illustrazioni schematiche che descrivono i diversi meccanismi di instabilità e la loro analisi cinematica su proiezione stereografica.

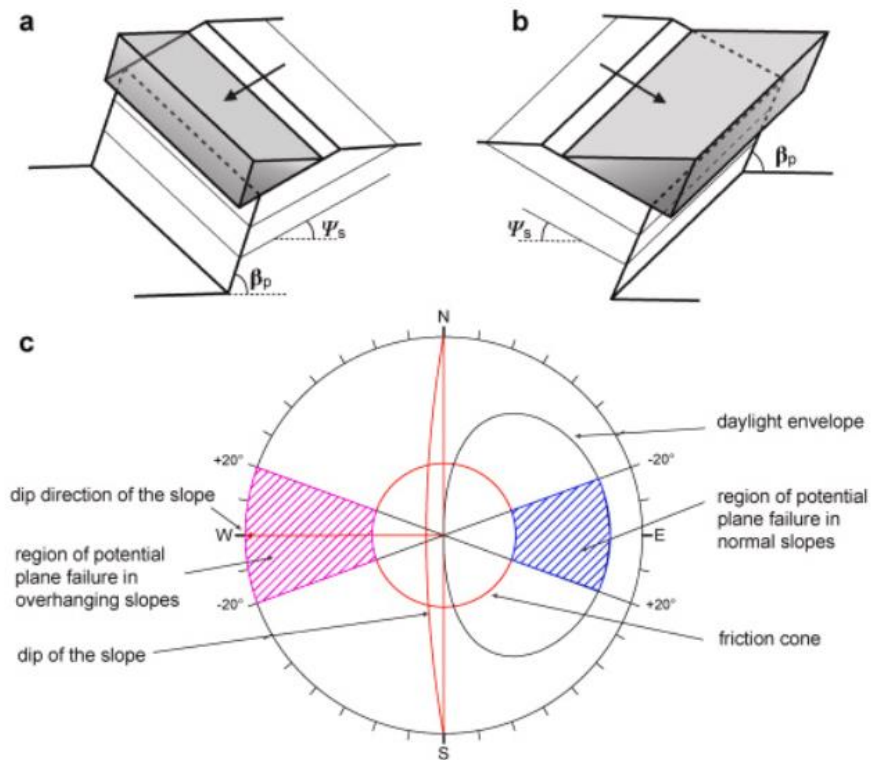


Figura 43 – Illustrazione schematica del meccanismo di scivolamento planare per versanti normali (a) e versanti in aggetto (b) e relativa analisi cinematica su proiezione stereografica (c) (Gigli et al., 2022).

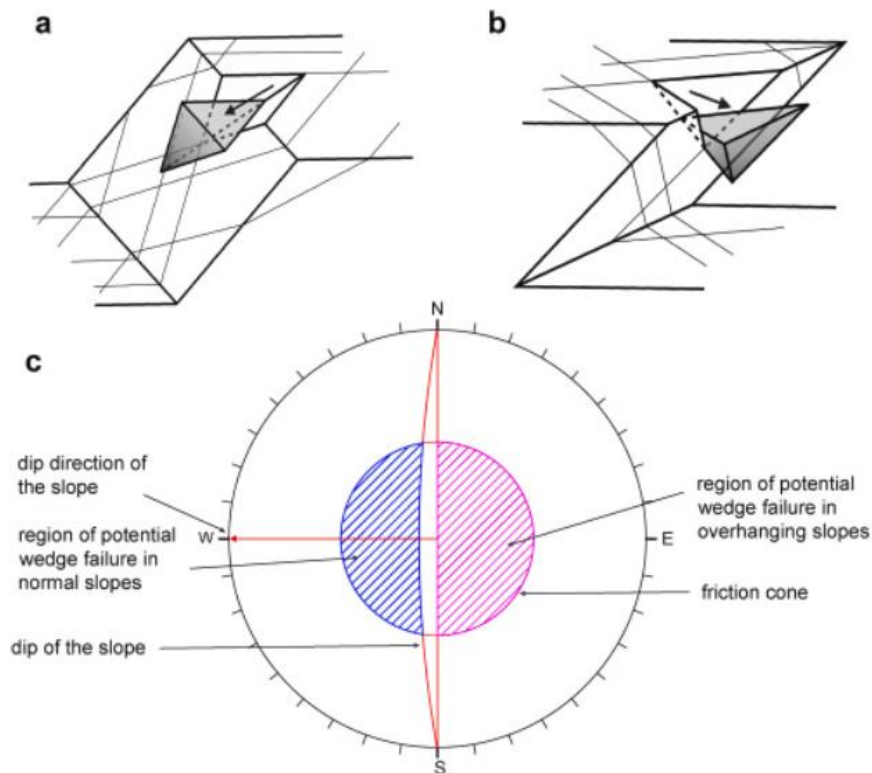


Figura 44 - Illustrazione schematica del meccanismo di scivolamento di cunei per versanti normali (a) e versanti in aggetto (b) e relativa analisi cinematica su proiezione stereografica (c) (Gigli et al., 2022).

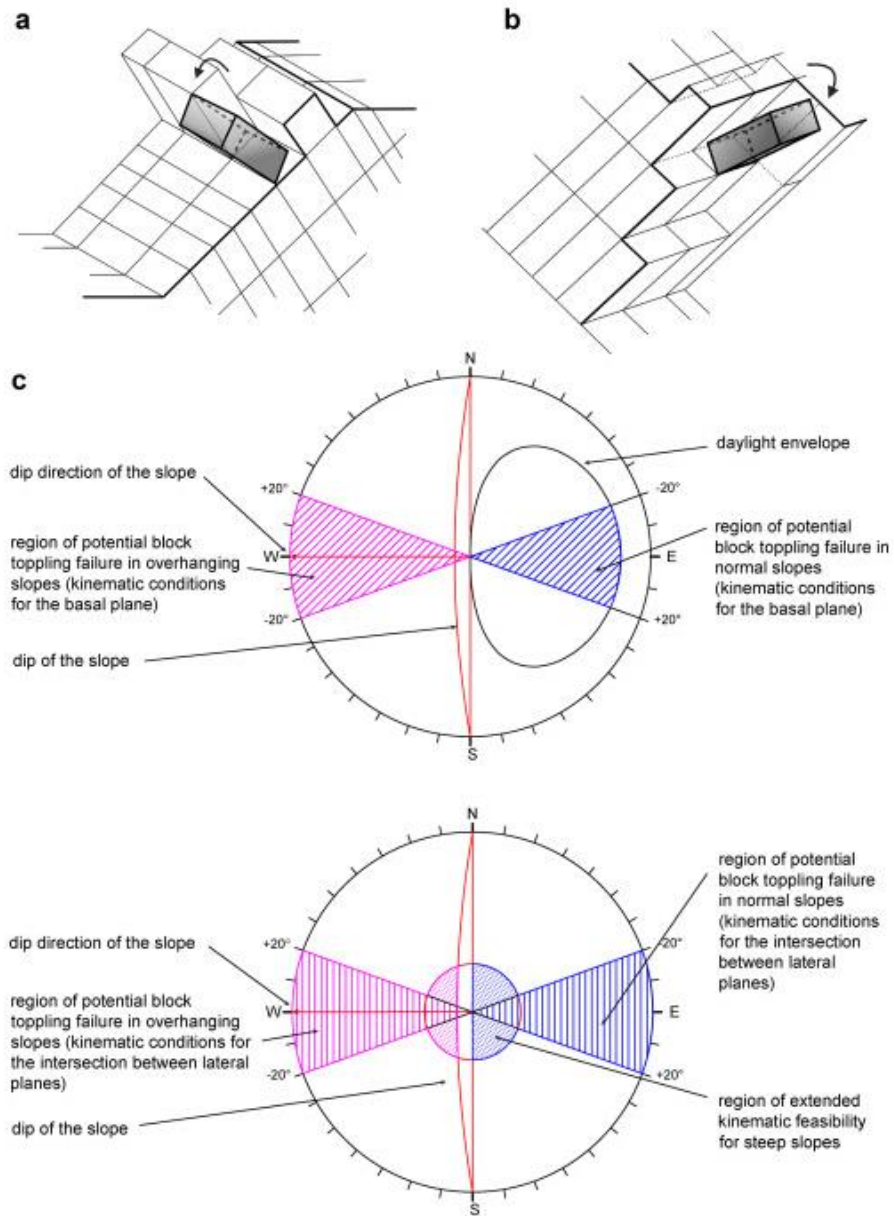


Figura 45 - Illustrazione schematica del meccanismo di ribaltamento di blocchi per versanti normali (a) e versanti in aggetto (b) e relativa analisi cinematica su proiezione stereografica (c) e (d) (Gigli et al., 2022).

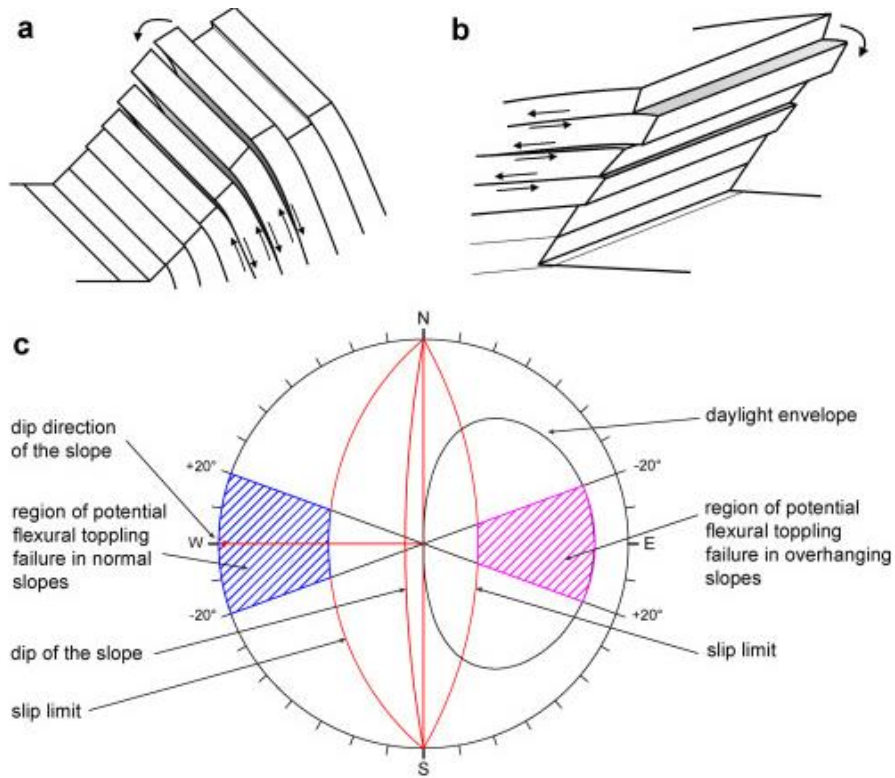


Figura 46 - Illustrazione schematica del meccanismo di ribaltamento flessurale per versanti normali (a) e versanti in aggetto (b) e relativa analisi cinematica su proiezione stereografica (c) (Gigli et al., 2022).

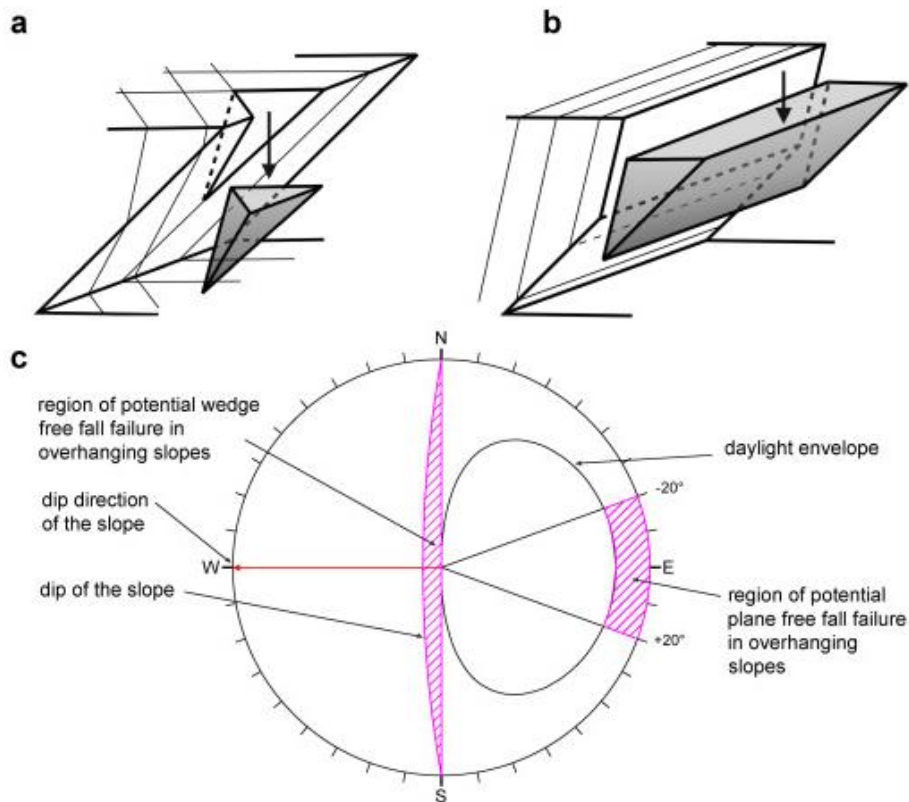


Figura 47 - Illustrazione schematica del meccanismo di caduta libera di cuneo (a) e caduta libera planare (b) per versanti in aggetto e relativa analisi cinematica su proiezione stereografica (c) (Gigli et al., 2022).

Sono state eseguite tre analisi di stabilità cinematica: una per il Scalo 4, una per il Scalo Marinella e una per la galleria di molo Marinella.

Il valore di angolo di attrito per tali analisi è stato ricavato dalla relazione $\phi = \phi_b + 2JRC$ valida per bassi stati tensionali (Maksimovic, 1996).

A scopo cautelativo al posto di ϕ_b è stato utilizzato l'angolo di attrito residuo ricavato mediante la relazione di Barton e Choubey (1977) e come valore di JRC quello scalato sulla dimensione media dei blocchi tramite la relazione di Barton & Bandis (1982).

$$\phi_r = (\phi_b - 20) + 20(r/R)$$

$$JRC_n = JRC_0 * \left(\frac{L_n}{L_0}\right)^{-0.02JRC_0}$$

Considerando un angolo di attrito di base di 33° (ottenuto cautelativamente da valori di letteratura), come valori di JRC_0 i valori più bassi tra quelli medi di ogni singola famiglia di discontinuità e come lunghezza media significativa $L_n = 2\text{m}$ (sulla base delle osservazioni in sito e delle dimensioni medie dei blocchi rilevate) è stato considerato per tutte le analisi un valore cautelativo di angolo di attrito pari a 39° .

Il modello 3D su cui sono state effettuate le analisi è una mesh creata a partire dalle *point clouds* ottenute dall'integrazione delle nuvole del *laser scanner* e della fotogrammetria da drone a cui sono state unite le batimetrie realizzate da rilievi precedenti forniti dal Committente. L'utilizzo delle batimetrie ha consentito di effettuare l'analisi cinematica anche nella porzione dei versanti analizzati sub-aerea.

Per la valutazione degli indici di instabilità cinematica sono stati determinati sulle suddette mesh i valori di direzione di immersione e di inclinazione di immersione che servono per il calcolo dei diversi indici, come visibile nelle figure seguenti (da Figura 48 a Figura 56).

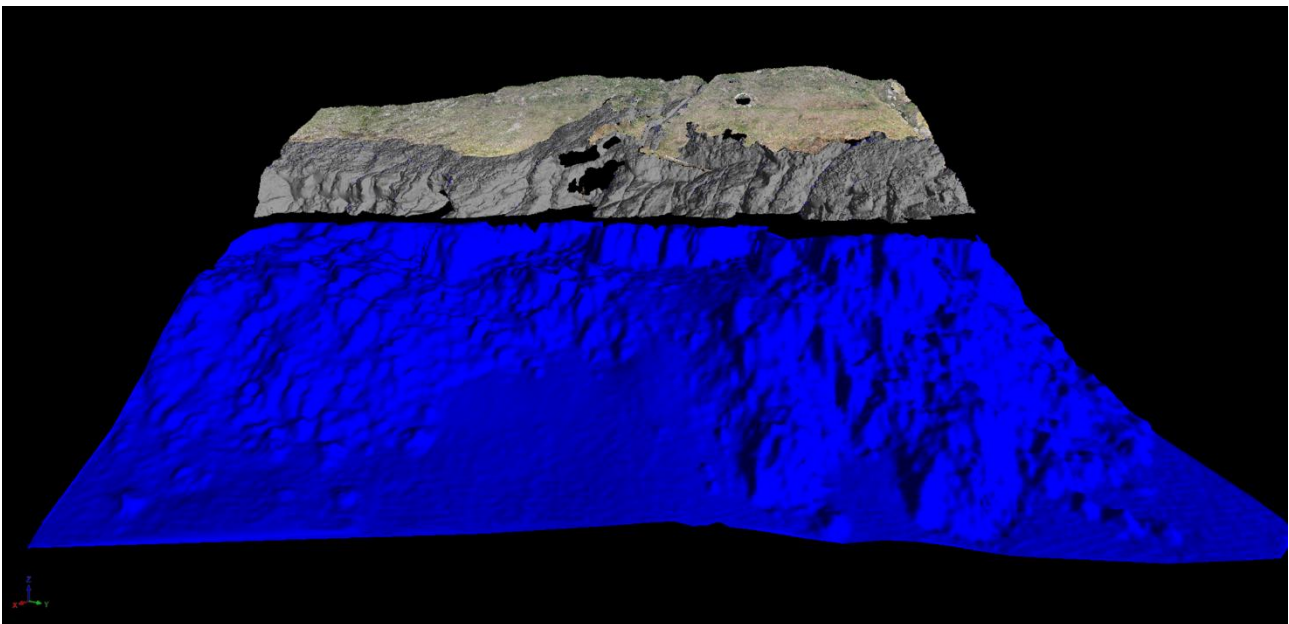


Figura 48 – Mesh di partenza, in grigio modello 3D della parte emersa in blu di quella sommersa (Scalo n.4).

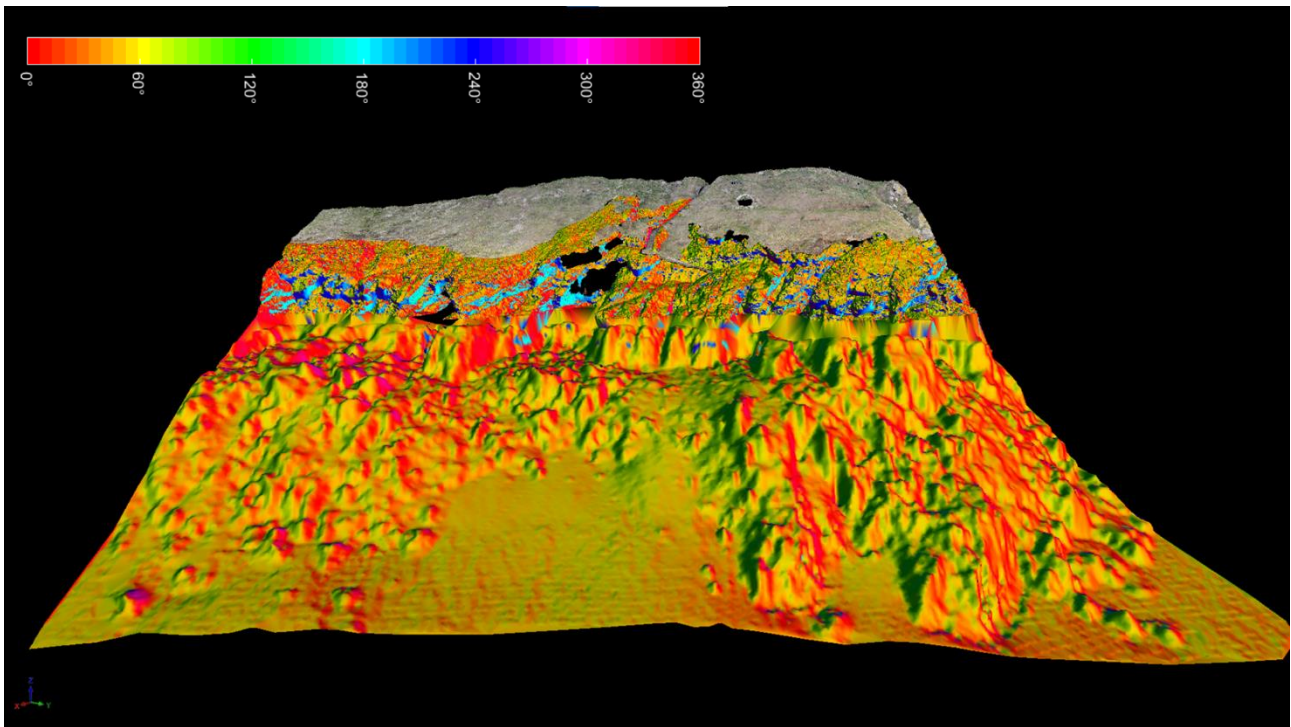


Figura 49 - Direzione di immersione locale della parete investigata, estratta dalla mesh di dettaglio (Scalo n.4).

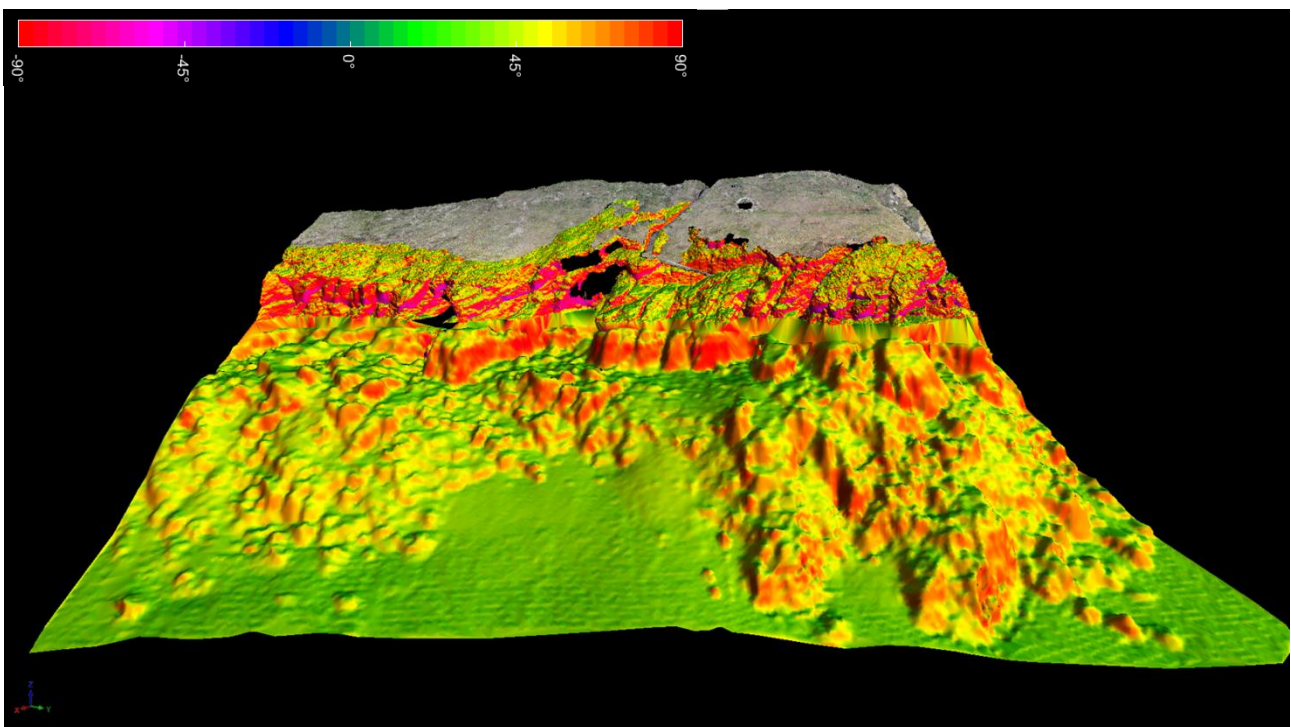


Figura 50 - Inclinazione locale della parete investigata, estratta dalla mesh di dettaglio (Scalo n.4).

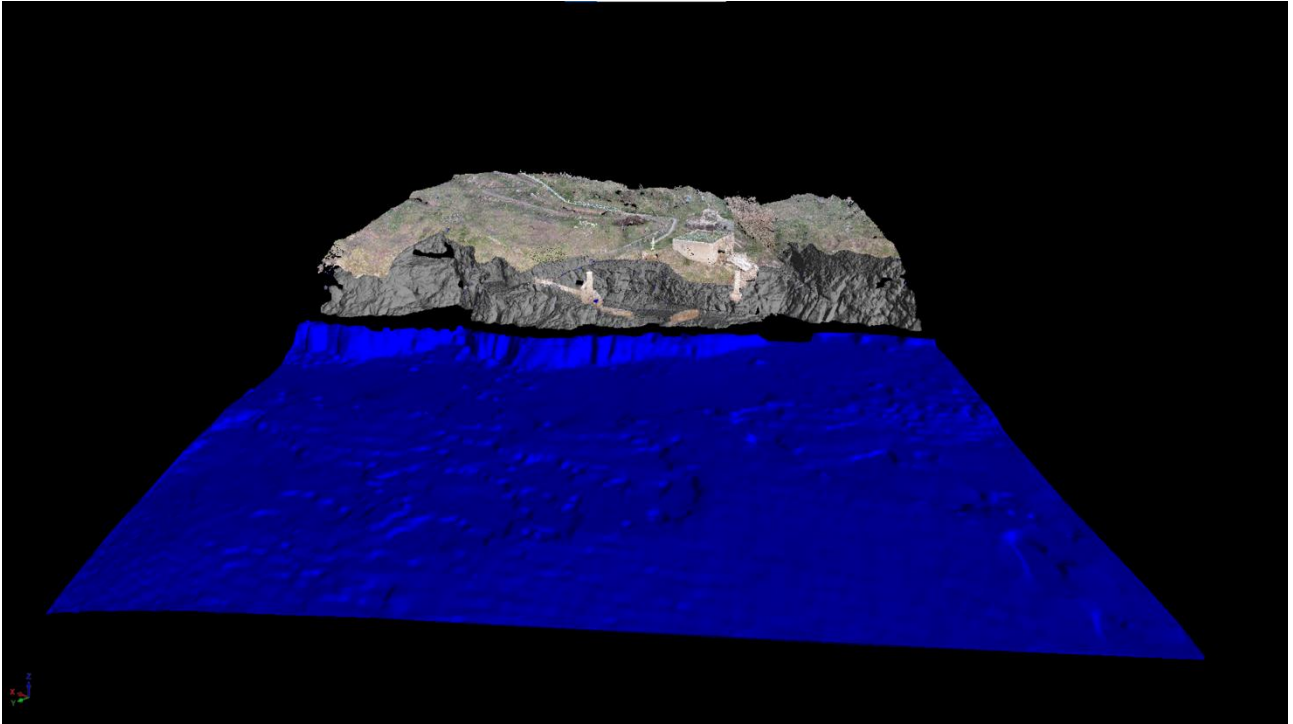


Figura 51 – Mesh di partenza, in grigio modello 3D della parte emersa in blu di quella sommersa (scalo Marinella).

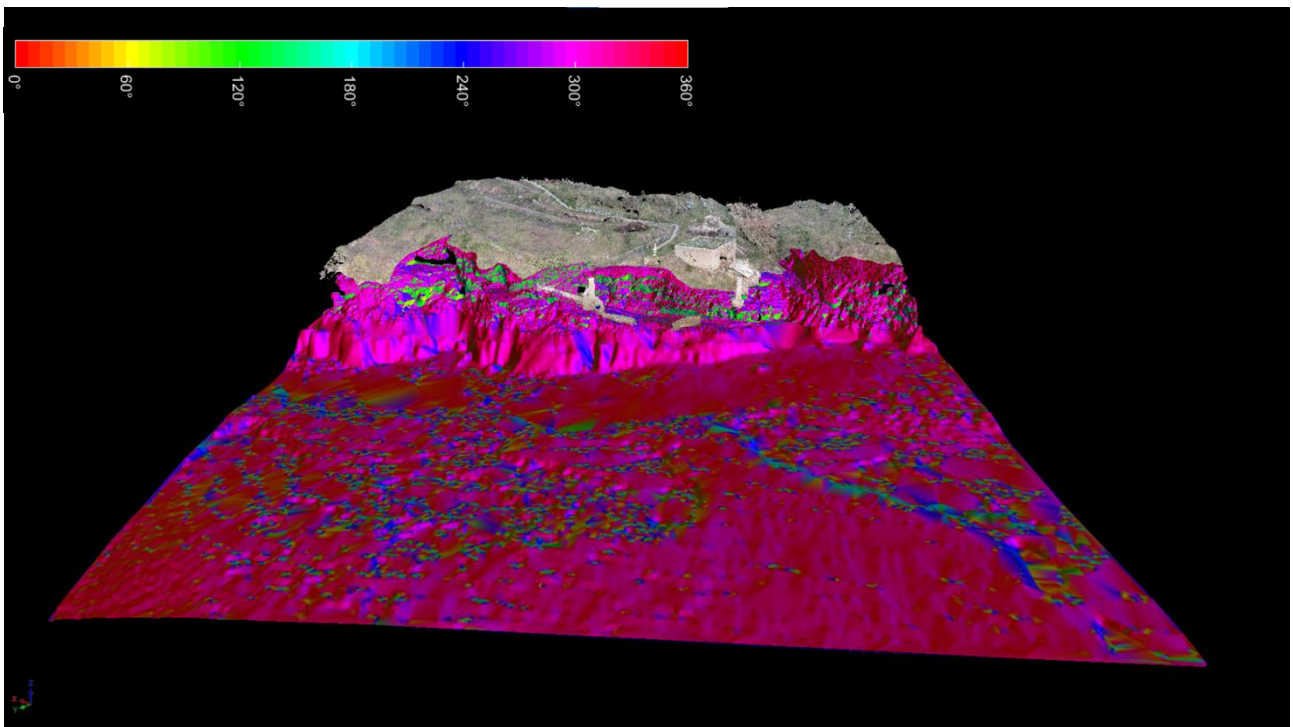


Figura 52 - Direzione di immersione locale della parete investigata, estratta dalla mesh di dettaglio (scalo Marinella).

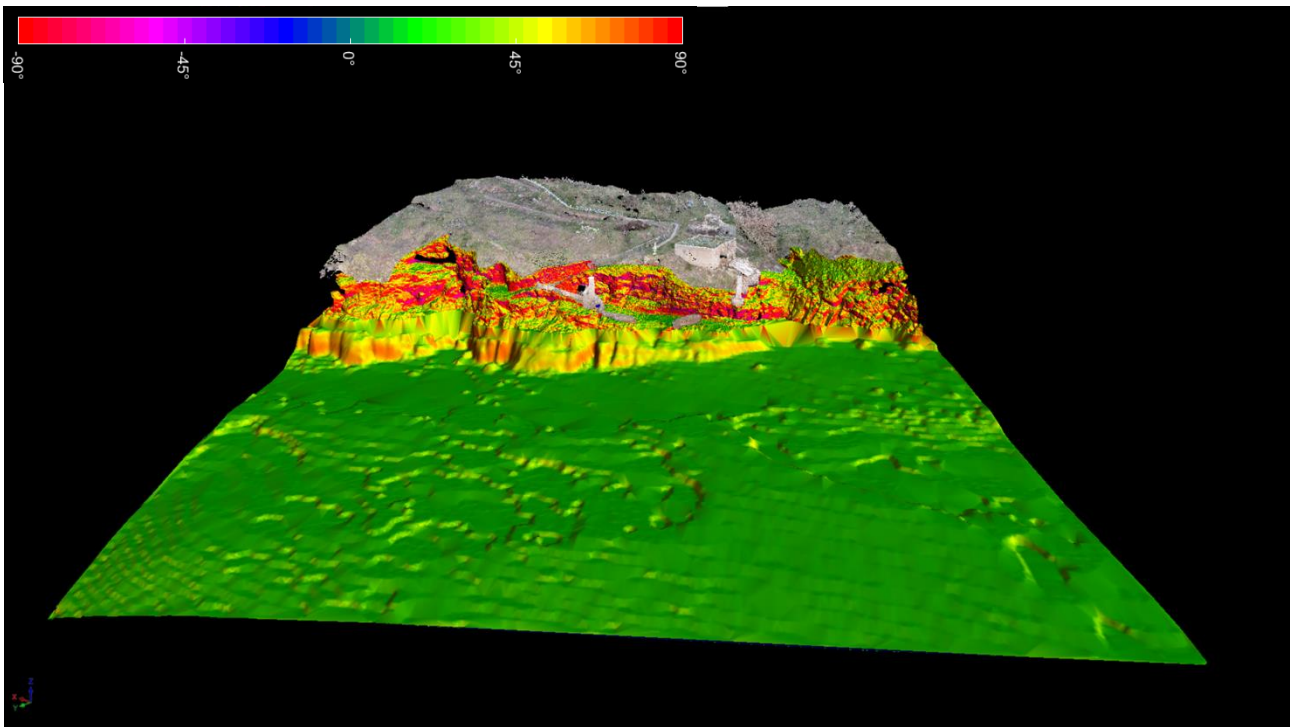


Figura 53 - Inclinazione locale della parete investigata, estratta dalla mesh di dettaglio (scalo Marinella).

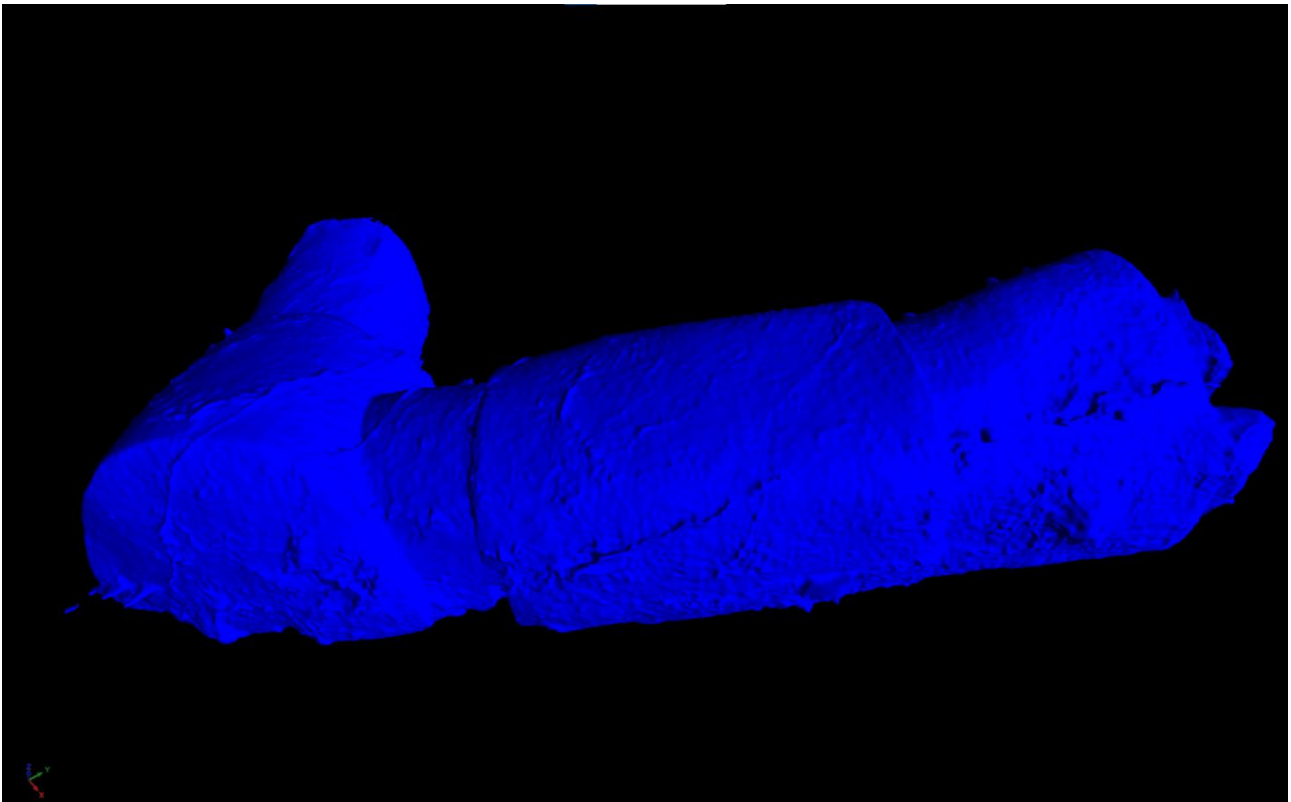


Figura 54 – Mesh di partenza della galleria dello scalo Marinella.

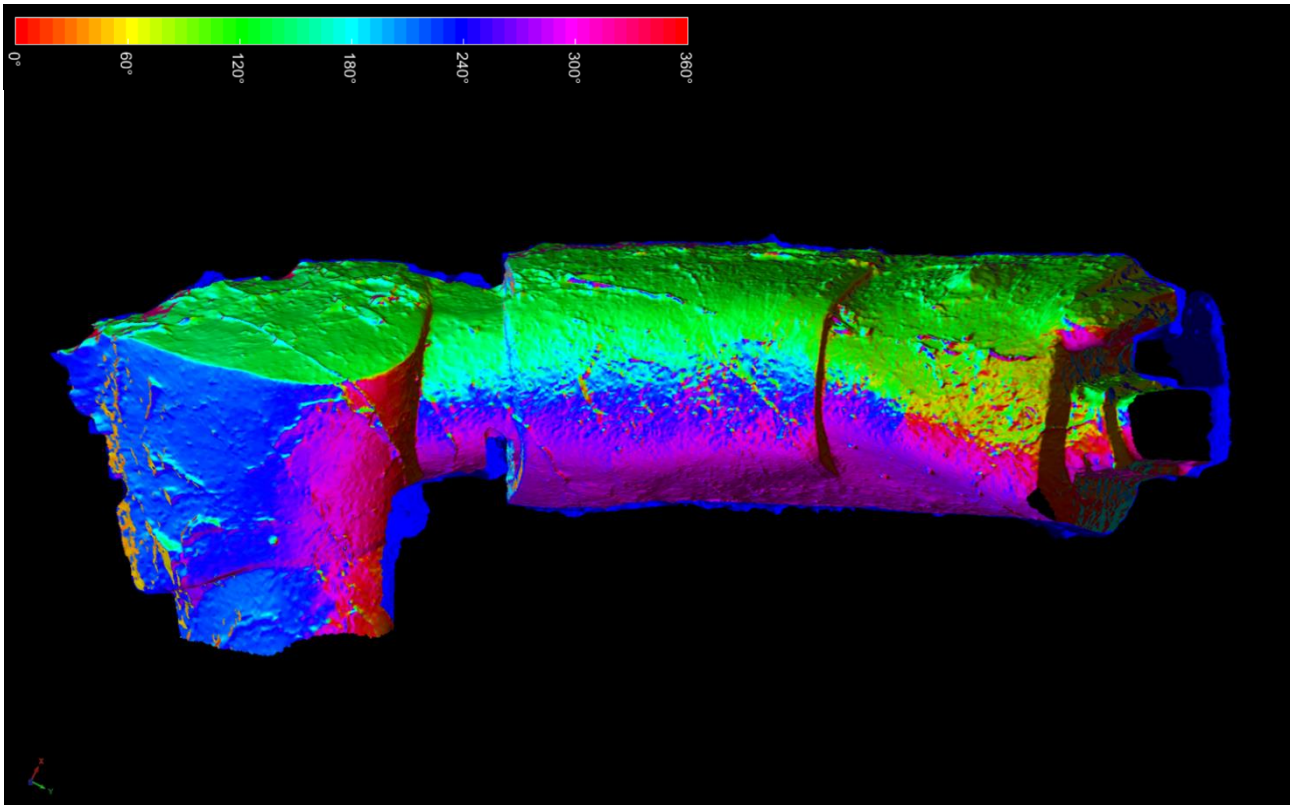


Figura 55 - Direzione di immersione locale della parete investigata, estratta dalla mesh di dettaglio (galleria scalo Marinella).

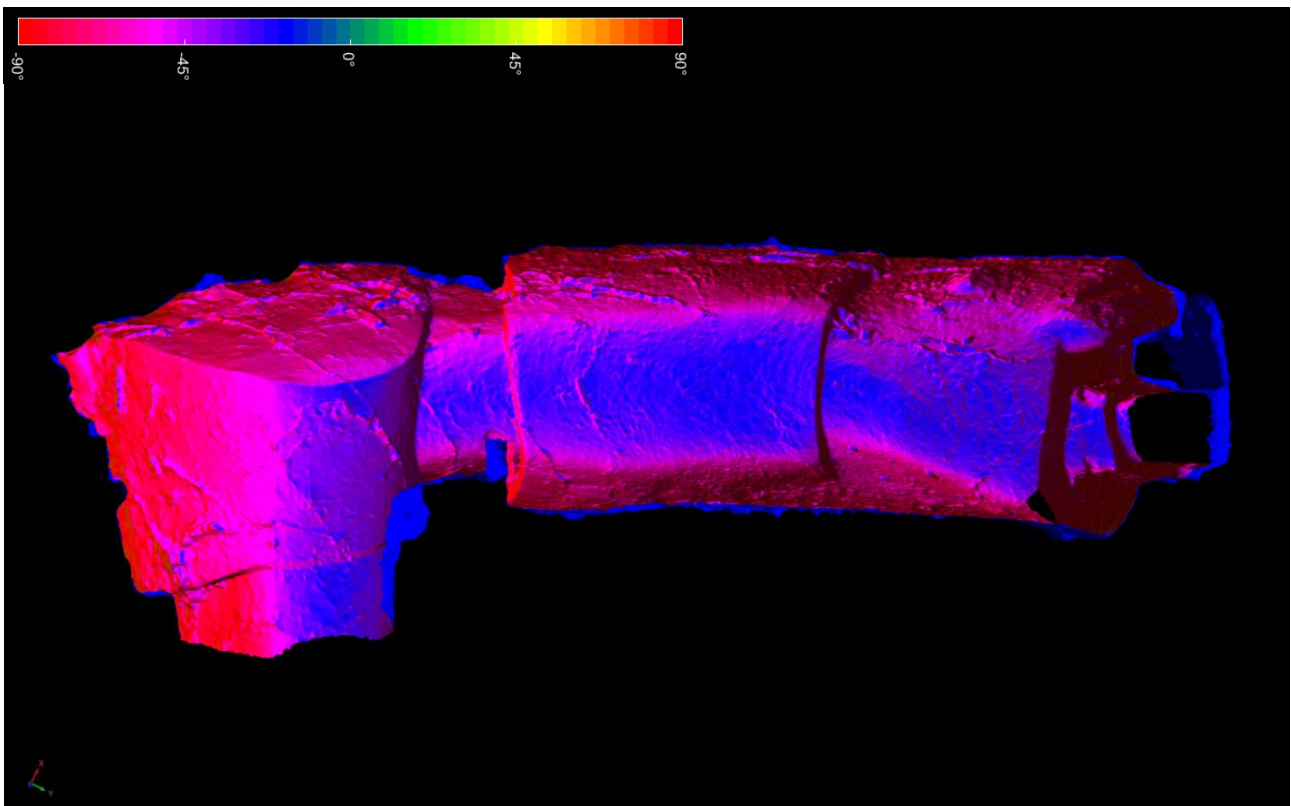


Figura 56 - Inclinazione locale della parete investigata, estratta dalla mesh di dettaglio (galleria scalo Marinella).

4.5.1 Analisi cinematica Scalo 4

In Figura 57, Figura 58, Figura 59, Figura 60, Figura 61, Figura 62 e Figura 63 vengono rappresentati i risultati delle elaborazioni grafiche relative all'analisi cinematica quantitativa dell'ammasso roccioso presso lo Scalo 4.

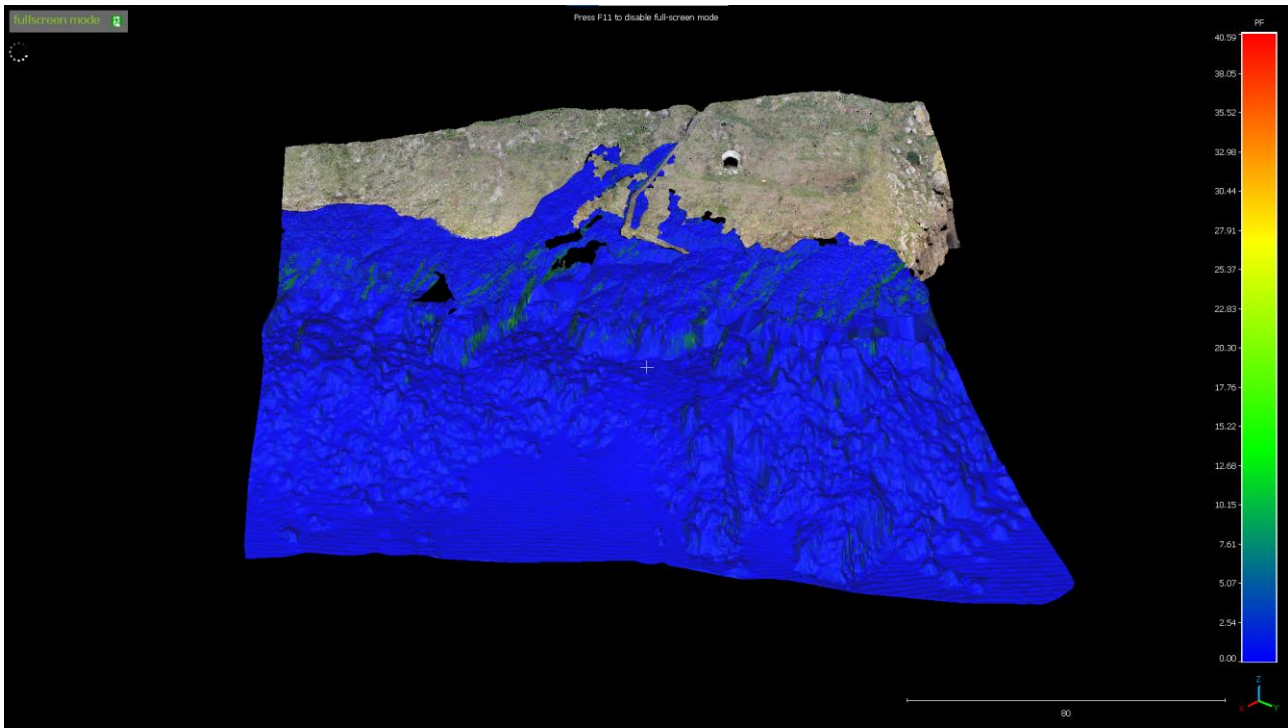


Figura 57 - Mappa dell'indice di pericolosità cinematica per il meccanismo di scivolamento planare (Scalo 4).

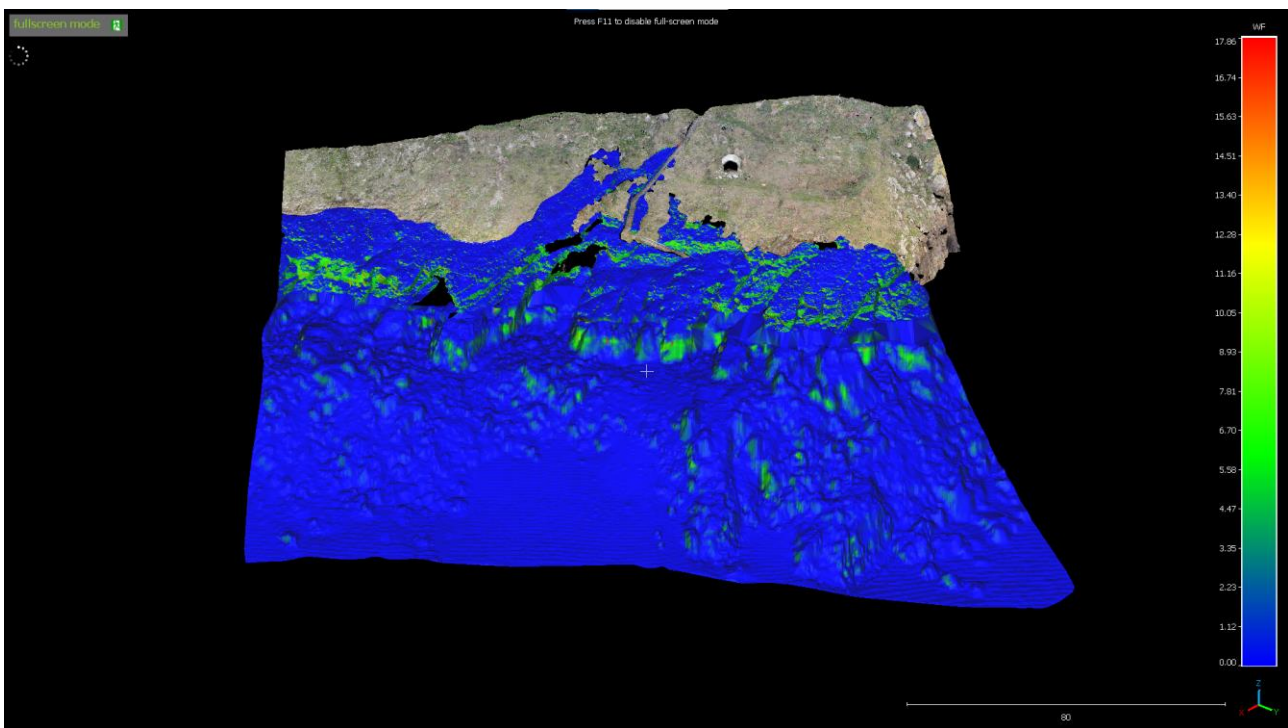


Figura 58 - Mappa dell'indice di pericolosità cinematica per il meccanismo di scivolamento cunei (Scalo 4).

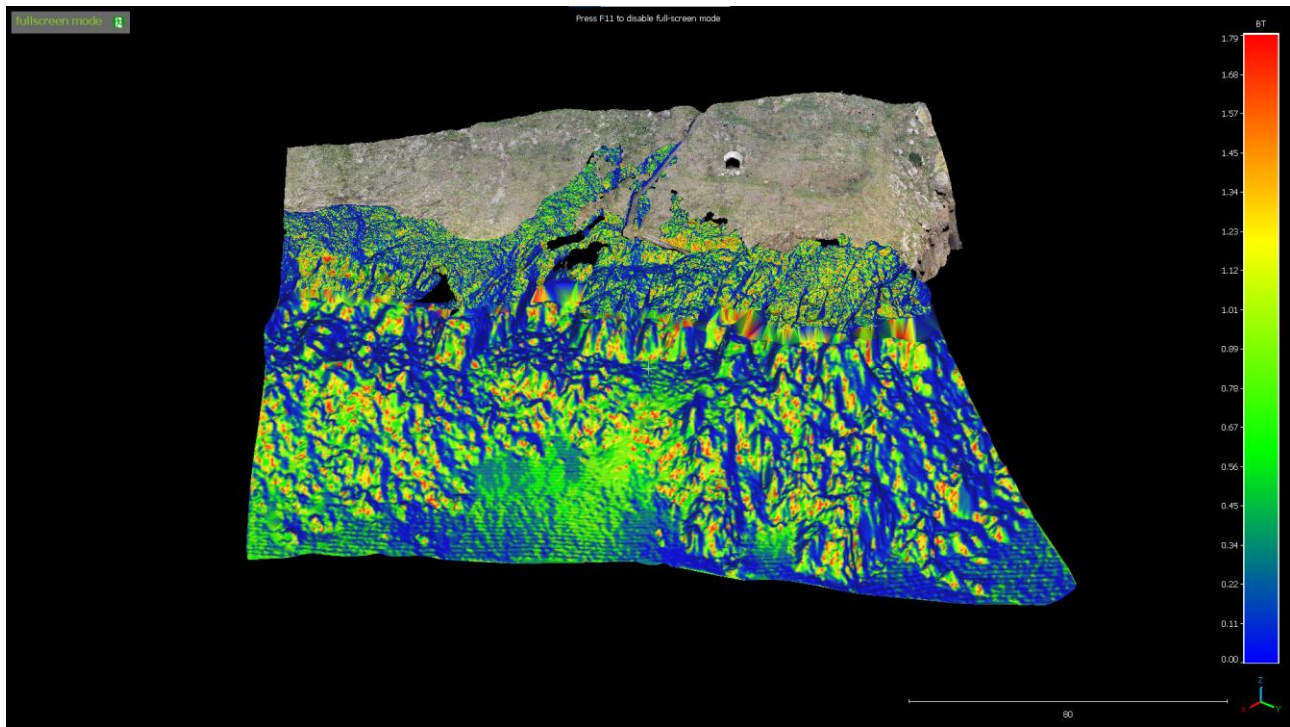


Figura 59 - Mappa dell'indice di pericolosità cinematica per i meccanismi di ribaltamento diretto (Scalo 4).

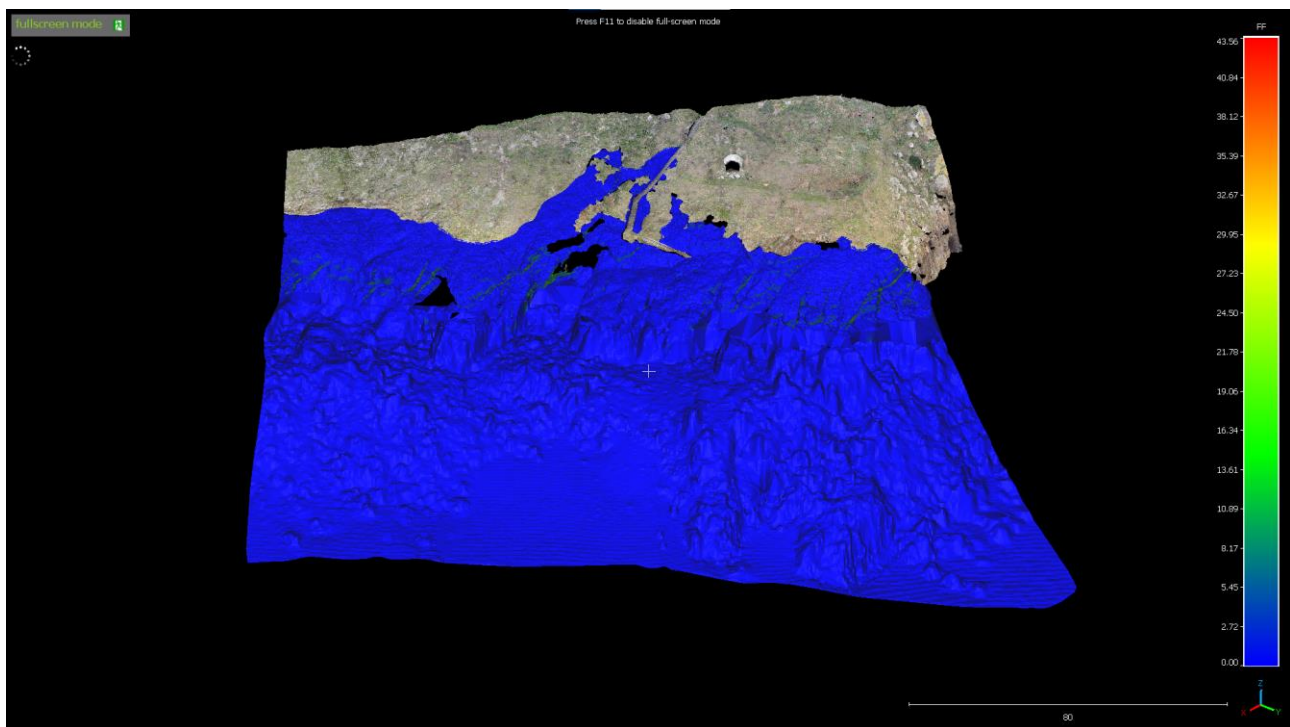


Figura 60 - Mappa dell'indice di pericolosità cinematica per il meccanismo di caduta libera (Scalo 4).

	PF (%)	WF (%)	BT (%)	FF (%)	FT (%)	GKI (%)
max	40.6	17.9	1.8	43.5	40.6	59.1
media	1.8	1.6	0.4	0.6	4.6	8.6
dev std	3.9	3.0	0.5	2.9	7.5	11.7

Tabella 19 - Valori massimi, medi e deviazione standard degli indici di instabilità cinematica per lo Scalo n.4.

Dalle figure precedenti e dai valori di Tabella 19 si evince che i meccanismi di dissesto con indice più alto siano quelli di caduta libera con valori massimi di 43.5%, scivolamento planare e ribaltamento di flessura, entrambi con valori massimi di 40.6%. Gli altri meccanismi mostrano indici nettamente più bassi con valori massimi rispettivamente pari a 17.9% per lo scivolamento di cunei ed 1.8% per il ribaltamento di blocchi (praticamente assente). Analizzando però i valori medi dei tre meccanismi con indice più alto si nota come il meccanismo di caduta libera è quello meno diffuso nonostante registri il valore di picco più alto in quanto presente solo nelle porzioni di aggetto. Il meccanismo più probabile è invece il ribaltamento per flessura, che ha un valore medio maggiore e una deviazione standard minore, indice di una diffusione più omogenea nell'area. Ai meccanismi citati in precedenza si aggiunge anche il meccanismo di scivolamento di cunei (WF, *wedge failure*) che, presenta un valore di picco nettamente inferiore rispetto ai meccanismi citati in precedenza e un valore medio abbastanza ridotto, sintomo di una diffusione limitata nell'area. Il meccanismo di ribaltamento di blocchi (BT, *block toppling*) risulta invece essere quasi assente, con valori ridotti sia per il massimo che per la media. I valori massimi dell'indice cinematico globale sono pari a 59.1%.

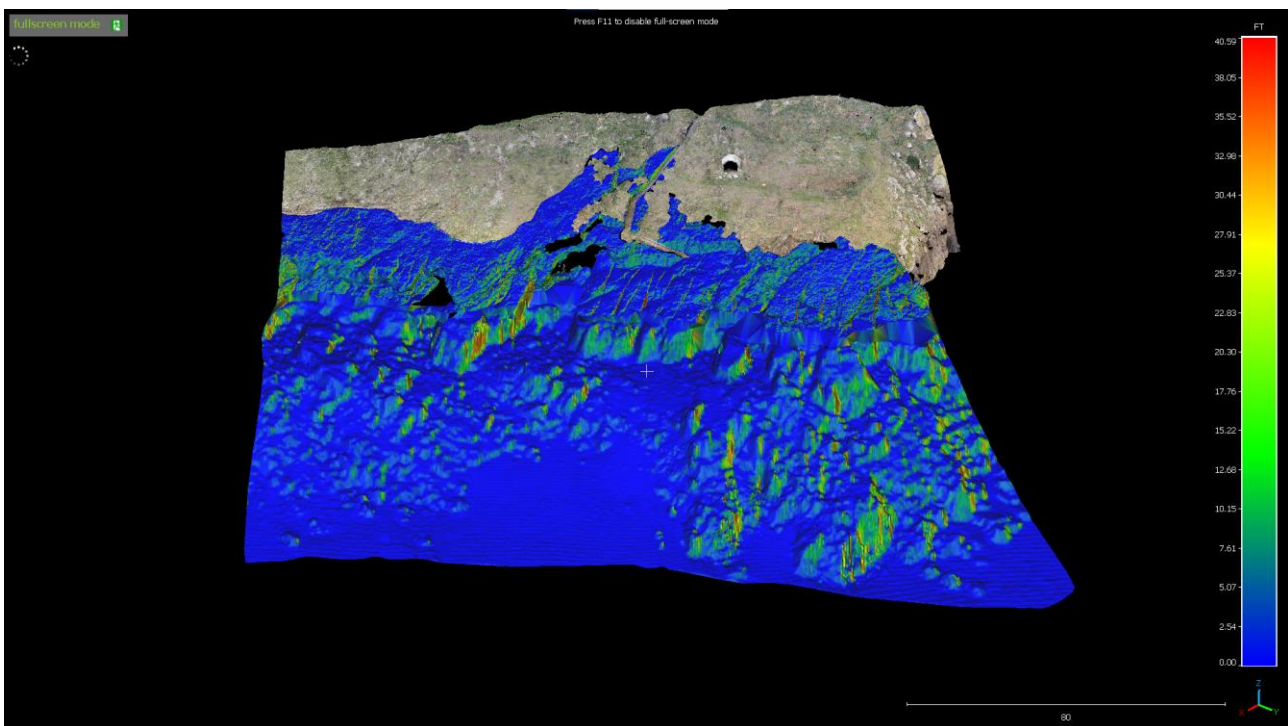


Figura 61 - Mappa dell'indice di pericolosità cinematica per il meccanismo di ribaltamento di flessura (Scalo 4).

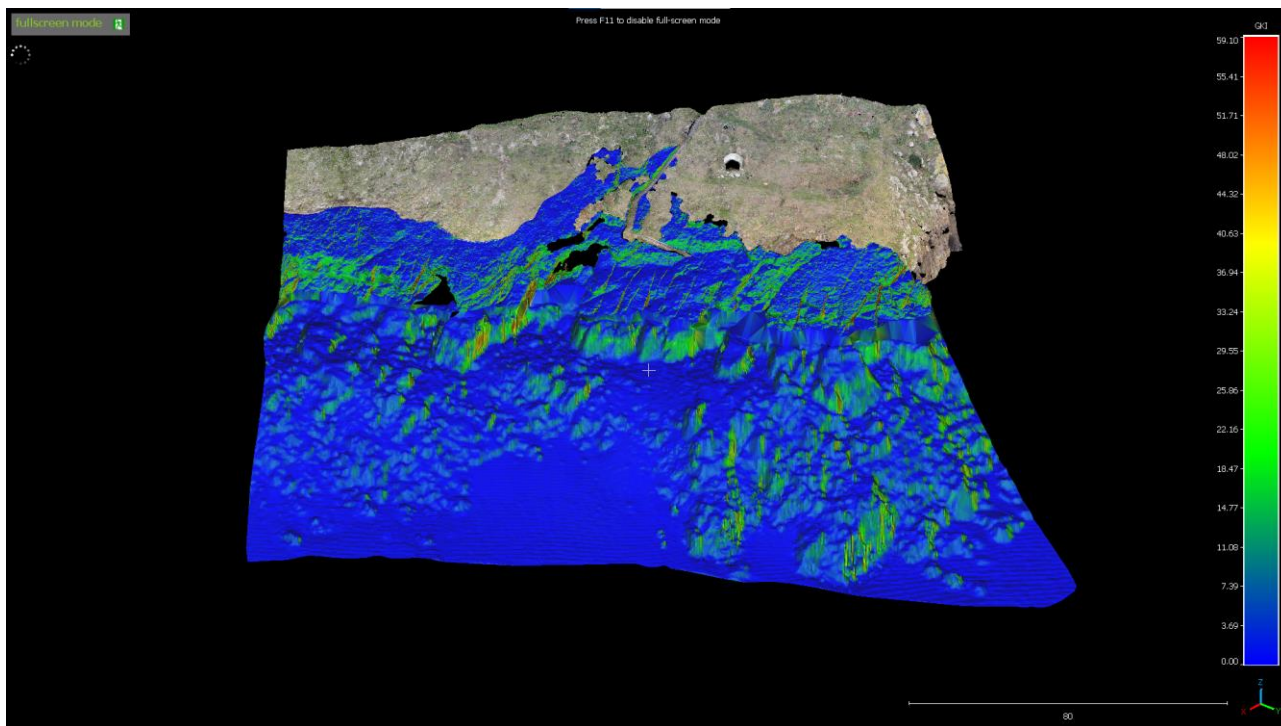


Figura 62 -Mappa dell'indice di pericolosità cinematica globale per i meccanismi di dissesto esaminati (Scalo 4).

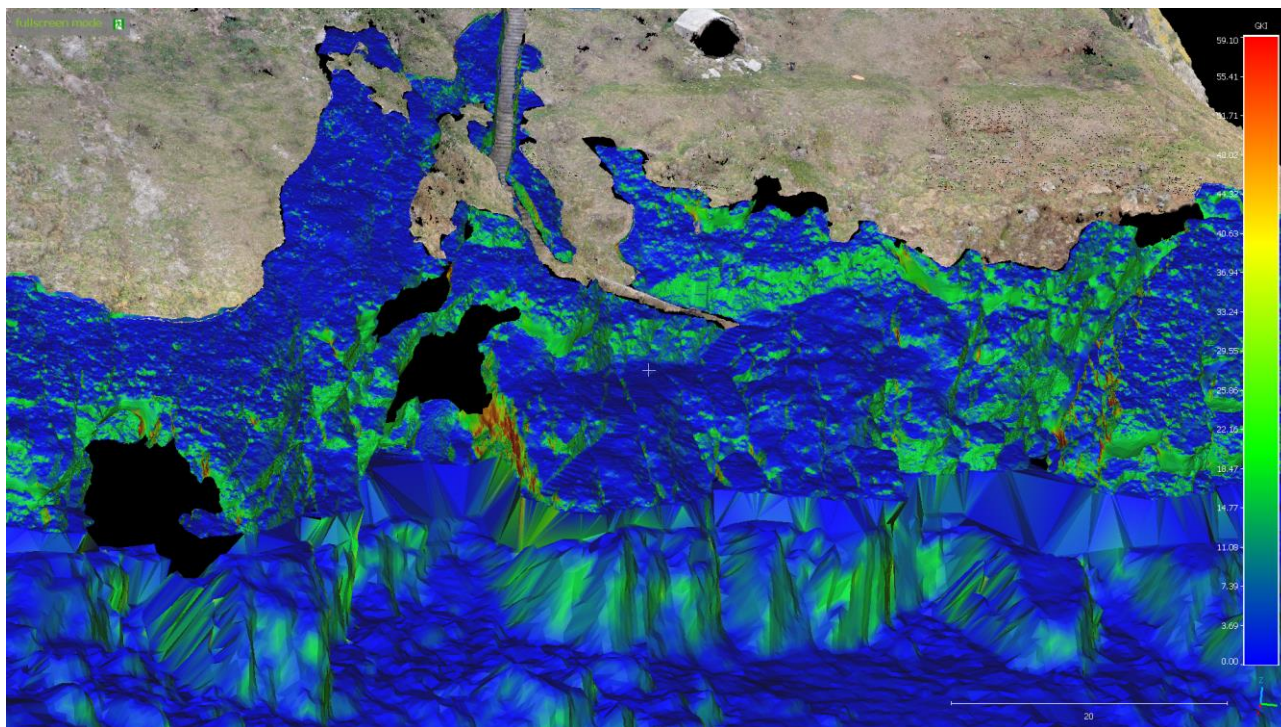


Figura 63 - Dettaglio dell'approdo dello Scalo 4 della mappa dell'indice di pericolosità cinematica globale per i meccanismi di dissesto esaminati.

Per osservare più in dettaglio i risultati dell'analisi cinematica quantitativa svolta sull'area dello Scalo n.4 sono stati realizzati degli inquadramenti di dettaglio (Figura 65) con lo scopo di individuare, all'interno dell'area dell'approdo analizzata, i settori con i valori maggiori di indice di pericolosità cinematica globale e i relativi meccanismi di dissesto. Le risultanze di questa analisi di dettaglio sono illustrate di seguito.

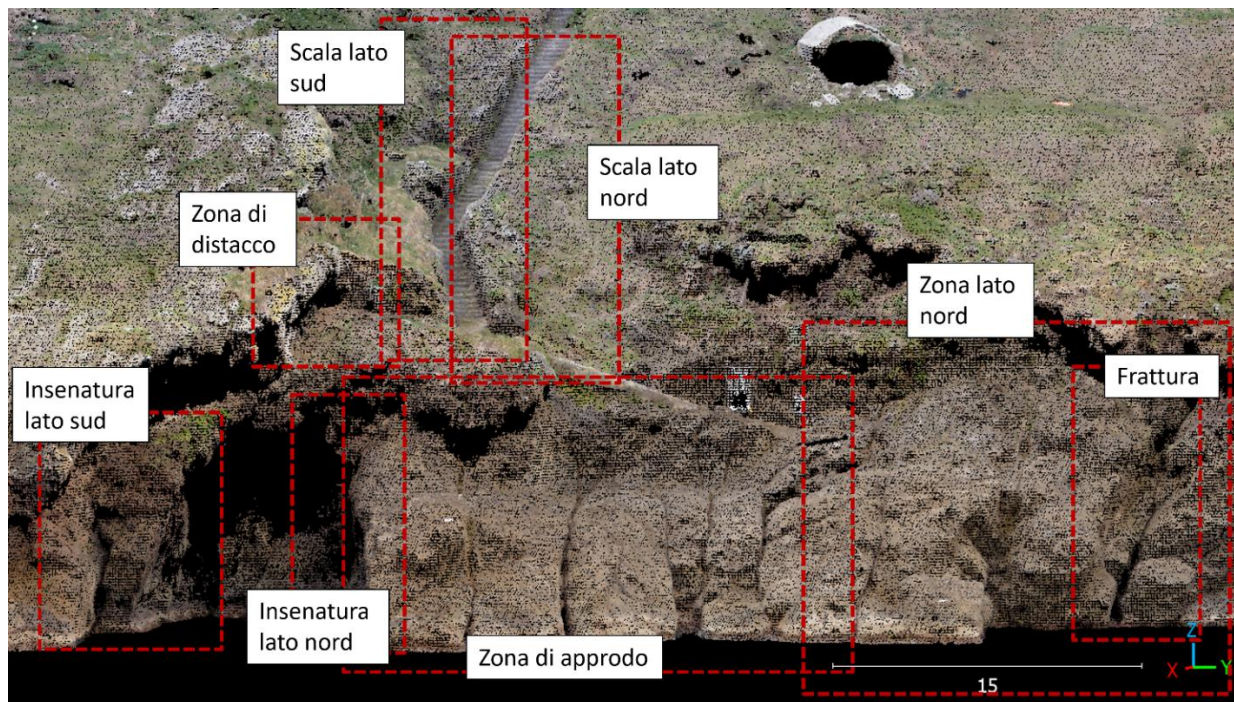


Figura 65 - Inquadramento delle zone di dettaglio analizzate presso lo Scalo n.4.

INSENATURA LATO SUD

Come si può notare dalla Figura 66, il lato sud dell'insenatura naturale situata a sud dell'approdo presenta quattro zone con indice di pericolosità cinematica globale elevato; si tratta principalmente di tratti di parete più o meno verticali con porzioni anche aggettanti. I valori di pericolosità cinematica globale elevati sono dovuti principalmente a ribaltamento flessurale (FT, *flexural toppling*) e in secondo luogo da caduta libera (FF, *free fall*) e scivolamento planare (PF, *planar failure*). Nei settori evidenziati sono presenti anche valori relativi medi di ribaltamento di cunei (WF, *wedge failure*) che però nell'analisi generale dello Scalo n.4 presenta valori contenuti rispetto agli altri meccanismi di dissesto e l'influenza di questo meccanismo risulta inferiore rispetto a quella dei meccanismi precedentemente indicati (Figura 67).

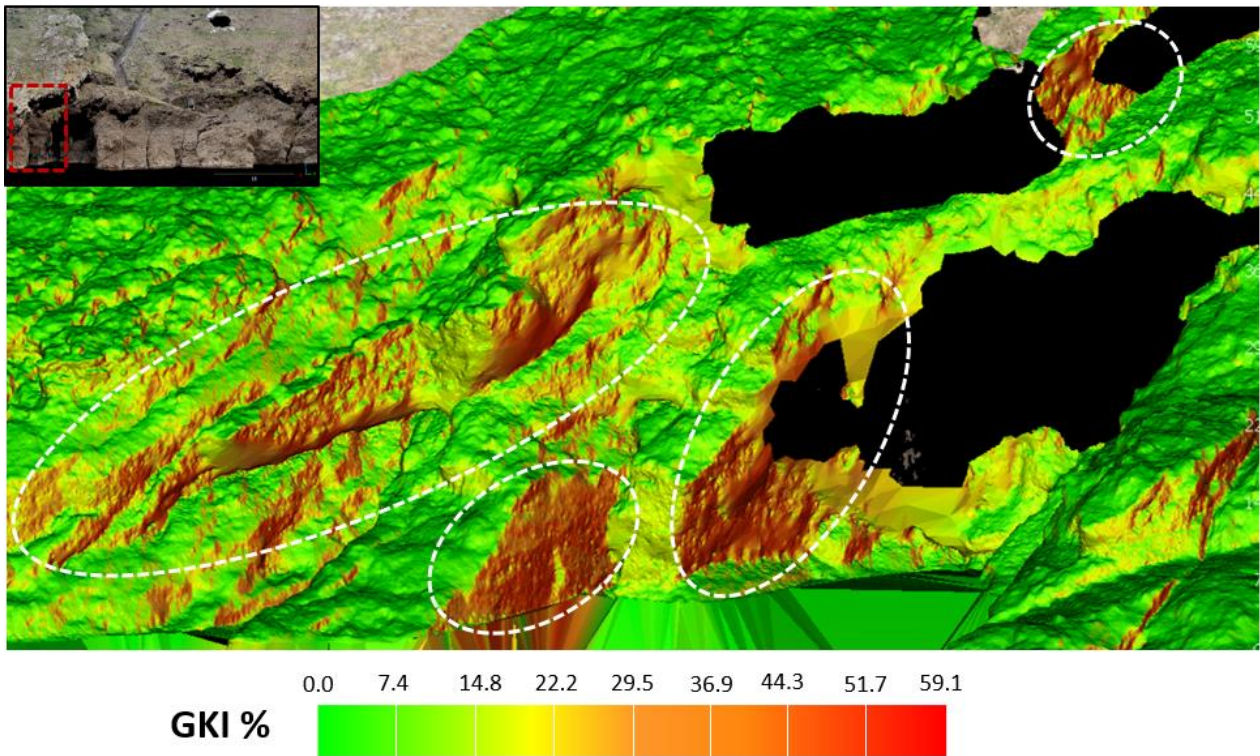


Figura 66 - Indice di pericolosità cinematica globale del lato sud dell'insenatura naturale presente a sud della zona di approdo dello Scalo n.4 con individuazione delle aree a maggiore pericolosità (tratteggio bianco).

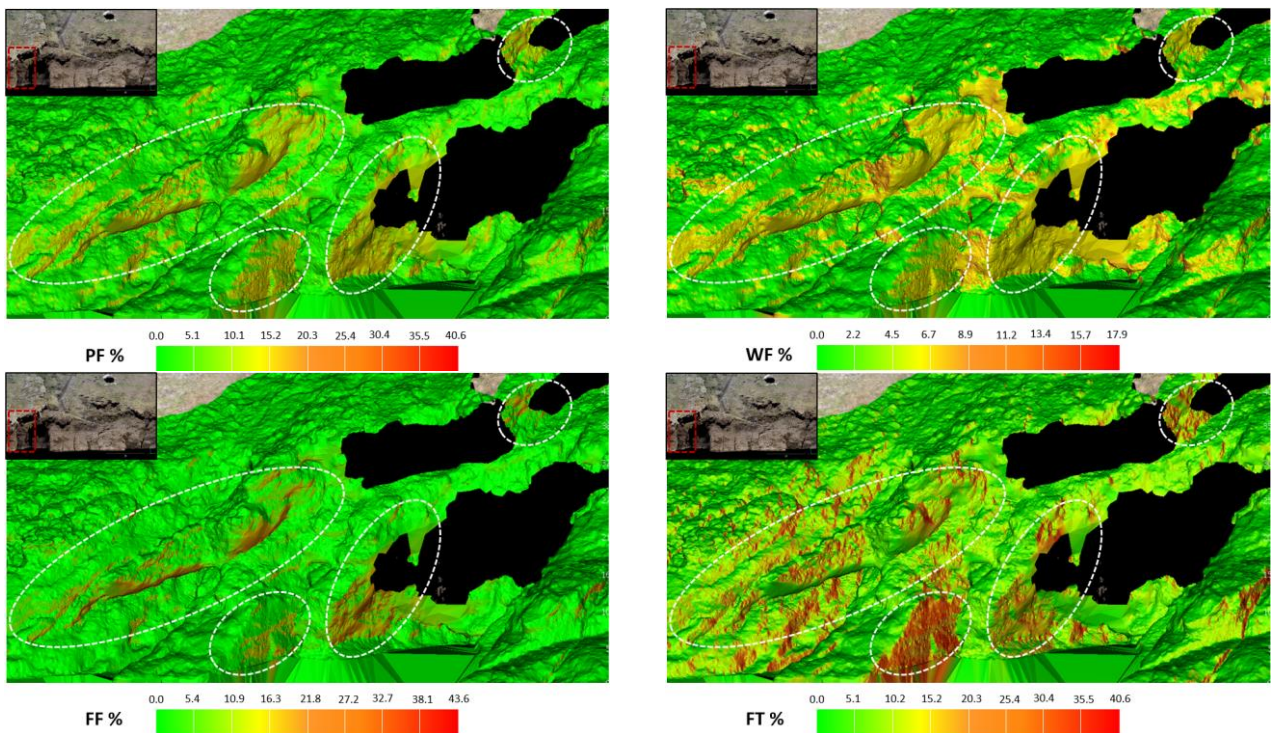


Figura 67 - Indice di pericolosità per scivolamento planare (PF, in alto a sinistra), per scivolamento di cunei (WF, in alto a destra), per caduta libera (FF, in basso a sinistra) e per ribaltamento flessurale (FT, in basso a destra) sul lato sud dell'insenatura naturale presente nell'area di studio dello Scalo n.4 con individuazione delle aree a maggiore pericolosità (tratteggio bianco).

INSENATURA LATO NORD

Il lato nord dell'insenatura naturale situata a sud dell'approdo presenta due zone con indice di pericolosità cinematica globale elevato (Figura 68). Si tratta di porzioni di parete circa verticali con parti anche aggettanti. I valori di pericolosità riscontrati nella zona più in alto sono dovuti principalmente a ribaltamento flessurale (FT, *flexural toppling*); i valori di pericolosità riscontrati nella zona più in basso sono invece dovuti principalmente a scivolamento planare (PF, *planar failure*) e in secondo luogo a ribaltamento di cunei (WF, *wedge failure*) che nell'area in esame presenta valori relativi elevati per questo meccanismo che però, come già visto in precedenza, nell'analisi generale dello Scalo n.4 presenta valori contenuti rispetto agli altri meccanismi di dissesto (Figura 69).

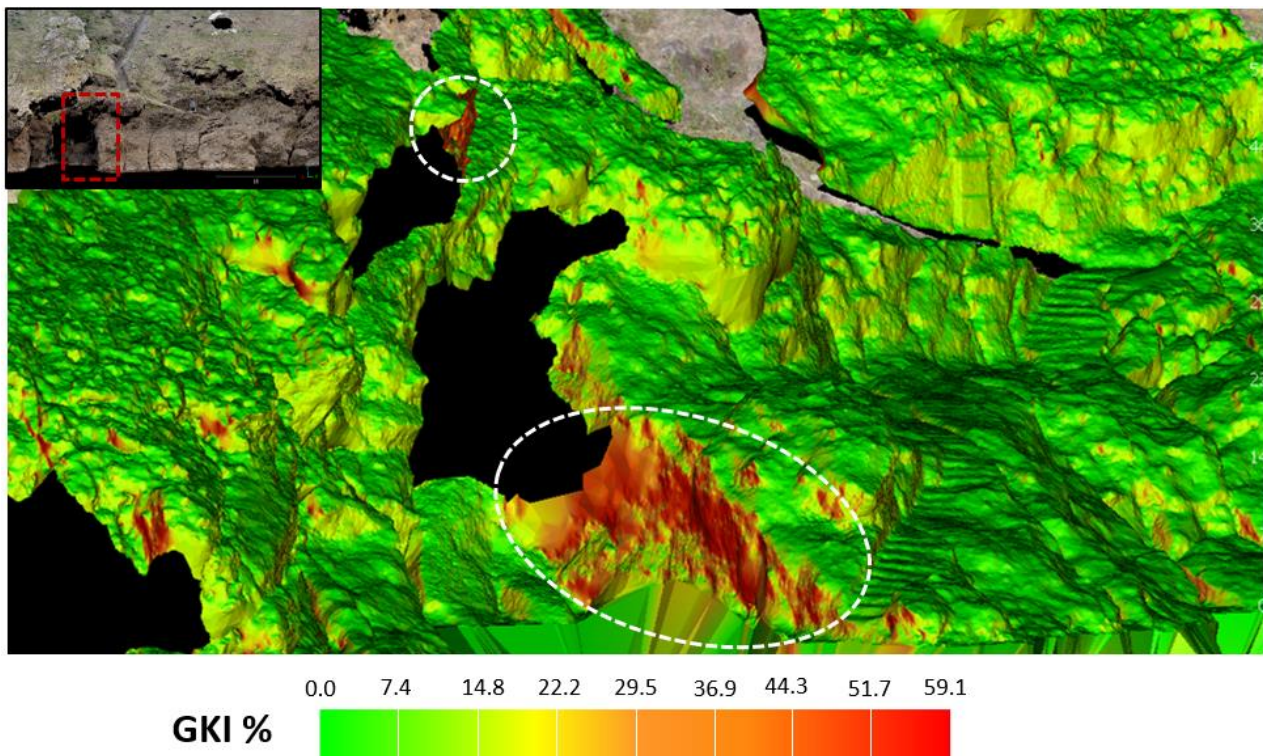


Figura 68 - Indice di pericolosità cinematica globale del lato nord dell'insenatura naturale presente a sud della zona di approdo dello Scalo n.4 con individuazione delle aree a maggiore pericolosità (tratteggio bianco).

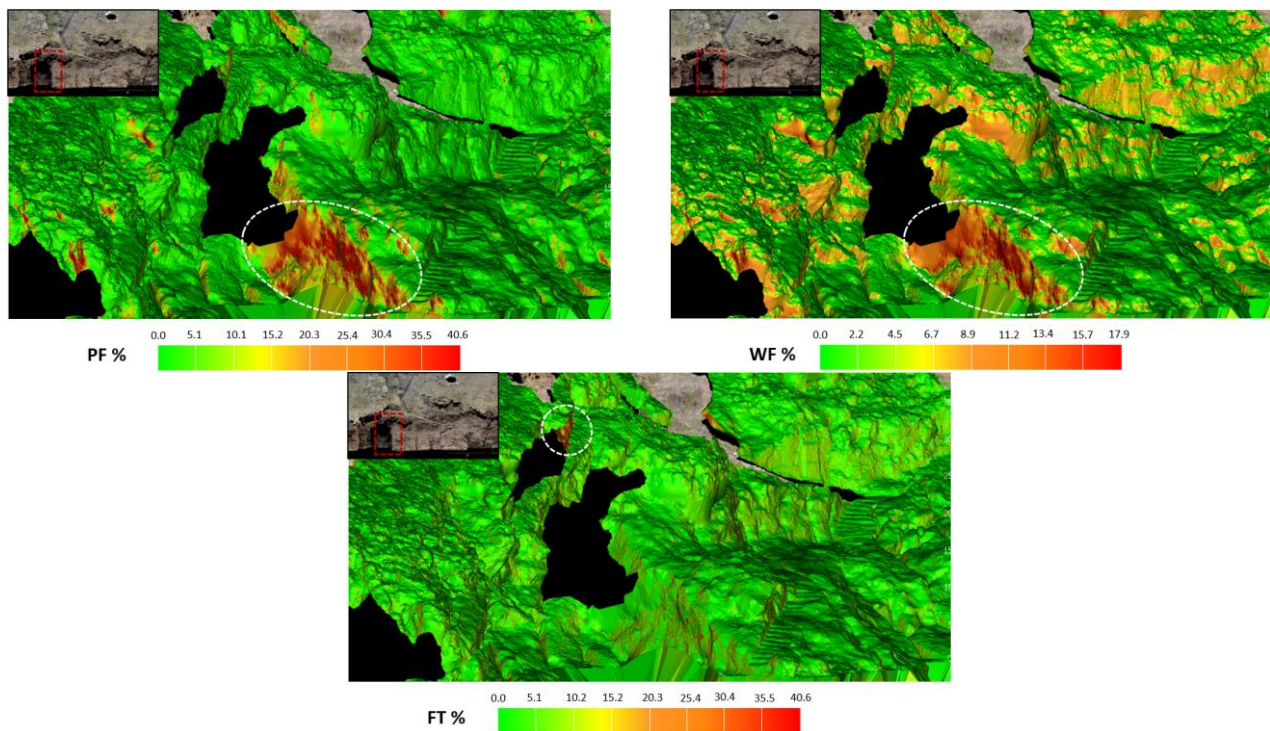


Figura 69 - Indice di pericolosità per scivolamento planare (PF, in alto a sinistra), per scivolamento di cunei (WF, in alto a destra) e per ribaltamento flessurale (FT, in basso) sul lato nord dell'insenatura naturale presente nell'area di studio dello Scalo n.4 con individuazione delle aree a maggiore pericolosità (tratteggio bianco).

ZONA DI APPRODO

La zona di approdo dello Scalo n.4 presenta cinque zone localizzate con indice di pericolosità cinematica globale elevato (Figura 70); queste sono situate sui lati degli impluvi presenti nell'area e quindi i valori elevati degli indici di pericolosità sono probabilmente legati a fenomeni localizzati dove la morfologia, a seguito dell'azione dell'acqua ha un'orientazione sfavorevole rispetto a quella delle discontinuità.

I meccanismi di dissesto legati a tali indici sono lo scivolamento planare (PF, *planar failure*) e il ribaltamento flessurale (FT, *flexural toppling*), con in secondo luogo anche in questo caso il ribaltamento di cunei (WF, *wedge failure*), che presenta valori relativi medi come spiegato per le precedenti aree (Figura 71).

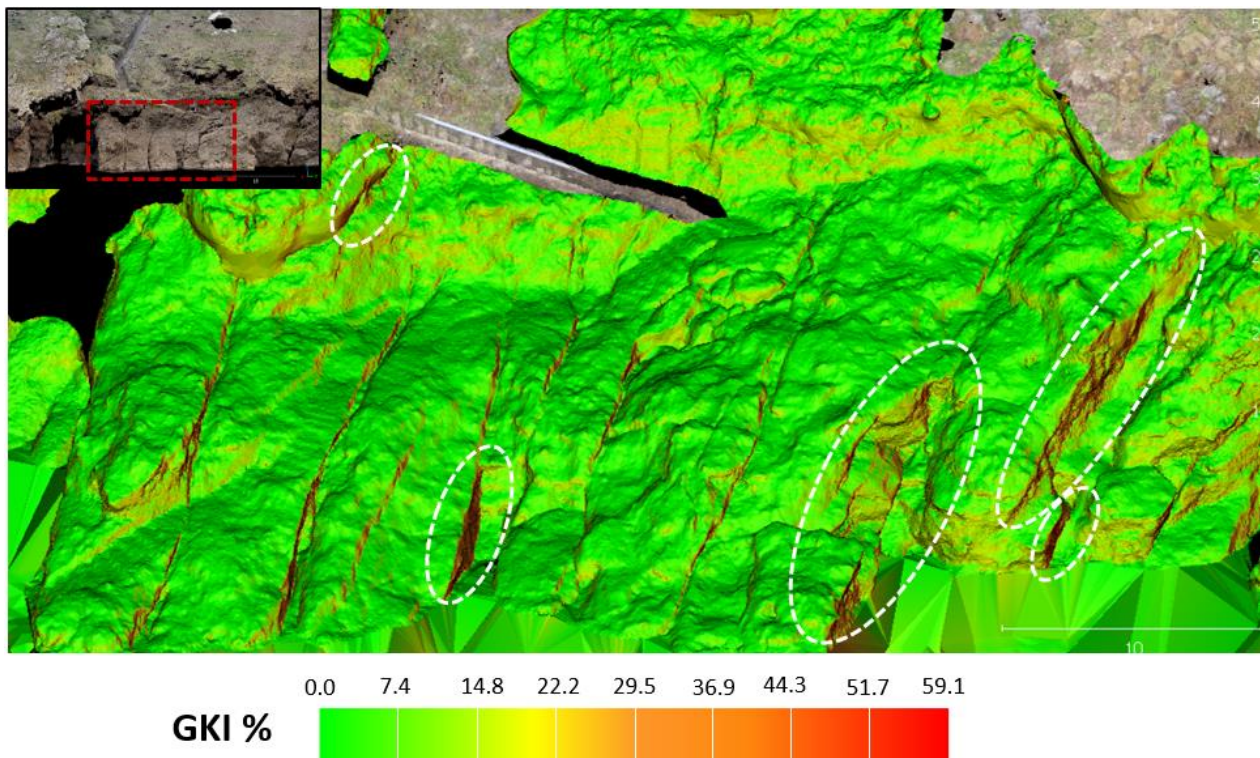


Figura 70 - Indice di pericolosità cinematica globale della zona di approdo dello Scalo n.4 con individuazione delle aree a maggiore pericolosità (tratteggio bianco).

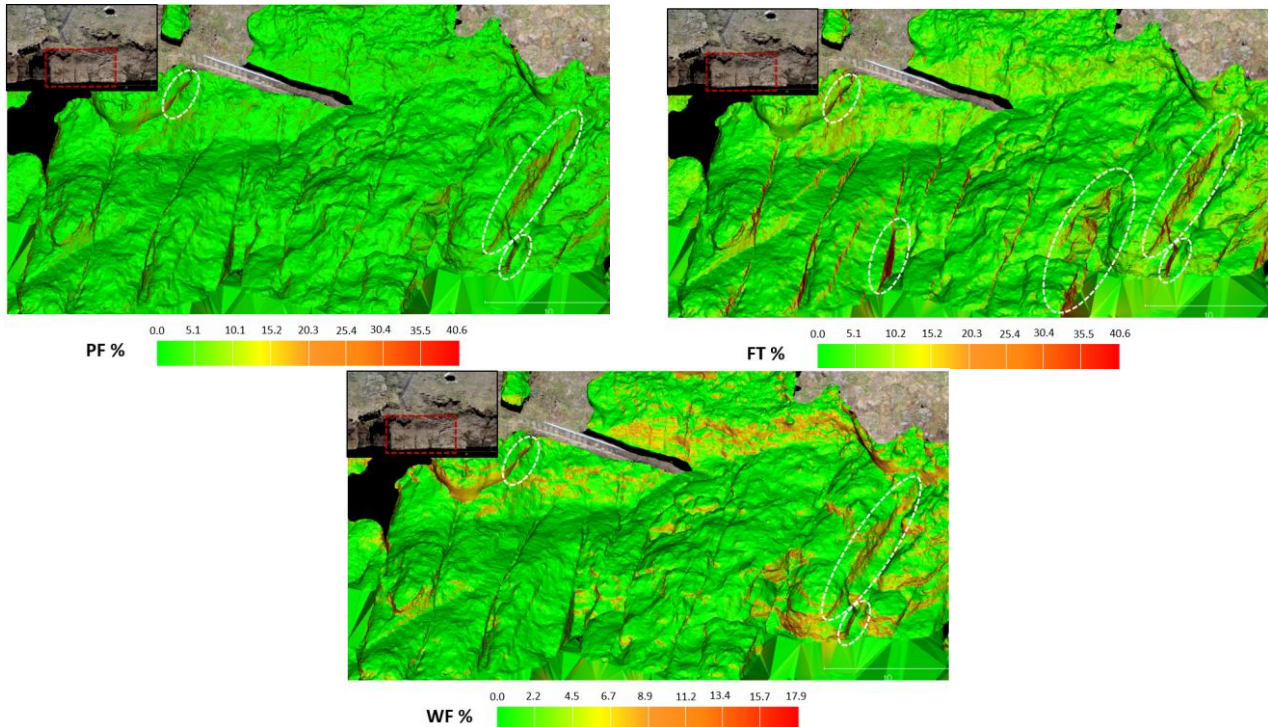


Figura 71 - Indice di pericolosità per scivolamento planare (PF, in alto a sinistra), per ribaltamento flessurale (FT, in alto a destra) e per scivolamento di cunei (WF, in basso) nella zona di approdo dello Scalo n.4 con individuazione delle aree a maggiore pericolosità (tratteggio bianco).

ZONA A NORD DELL'APPRODO

Come si può notare dalla Figura 72, la zona a nord dell'approdo dello Scalo n.4 presenta una zona con indice di pericolosità cinematica globale medi che spiccano rispetto al resto dell'area, costituita principalmente da porzioni aggettanti. I valori di pericolosità riscontrati sono dovuti principalmente a ribaltamento flessurale (FT, *flexural toppling*) e ribaltamento di cunei (WF, *wedge failure*) che nell'area in esame presenta valori relativi medio-alti per questo meccanismo che però, come già spiegato, nell'analisi generale dello Scalo n.4 presenta valori contenuti rispetto agli altri meccanismi di dissesto (Figura 73).

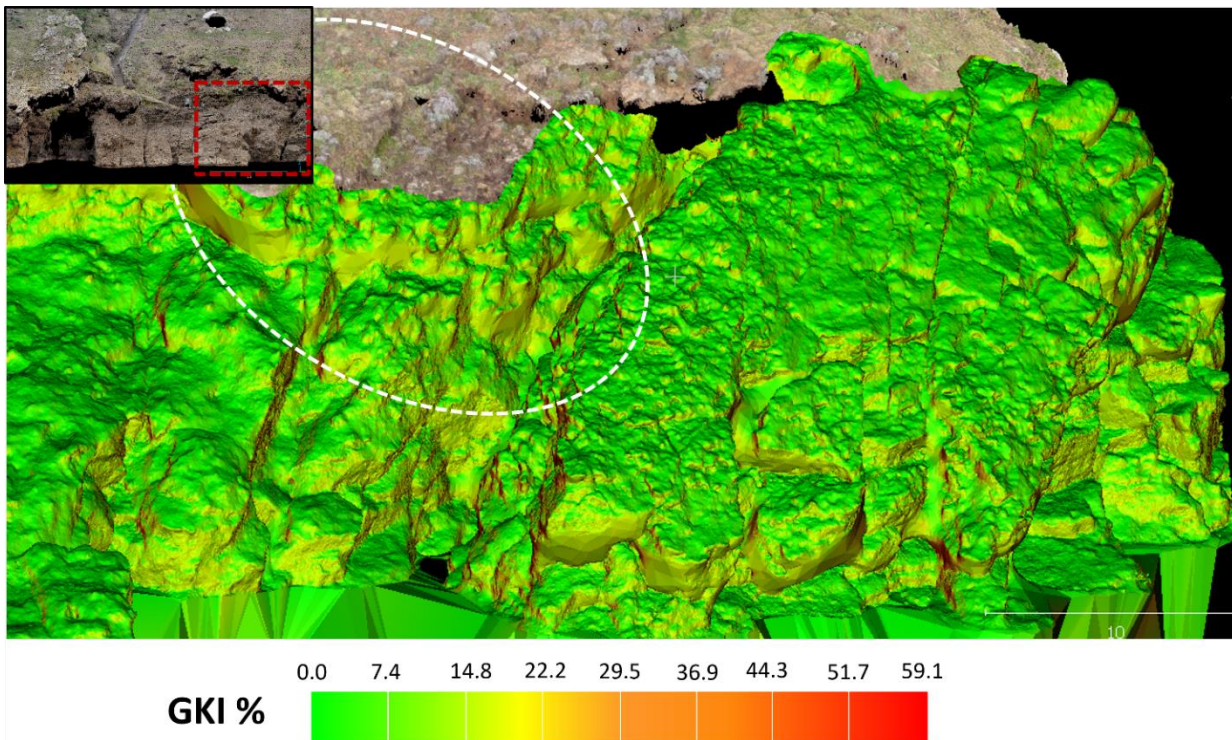


Figura 72 - Indice di pericolosità cinematica globale della zona a nord dell'approdo dello Scalo n.4 con individuazione delle aree a maggiore pericolosità (tratteggio bianco).

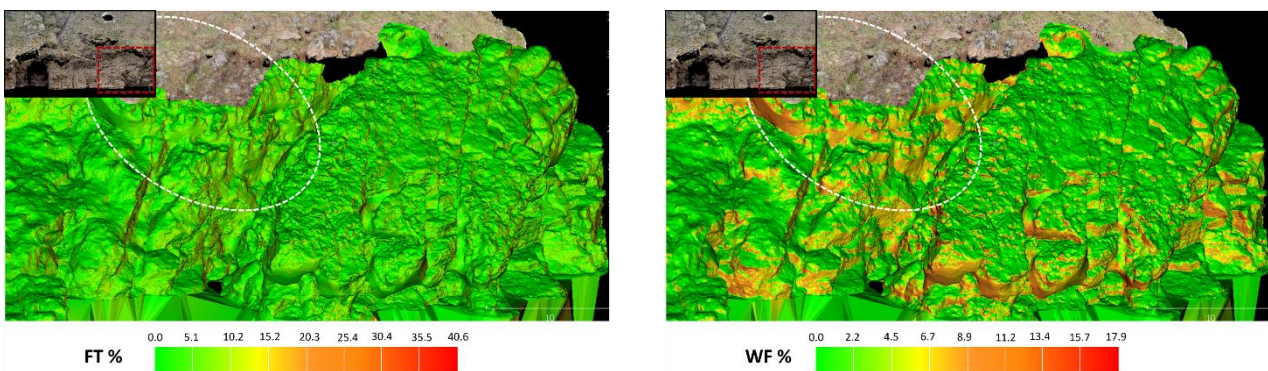


Figura 73 - Indice di pericolosità per ribaltamento flessurale (FT, a sinistra) e per scivolamento di cunei (WF, a destra) sulla zona a nord dell'approdo dello Scalo n.4 con individuazione delle aree a maggiore pericolosità (tratteggio bianco).

DETTAGLIO FRATTURA A NORD DELLA ZONA DI APPRODO

La zona di dettaglio della frattura a nord della zona di approdo dello Scalo n.4 presenta un' area abbastanza estesa con indice di pericolosità cinematica globale elevato, costituita principalmente da porzioni verticali o aggettanti (Figura 74). I valori di pericolosità riscontrati sono dovuti principalmente a scivolamento planare (PF, *planar failure*), ribaltamento flessurale (FT, *flexural toppling*) e ribaltamento di cunei (WF, *wedge failure*) che nell'area in esame presenta valori relativi elevati per questo meccanismo che però, come già spiegato, nell'analisi generale dello Scalo n.4 presenta valori contenuti rispetto agli altri meccanismi di dissesto (Figura 75).

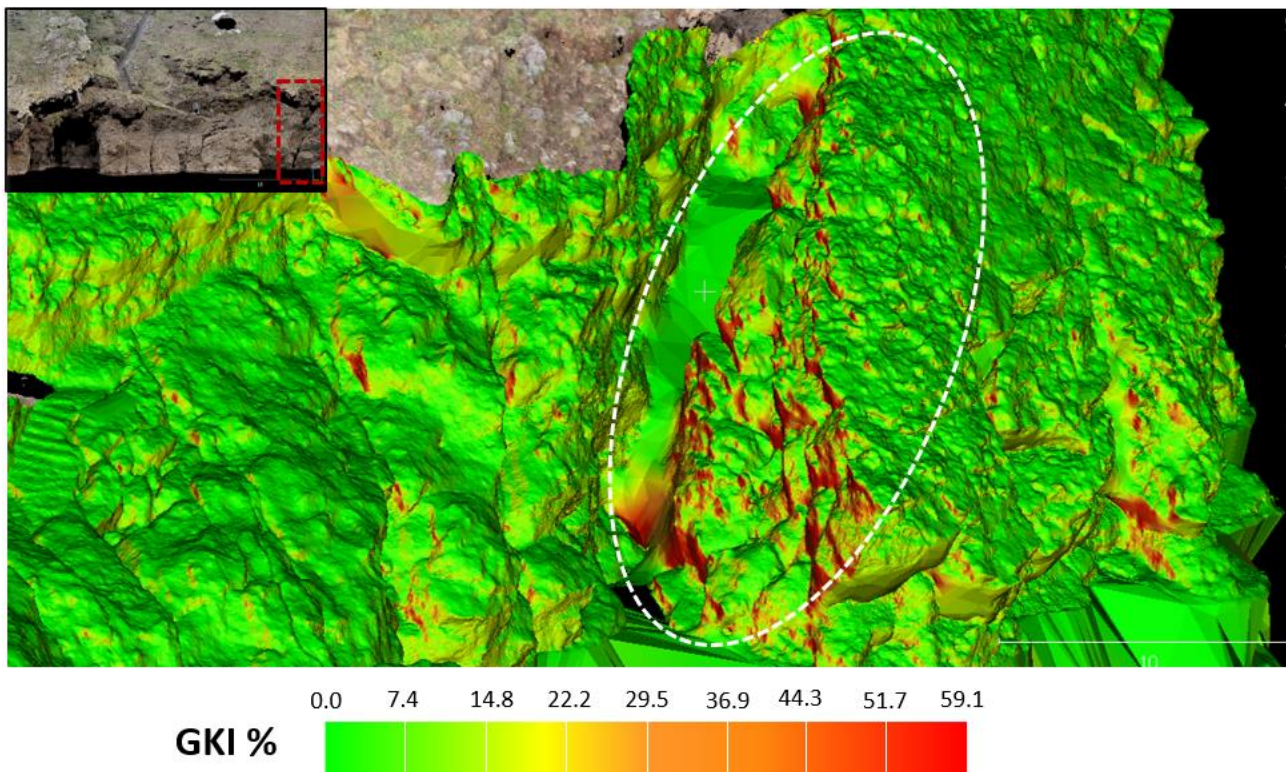


Figura 74 - Indice di pericolosità cinematica globale della zona di dettaglio della frattura a nord della zona di approdo dello Scalo n.4 con individuazione delle aree a maggiore pericolosità (tratteggio bianco).

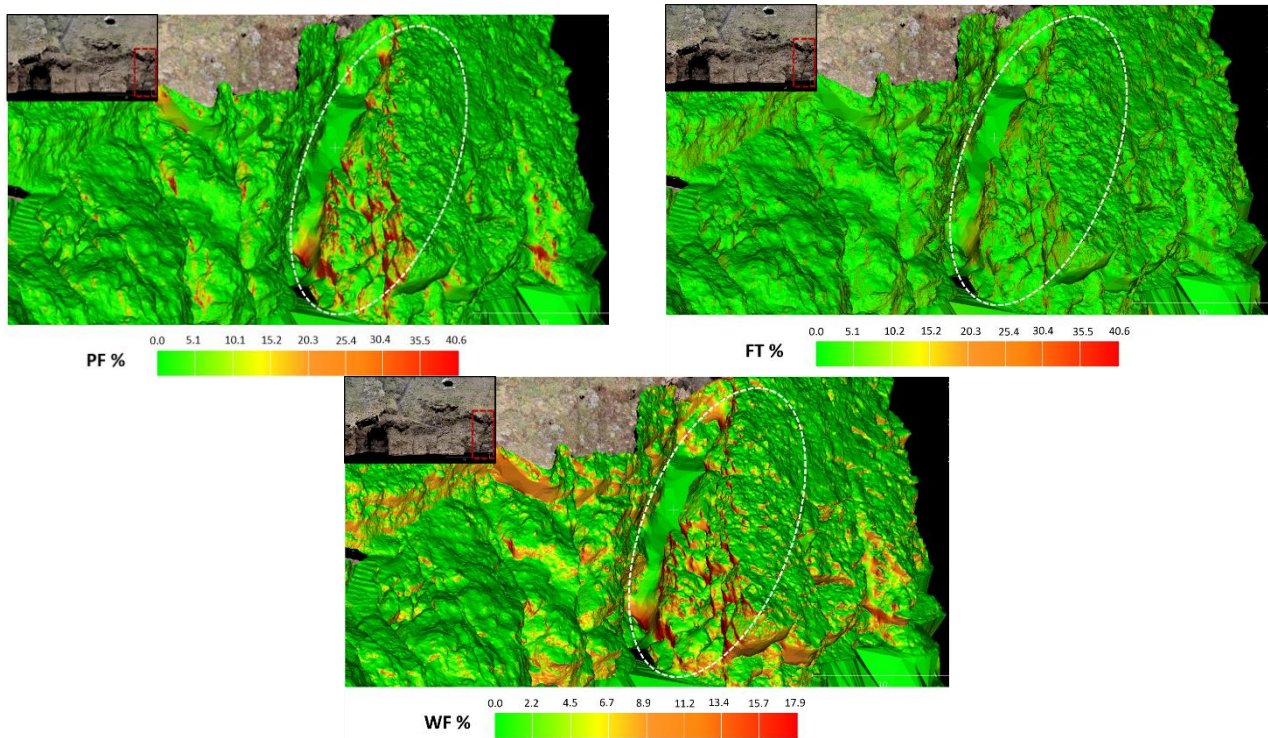


Figura 75 - Indice di pericolosità per scivolamento planare (PF, in alto a sinistra), ribaltamento flessurale (FT, in alto a destra) e per scivolamento di cunei (WF, in basso) sulla zona a nord della zona di approdo dello Scalo n.4 con individuazione delle aree a maggiore pericolosità (tratteggio bianco).

DETTAGLIO SCALINATA LATO NORD

Come si può notare dalla Figura 76, la zona di dettaglio della scalinata lato nord dello Scalo n.4 presenta due zone con indice di pericolosità cinematica globale elevato, entrambe situate lungo la parete della scalinata. I valori di pericolosità riscontrati sono dovuti principalmente a scivolamento planare (PF, *planar failure*), ribaltamento flessurale (FT, *flexural toppling*) e ribaltamento di cunei (WF, *wedge failure*) che nell'area in esame presenta valori relativi elevati per questo meccanismo che però, come già spiegato, nell'analisi generale dello Scalo n.4 presenta valori contenuti rispetto agli altri meccanismi di dissesto (Figura 77).

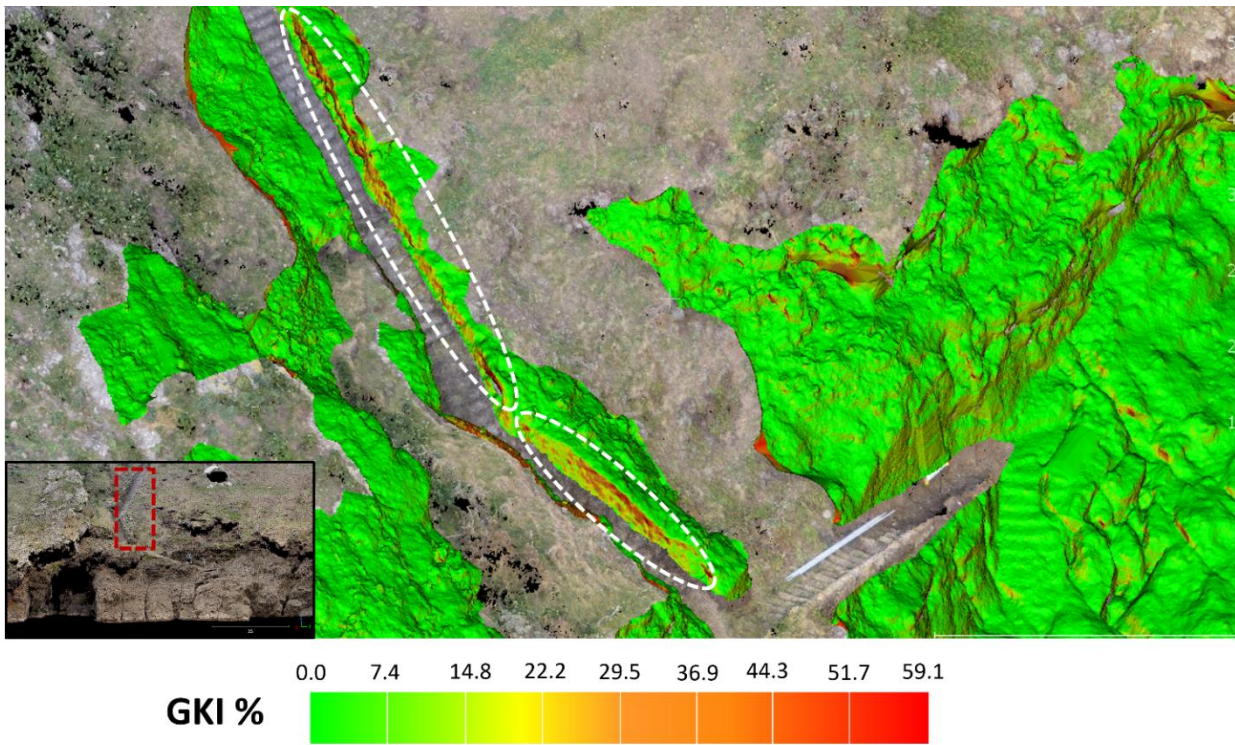


Figura 76 - Indice di pericolosità cinematica globale della zona di dettaglio della scalinata lato nord dello Scalo n.4 con individuazione delle aree a maggiore pericolosità (tratteggio bianco).

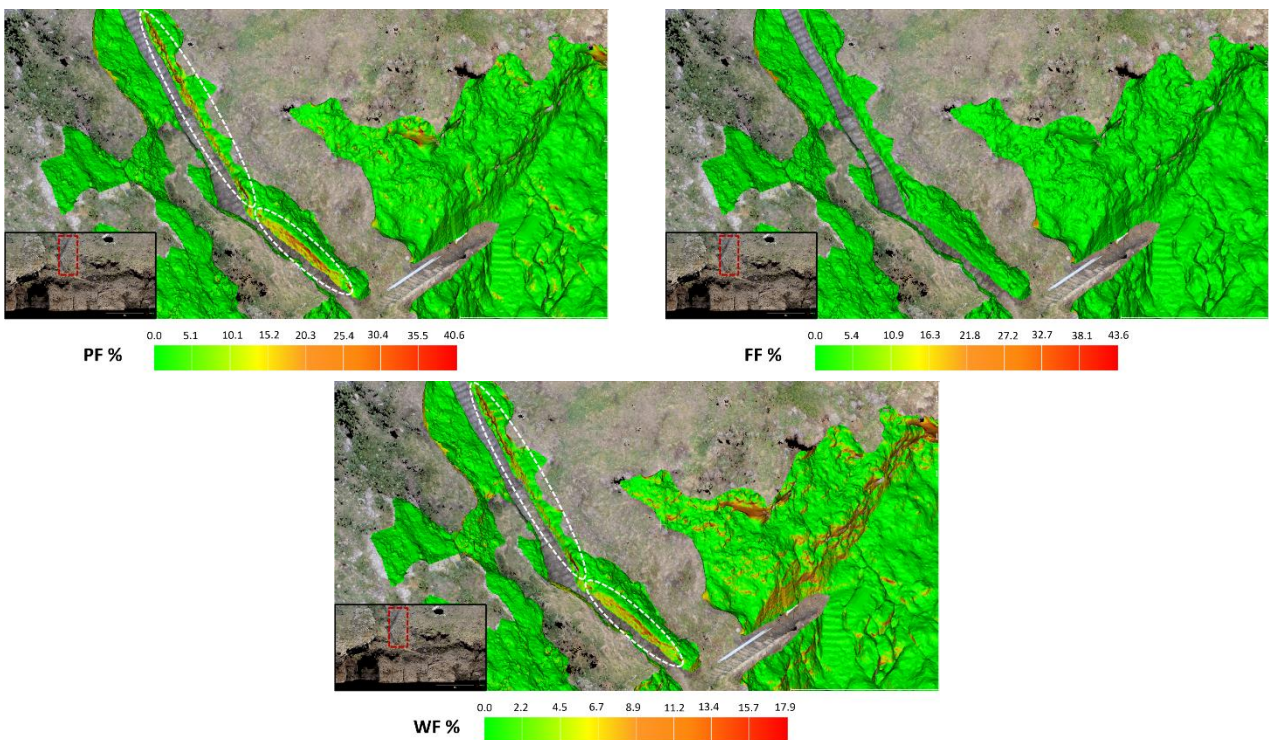


Figura 77 - Indice di pericolosità per scivolamento planare (PF, in alto a sinistra), ribaltamento flessurale (FT, in alto a destra) e per scivolamento di cunei (WF, in basso) sulla zona di dettaglio della scalinata lato nord dello Scalo n.4 con individuazione delle aree a maggiore pericolosità (tratteggio bianco).

DETTAGLIO SCALINATA LATO SUD

La zona di dettaglio della scalinata lato sud dello Scalo n.4 presenta tre zone con indice di pericolosità cinematica globale elevato, due situate lungo la parete della scalinata e una più a monte (Figura 78). I valori di pericolosità riscontrati sono dovuti principalmente a ribaltamento flessurale (FT, *flexural toppling*) tranne che nella parte più a monte dove si ha una piccola area con indice di pericolosità elevati derivanti da scivolamento planare (PF, *planar failure*) e ribaltamento di cunei (WF, *wedge failure*) che nell'area in esame presenta valori relativi molto elevati per questo meccanismo che però, come già spiegato, nell'analisi generale dello Scalo n.4 presenta valori contenuti rispetto agli altri meccanismi di dissesto (Figura 79).

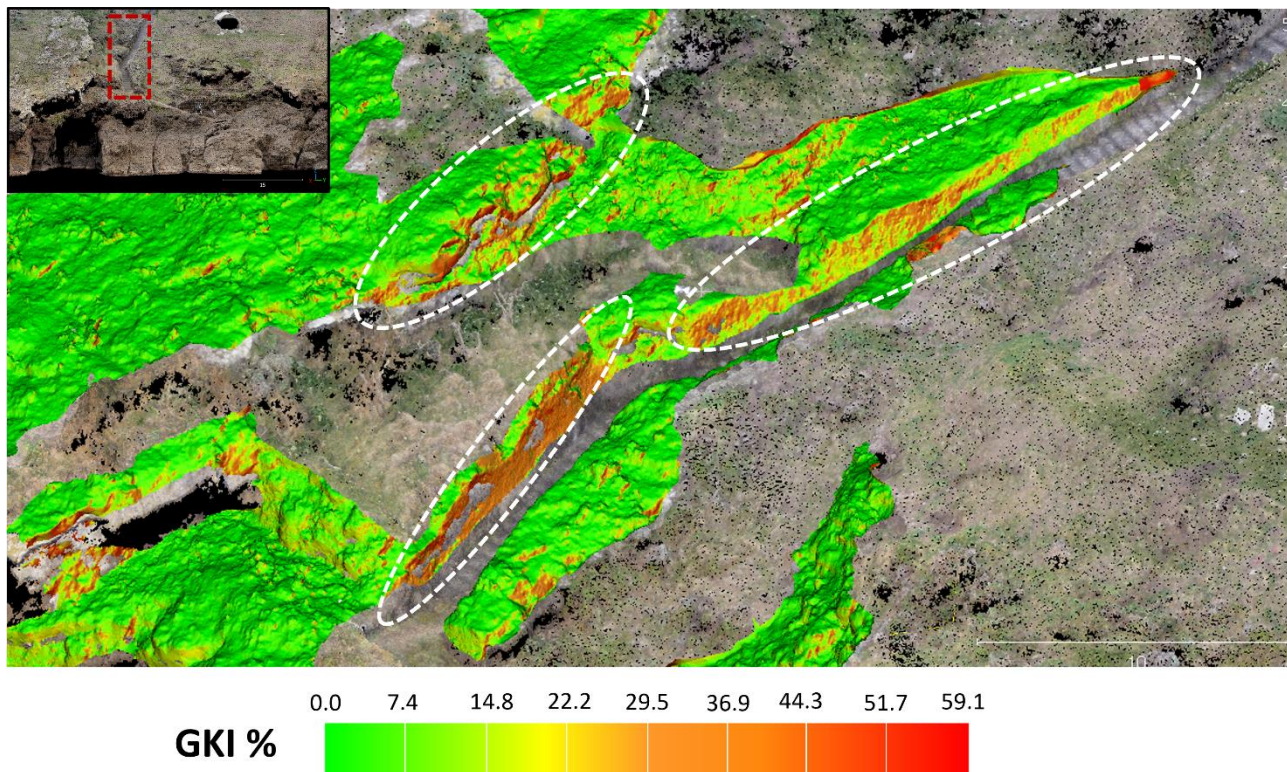


Figura 78 - Indice di pericolosità cinematica globale della zona di dettaglio della scalinata lato sud dello Scalo n.4 con individuazione delle aree a maggiore pericolosità (tratteggio bianco).

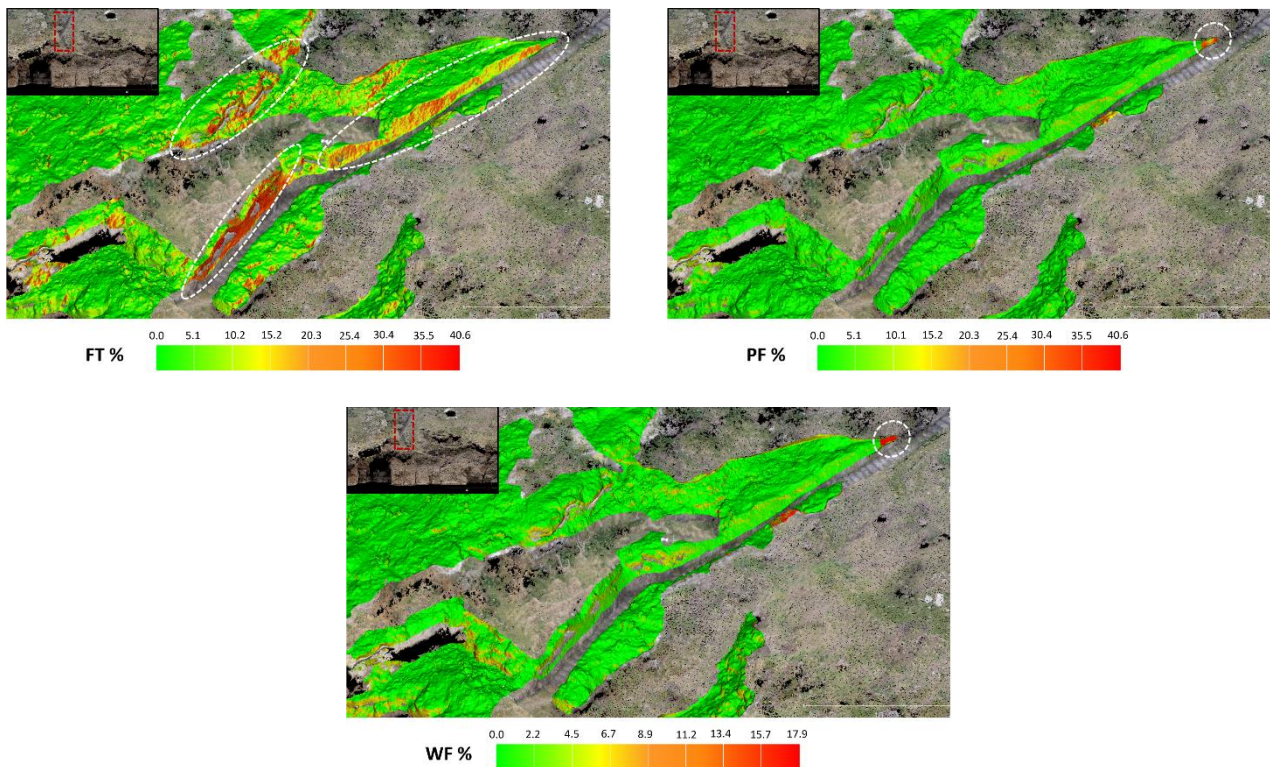


Figura 79 - Indice di pericolosità per ribaltamento flessurale (FT, in alto a sinistra), scivolamento planare (PF, in alto a destra) e per scivolamento di cunei (WF, in basso) sulla zona di dettaglio della scalinata lato sud dello Scalo n.4 con individuazione delle aree a maggiore pericolosità (tratteggio bianco).

ANALISI INDICI CINEMATICI NELLA ZONA DEL CROLLO

In seguito all'evento di distacco di materiale roccioso dalla parete a sud della scalinata, sopra l'insenatura naturale presente a sud della zona di approdo dello Scalo n.4 (Figura 80), verificatosi successivamente ai rilievi, nella seconda parte di febbraio 2023, è stato eseguito un approfondimento di dettaglio nell'area interessata per analizzare la natura del crollo.

L'evento può essere infatti usato per una calibrazione degli indici cinematici al fine di individuare un valore critico nella zonazione delle zone a maggiore propensione al dissesto nei due scali analizzati.

È possibile infatti definire un valore degli indici cinematici da considerarsi come soglia critica; questo permette nelle altre aree di identificare quali sono le aree più critiche, non basandosi esclusivamente sui valori relativi dell'indice di pericolosità, ma anche su un valore assoluto. Analizzando i valori degli indici di pericolosità nella zona di distacco si ottiene un valore medio di GKI pari a 37.7% ed un valore massimo pari a 59.1%.

Come si può notare dalla Figura 81, la zona da cui si è originato il crollo è caratterizzata da valori elevati di indice di pericolosità cinematica. Gli alti valori riscontrati sono dovuti principalmente a ribaltamento flessurale (FT, *flexural toppling*) e caduta libera (FF, *free fall*) che risultano essere probabilmente i meccanismi responsabili del crollo, e in secondo luogo da scivolamento planare (PF, *planar failure*) e da ribaltamento di cunei (WF, *wedge failure*) che presentano valori relativi medi, tenendo conto delle considerazioni fatte nelle analisi delle precedenti aree per il ribaltamento di cunei, valide anche in quest'area (Figura 82).



Figura 80 - Foto della zona di distacco post evento (tratteggio bianco) avvenuto presso lo Scalo n.4.

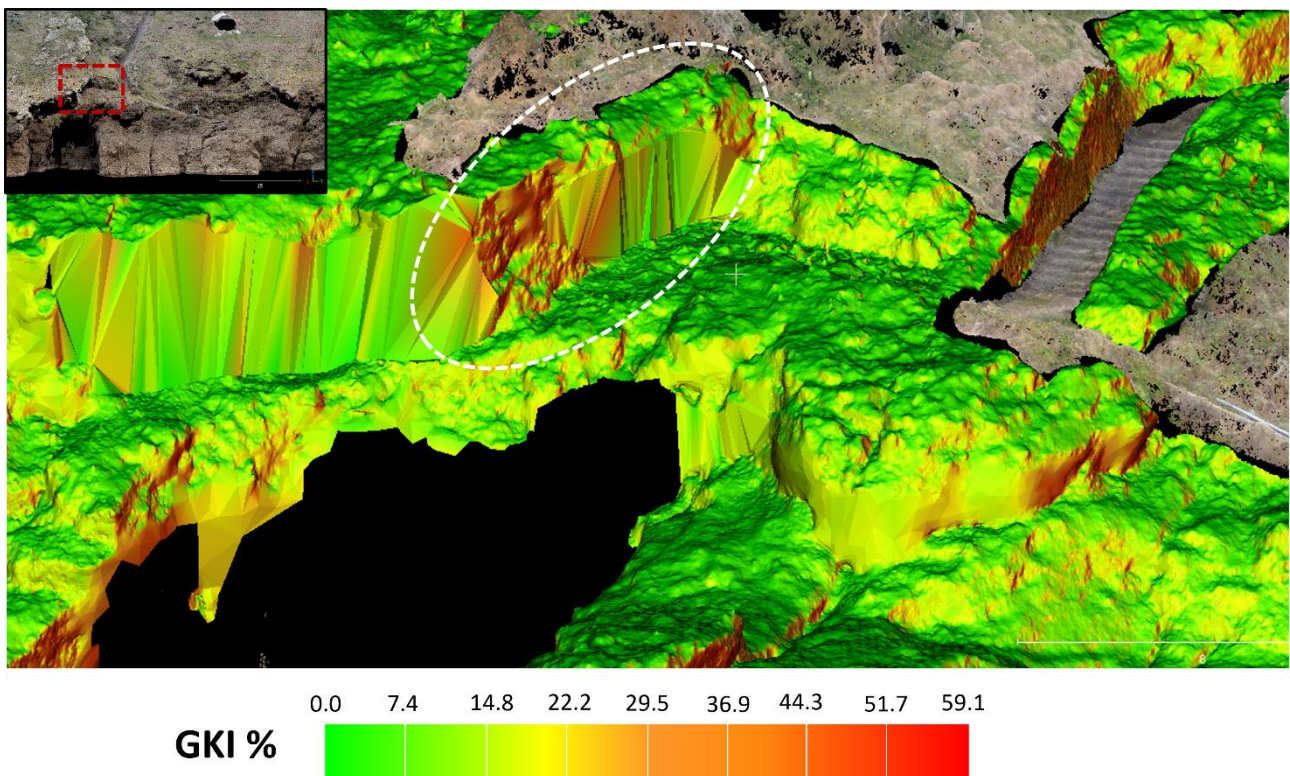


Figura 81 - Indice di pericolosità cinematica globale della zona di dettaglio crollo presso lo Scalo n.4 con individuazione dell'incide di pericolosità presente pre-evento nell'area di distacco (tratteggio bianco).

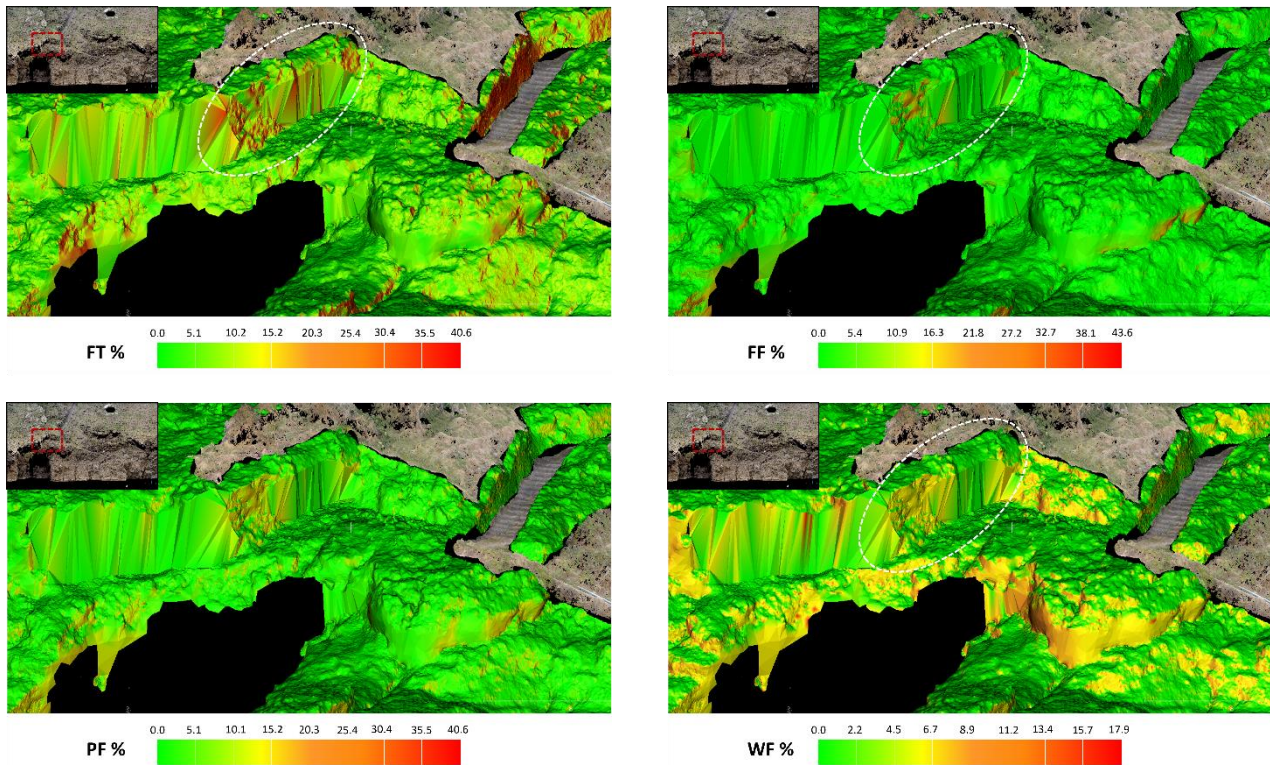


Figura 82 - Indice di pericolosità per ribaltamento flessurale (FT, in alto a sinistra), caduta libera (FF, alto a destra), scivolamento planare (PF, in basso a sinistra) e per scivolamento di cunei (WF, in basso a destra) sulla zona di crollo presso lo scalo n.4 con individuazione delle aree a maggiore pericolosità (tratteggio bianco).

4.5.2 Analisi cinematica area Approdo Marinella

In Figura 83, Figura 84, Figura 85, Figura 86, Figura 87 e Figura 88 vengono rappresentati i risultati delle elaborazioni grafiche relative all'analisi cinematica quantitativa dell'ammasso roccioso presso l'approdo Marinella, mentre in Tabella 20 vengono riportati i valori statistici degli indici cinematici nella stessa zona.

		PF (%)	WF (%)	BT (%)	FF (%)	FT (%)	GKI (%)
Molo Marinella	max	26.6	15.8	0.5	27.5	26.6	54.9
	media	3.4	4.9	0.2	0.7	2.8	11.3
	dev std	4.6	5.7	0.2	2.6	4.3	12.4

Tabella 20 - Valori massimi, medi e deviazione standard degli indici di instabilità cinematica per lo Scalo Marinella.

Dalle figure e dai valori di Tabella 20 si evince che i meccanismi di dissesto con indici più elevati in questa zona siano il meccanismo di caduta libera, con valori massimi di 27.5%, lo scivolamento planare e il ribaltamento di flessura, con valori massimi di 26.6%. Gli altri meccanismi mostrano indici nettamente inferiori, pari rispettivamente a 15.8% per lo scivolamento di cunei e 0.5% per il ribaltamento di blocchi (praticamente assente anche in quest'area). Lo scivolamento planare presenta il valore medio maggiore tra i meccanismi analizzati e un valore di deviazione standard ridotto. Con valori medi decisamente più bassi abbiamo lo scivolamento planare e il ribaltamento flessurale. Il meccanismo di caduta libera, nonostante registri il valore massimo anche per quest'area, presenta un valore medio ridotto, sintomo che il picco registrato è legato a porzioni

localizzate dell'area analizzata, ovvero principalmente le parti rocciose in aggetto. Il valore massimo dell'indice cinematico globale (GKI) è pari a 54.9%, leggermente più basso di quello dello Scalo n.4.

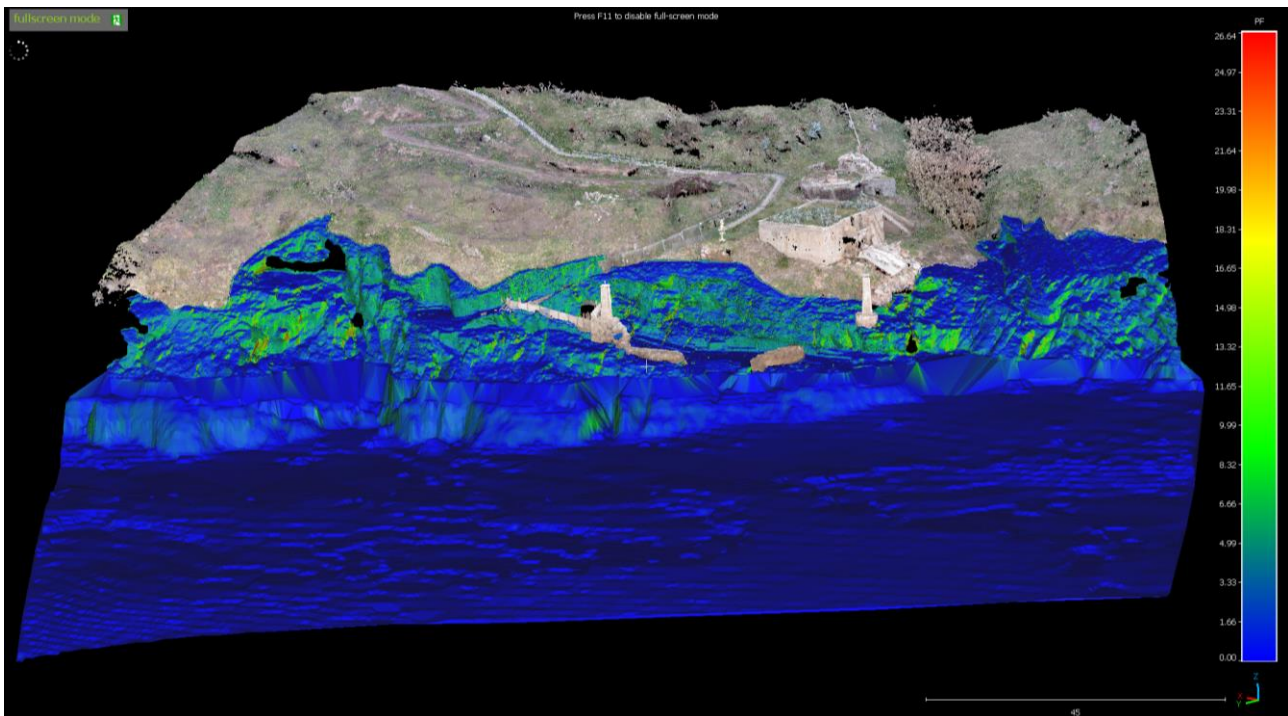


Figura 83 - Mappa dell'indice di pericolosità cinematica per il meccanismo di scivolamento planare (approdo Marinella).

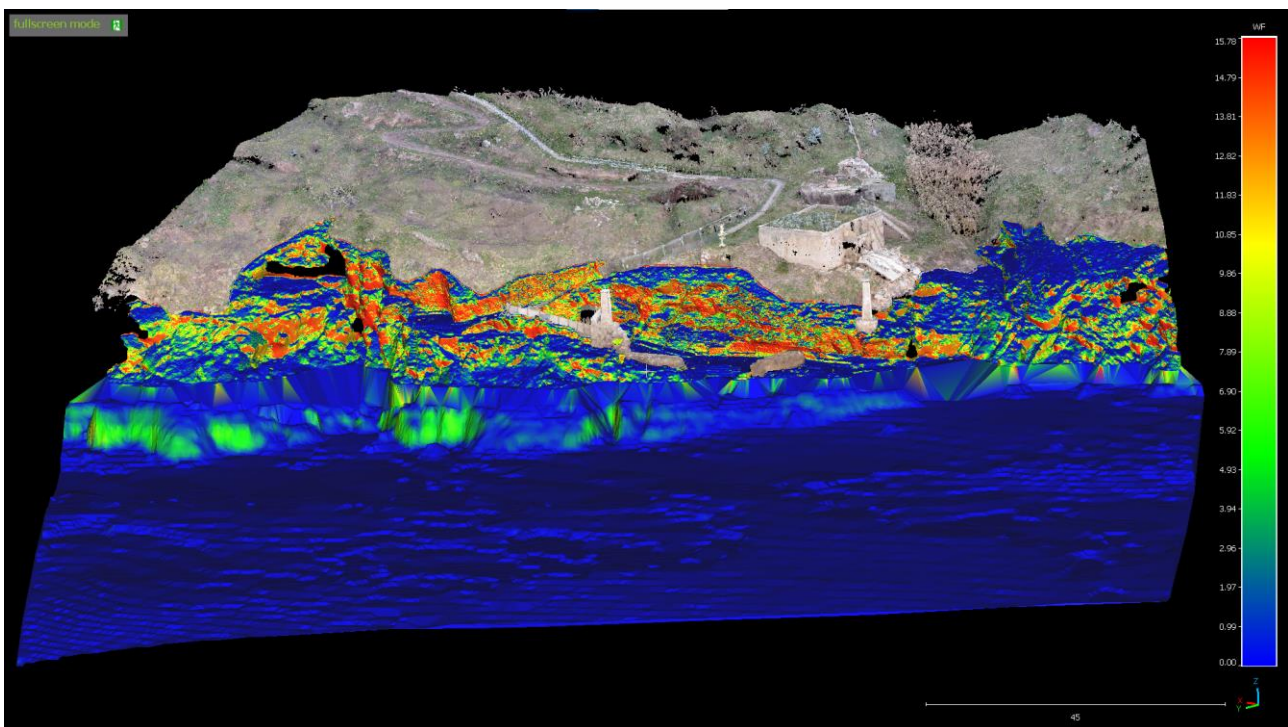


Figura 84 - Mappa dell'indice di pericolosità cinematica per il meccanismo di scivolamento cunei (approdo Marinella).

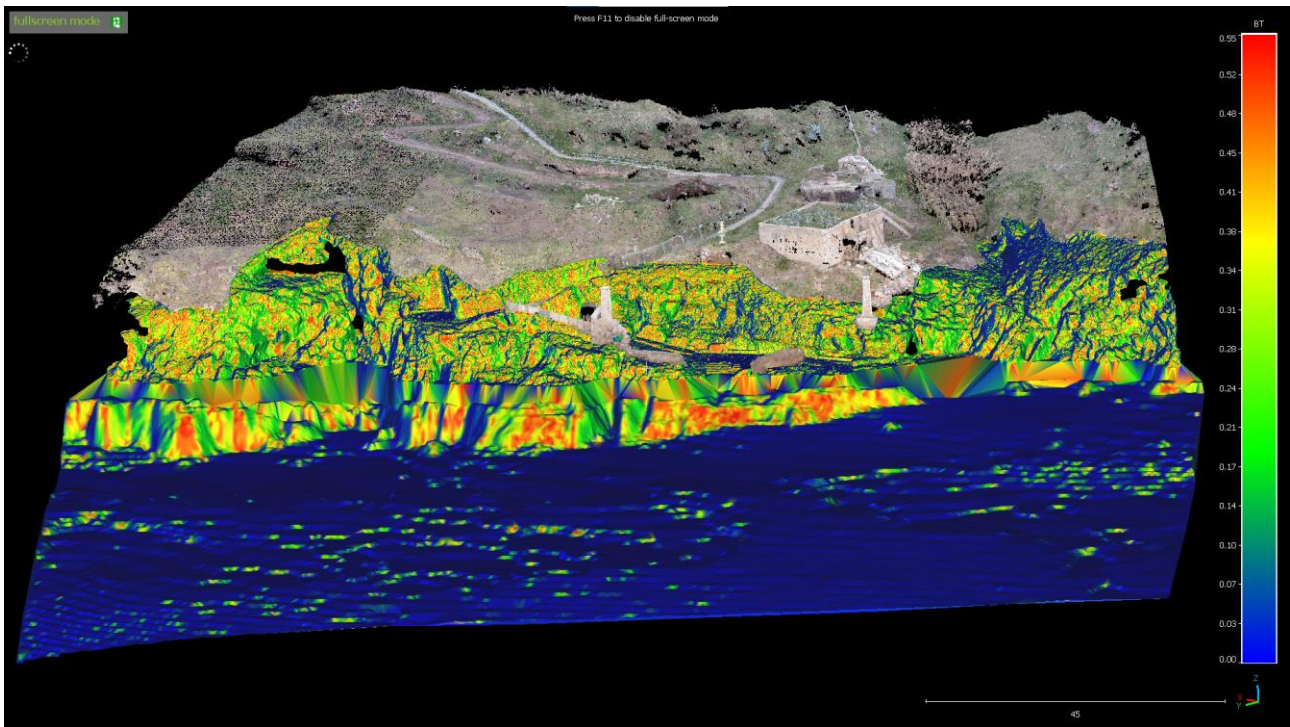


Figura 85 - Mappa dell'indice di pericolosità cinematica per i meccanismi di ribaltamento diretto (approdo Marinella).

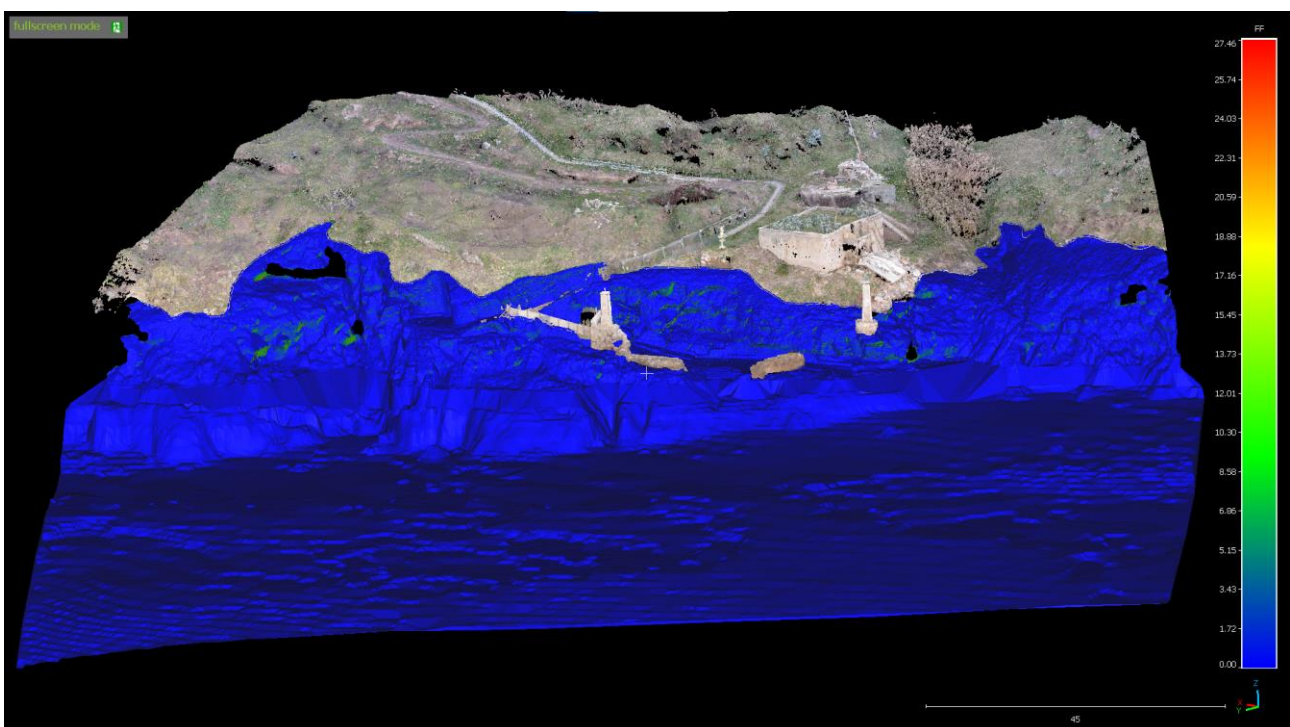


Figura 86 - Mappa dell'indice di pericolosità cinematica per il meccanismo di caduta libera (approdo Marinella).

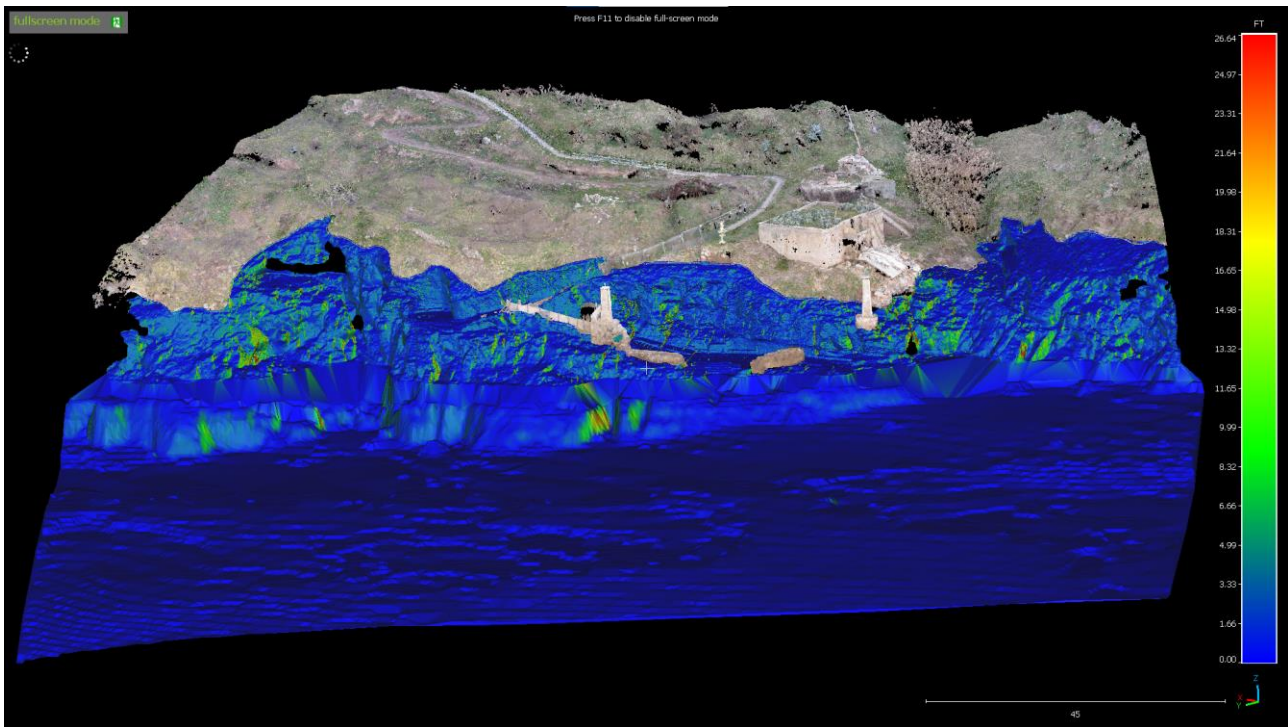


Figura 87 - Mappa dell'indice di pericolosità cinematica per il meccanismo di ribaltamento di flessura (approdo Marinella).

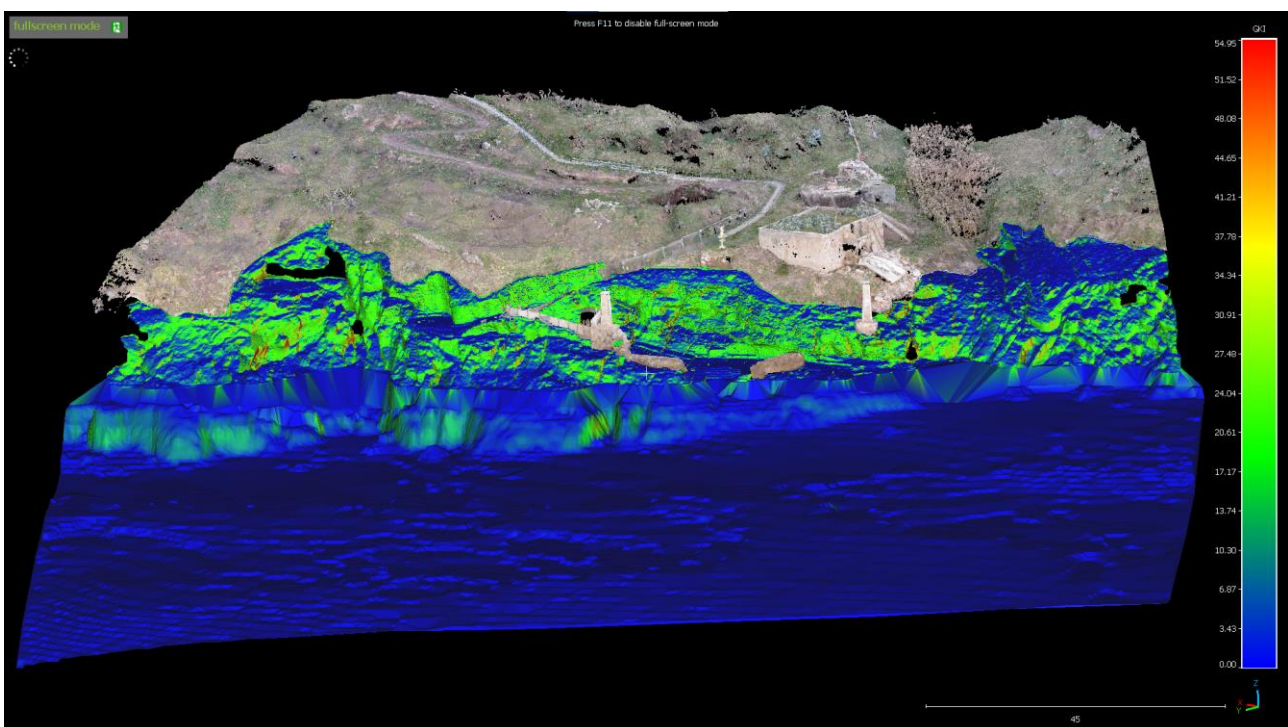


Figura 88 - Mappa dell'indice di pericolosità cinematica globale per i meccanismi di dissesto esaminati (approdo Marinella).

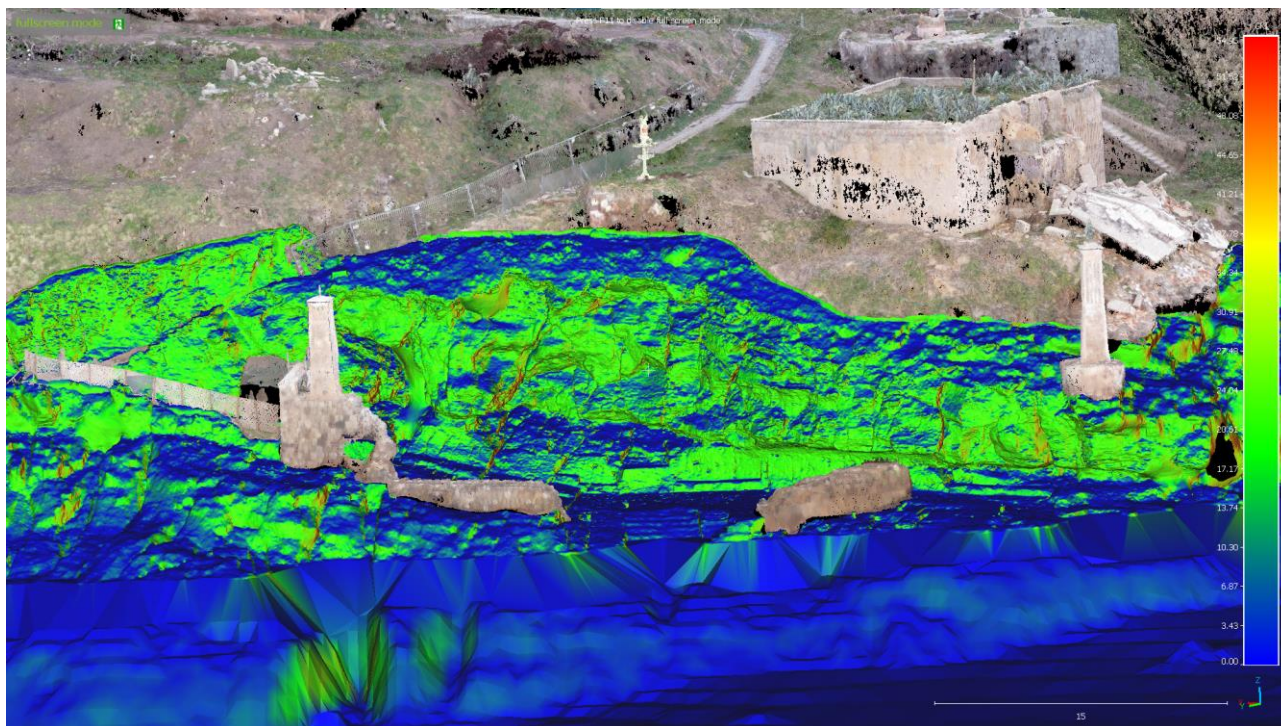


Figura 89 - Dettaglio dell'approdo Marinella con la mappa dell'indice di pericolosità cinematica globale per i meccanismi di dissesto esaminati.

Per osservare più in dettaglio i risultati dell'analisi cinematica quantitativa svolta sull'area dello Scalo Marinella sono stati realizzati degli inquadramenti di dettaglio (Figura 90) con lo scopo di individuare, all'interno dell'area dell'approdo analizzata, i settori con gli indici di pericolosità maggiori e i relativi meccanismi di dissesto. Le risultanze di questa analisi di dettaglio sono illustrate di seguito.



Figura 90 - Inquadramento delle zone di dettaglio analizzate presso lo Scalo Marinella.

PARETE A SUD

La zona di dettaglio della parete a sud della zona di approdo dello Scalo Marinella presenta nella parte centro-sud un valore medio generale intorno a 15% (Figura 91). All'interno dell'area analizzata sono state individuate quattro zone con indice di pericolosità cinematica globale elevato, che spiccano dai valori medi: si tratta principalmente di pareti, più o meno verticali. I valori di pericolosità riscontrati sono dovuti principalmente a scivolamento planare (PF, *planar failure*) e ribaltamento

flessurale (FT, *flexural toppling*). Su tutta l'area analizzata è inoltre presente un valore generale elevato per il meccanismo di ribaltamento di cunei (WF, *wedge failure*) che genera le numerose porzioni gialle nella mappa dell'indice di pericolosità cinematica globale (Figura 92).

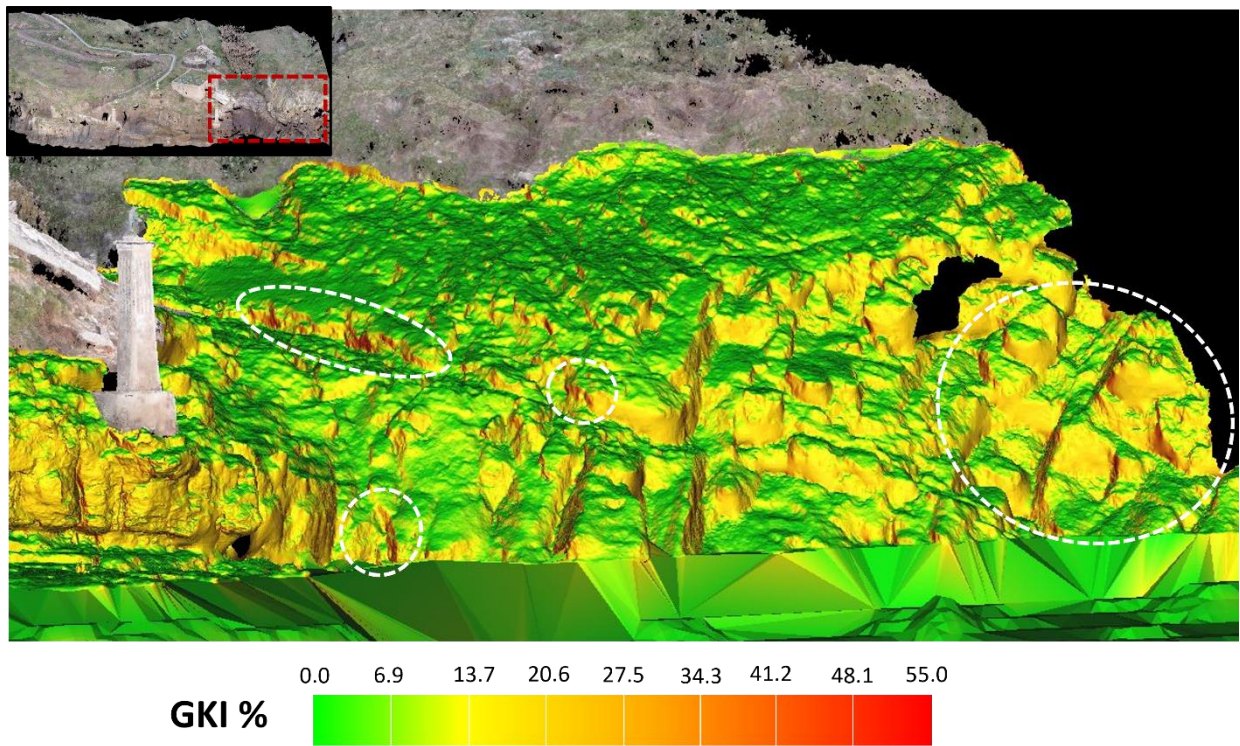


Figura 91 - Indice di pericolosità cinematica globale della parete a sud della zona di approdo dello Scalo Marinella con individuazione delle aree a maggiore pericolosità (tratteggio bianco).

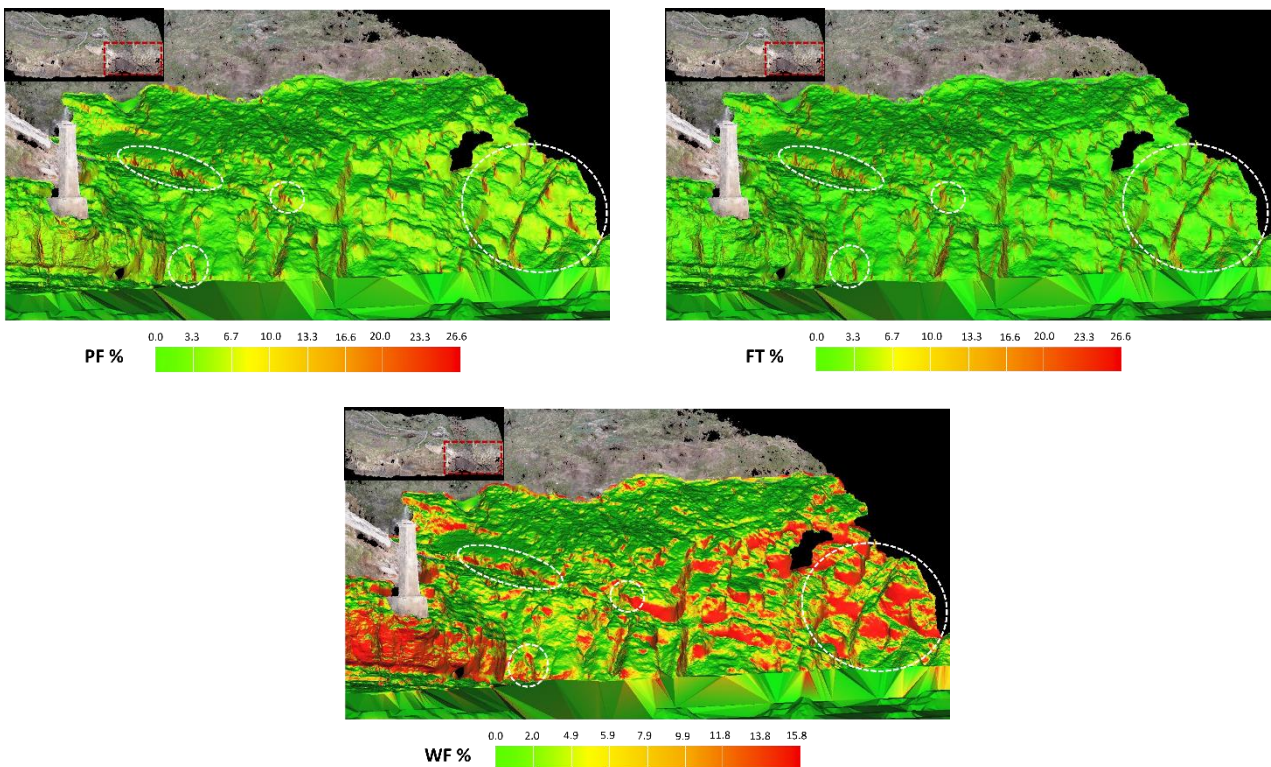


Figura 92 - Indice di pericolosità per scivolamento planare (PF, in alto a sinistra), ribaltamento flessurale (FT, in alto a destra) e per scivolamento di cunei (WF, in basso) sulla parete a sud della zona di approdo dello Scalo Marinella con individuazione delle aree a maggiore pericolosità (tratteggio bianco).

ZONA DI APPRODO PARTE SUD

La parte sud della zona di approdo presenta, specialmente nell'area centro-sud, un valore medio generale intorno a 15% (Figura 93). All'interno dell'area analizzata sono state individuate quattro zone con indice di pericolosità cinematica globale elevato, che spiccano dai valori medi generali del contesto analizzato. Si tratta principalmente di pareti, più o meno verticali, generate da strutture. I valori di pericolosità riscontrati sono dovuti principalmente a scivolamento planare (PF, *planar failure*), ribaltamento flessurale (FT, *flexural toppling*) e caduta libera (FF, *free fall*). Come visto in precedenza, anche per quest'area è inoltre presente un generale valore elevato per il meccanismo di ribaltamento di cunei (WF, *wedge failure*) che genera le numerose porzioni gialle nella mappa dell'indice di pericolosità cinematica globale (Figura 94).

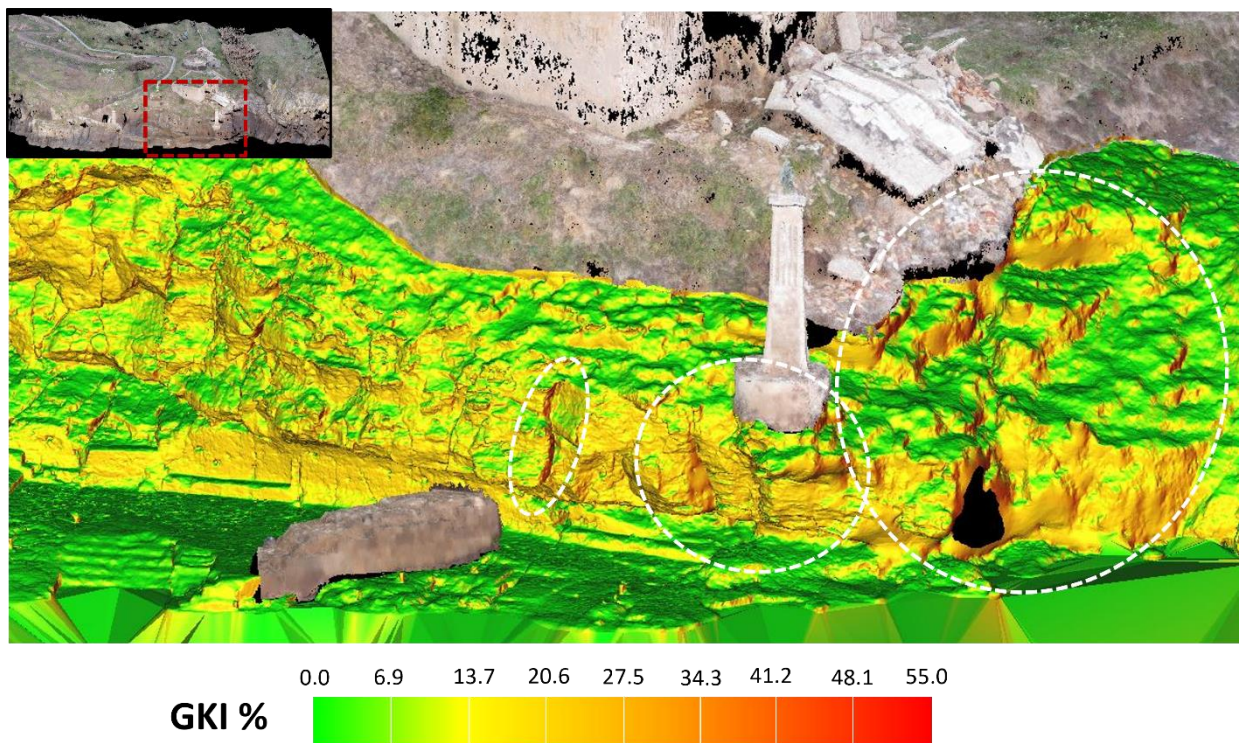


Figura 93 - Indice di pericolosità cinematica globale della parte sud della zona di approdo dello Scalo Marinella con individuazione delle aree a maggiore pericolosità (tratteggio bianco).

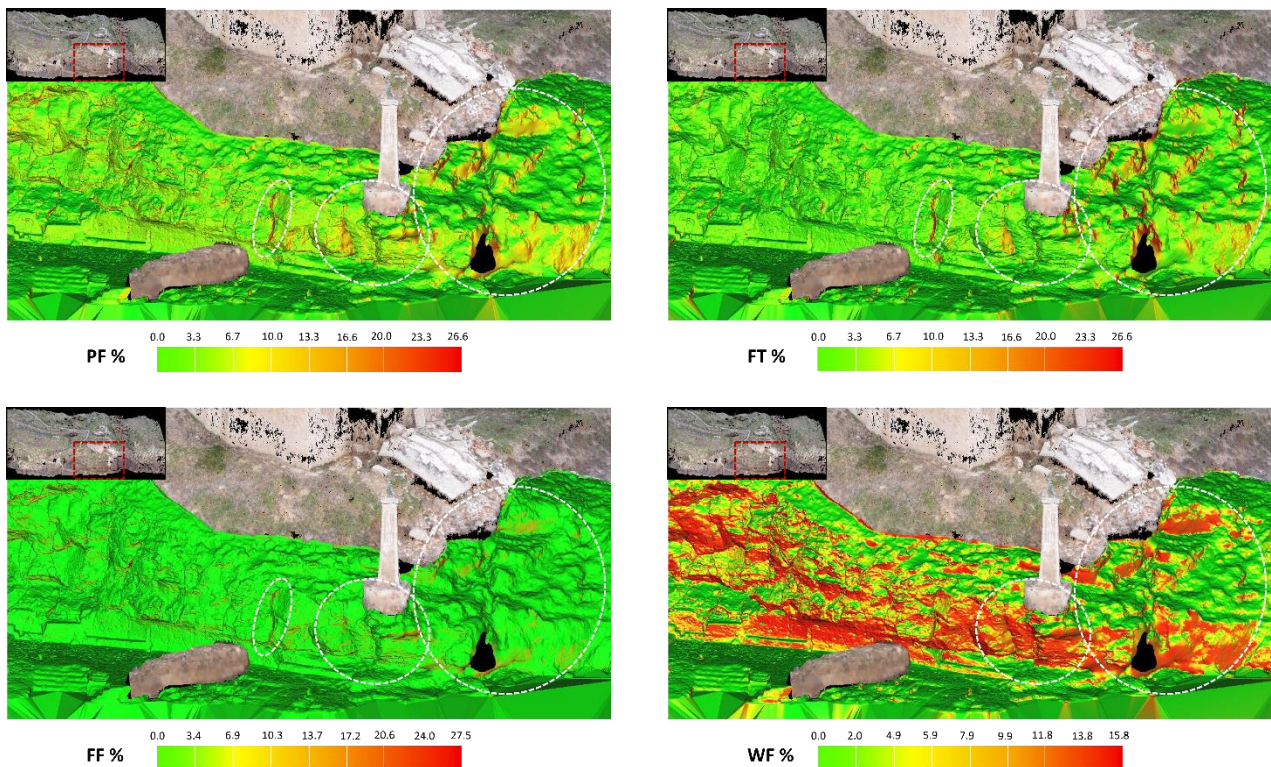


Figura 94 - Indice di pericolosità per scivolamento planare (PF, in alto a sinistra), ribaltamento flessurale (FT, in alto a destra), caduta libera (FF, in basso a sinistra) e per scivolamento di cunei (WF, in basso a destra) sulla parte sud della zona di approdo dello Scalo Marinella con individuazione delle aree a maggiore pericolosità (tratteggio bianco).

ZONA DI APPRODO PARTE NORD

Come già visto in precedenza per la parte sud, dalla Figura 95 si può notare che anche la parte nord della zona di approdo presenta un valore medio generale intorno a 15 (testimoniato dalle diverse aree gialle) sull'intera parete. All'interno dell'area analizzata sono state individuate quattro zone con indice di pericolosità cinematica globale elevato, che spiccano dai valori medi generali del contesto analizzato; si tratta principalmente di pareti, più o meno verticali, di fratture. I valori di pericolosità riscontrati sono dovuti principalmente a scivolamento planare (PF, *planar failure*), ribaltamento flessurale (FT, *flexural toppling*) e caduta libera (FF, *free fall*).

Come già osservato per le analisi di dettaglio precedenti, anche in quest'area è inoltre presente un generale valore elevato per il meccanismo di ribaltamento di cunei (WF, *wedge failure*) che genera le numerose porzioni gialle nella mappa dell'indice di pericolosità cinematica globale (Figura 96).

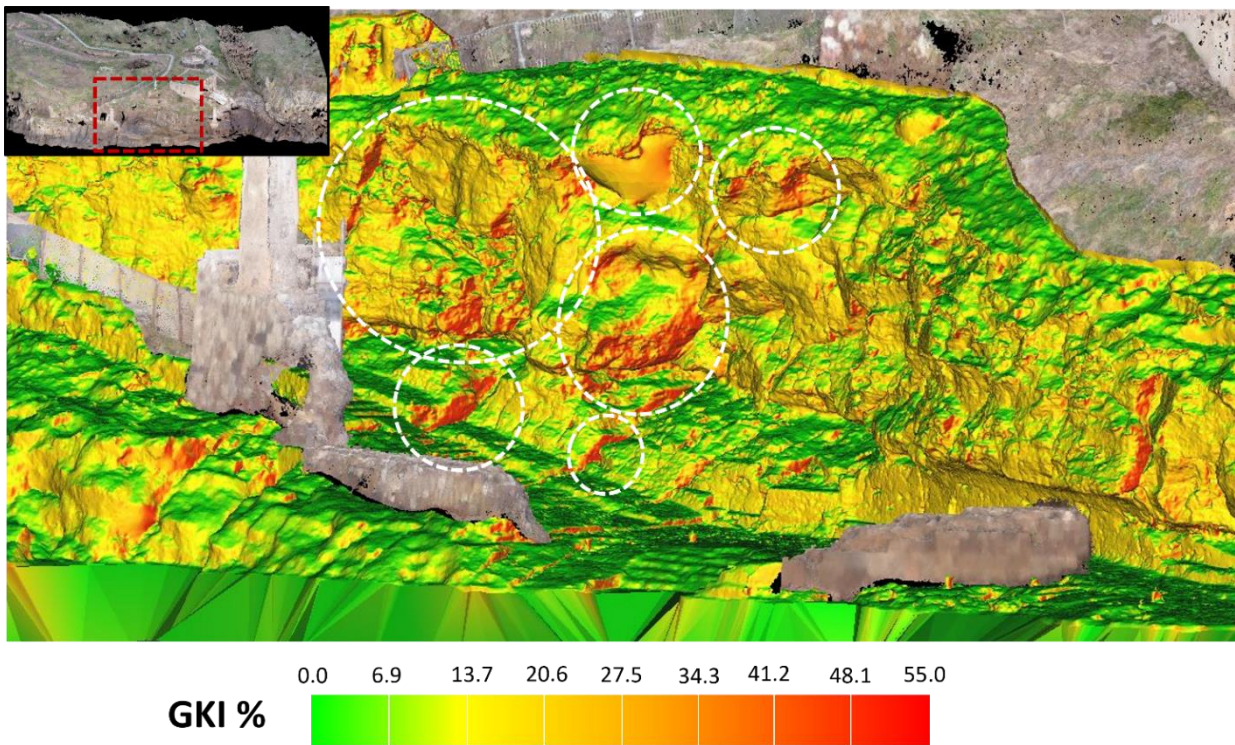


Figura 95 - Indice di pericolosità cinematica globale della parte nord della zona di approdo con individuazione delle aree a maggiore pericolosità (tratteggio bianco).

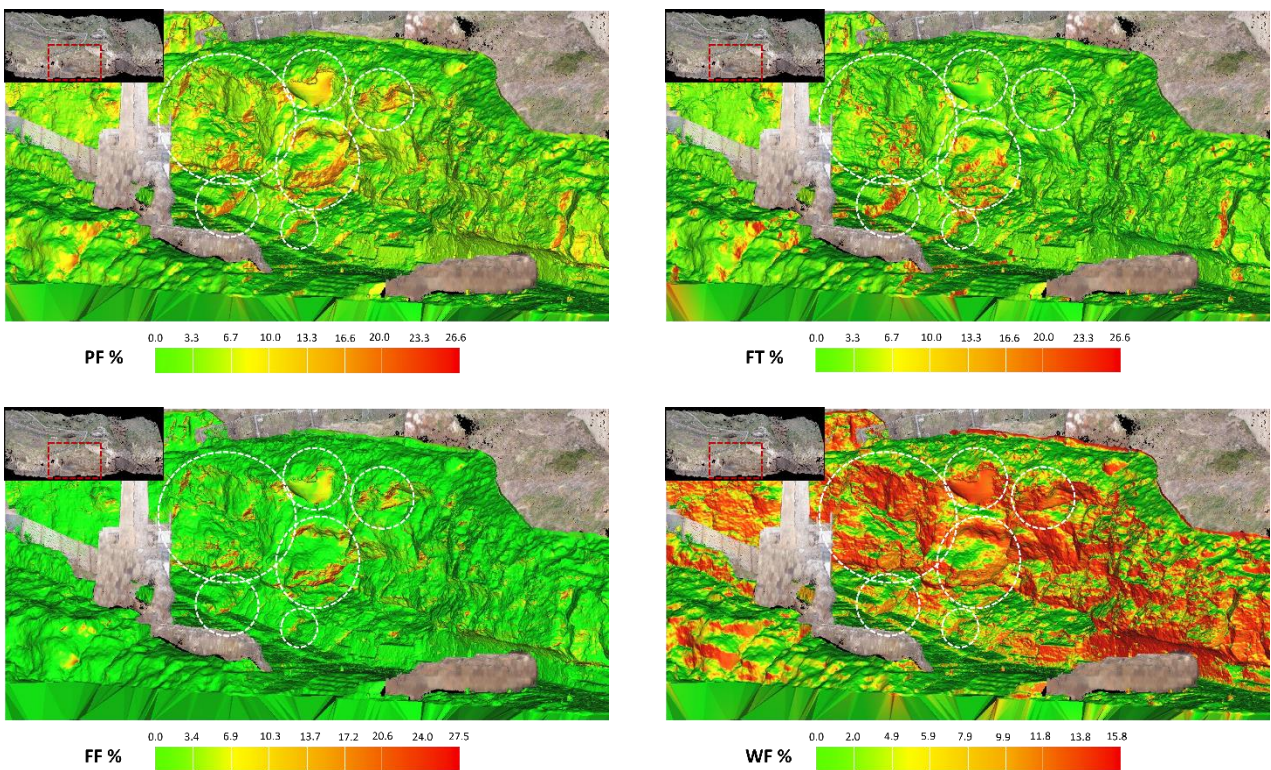


Figura 96 - Indice di pericolosità per scivolamento planare (PF, in alto a sinistra), ribaltamento flessurale (FT, in alto a destra), caduta libera (FF, in basso a sinistra) e per scivolamento di cunei (WF, in basso a destra) sulla parte nord della zona di approdo dello Scalo Marinella con individuazione delle aree a maggiore pericolosità (tratteggio bianco).

PARETE SOTTOSTANTE LA SCALINATA INFERIORE

Dalla Figura 97 si può notare che anche la parete sottostante la scalinata inferiore presenta un valore medio generale intorno a 15 (testimoniato dalle diverse aree gialle) sull'intera parete. All'interno dell'area analizzata sono state individuate quattro zone con indice di pericolosità cinematica globale elevato, che spiccano dai valori medi generali del contesto analizzato; si tratta, come già riscontrato in precedenza, principalmente di pareti, più o meno verticali, di fratture. Si può notare in questo inquadramento come siano presenti fratture con indici di pericolosità medio-alti anche nella zona sottomarina. Quest'ultima è stata ottenuta integrando i dati dei rilievi da remoto con i dati di rilievi batimetrici precedentemente realizzati. Si può notare nell'immagine la presenza di una fascia con forme innaturali presente appena sotto il livello del mare; si tratta di una fascia di raccordo di circa 1m presente tra i due tipi di rilievi (aereo e sottomarino).

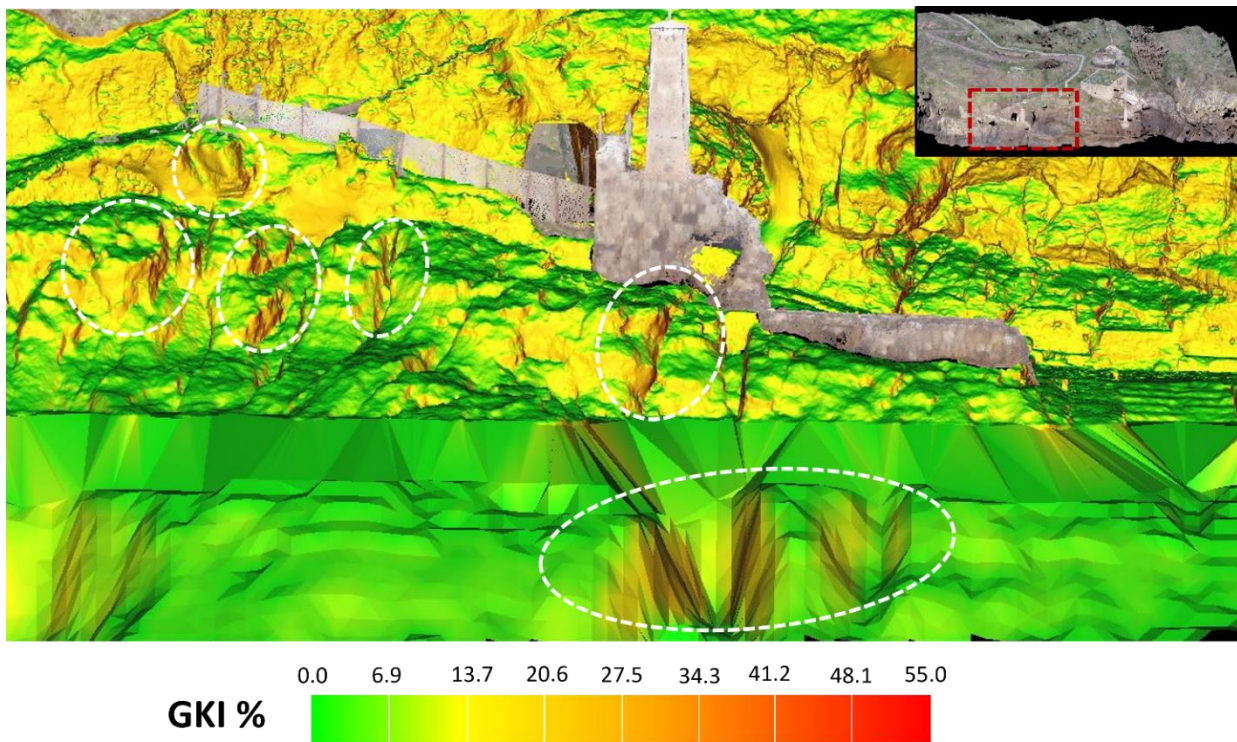


Figura 97 - Indice di pericolosità cinematica globale della parete sottostante la scalinata inferiore dello Scalo Marinella con individuazione delle aree a maggiore pericolosità (tratteggio bianco).

I valori di pericolosità riscontrati sono dovuti principalmente a scivolamento planare (PF, *planar failure*), ribaltamento flessurale (FT, *flexural toppling*) e caduta libera (FF, *free fall*). Su tutta l'area analizzata è inoltre presente un generale valore elevato per il meccanismo di ribaltamento di cunei (WF, *wedge failure*) che genera le numerose porzioni gialle nella mappa dell'indice di pericolosità cinematica globale (Figura 98).

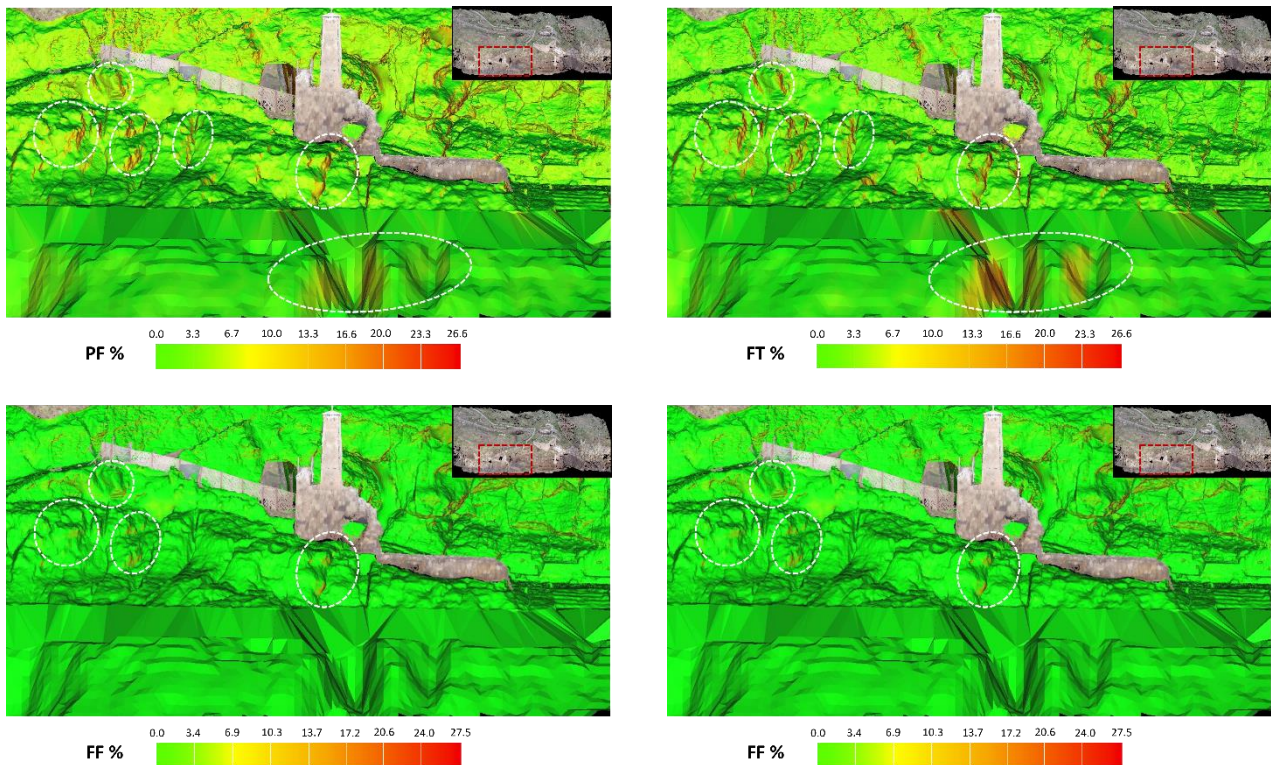


Figura 98 - Indice di pericolosità per scivolamento planare (PF, in alto a sinistra), ribaltamento flessurale (FT, in alto a destra), caduta libera (FF, in basso a sinistra) e per scivolamento di cunei (WF, in basso a destra) sulla parete sottostante la scalinata inferiore con individuazione delle aree a maggiore pericolosità (tratteggio bianco).

PARETE DI USCITA DELLA GALLERIA

Osservando la Figura 99 si può notare come anche per questa zona risulta essere presente un valore medio di GKI intorno a 15 diffuso su tutta l'area analizzata (colore giallo). Sono comunque numerose le zone che presentano valori maggiori rispetto a quello di fondo, principalmente su pareti più o meno verticali o aggettanti. I valori di pericolosità riscontrati sono dovuti principalmente a scivolamento planare (PF, *planar failure*), ribaltamento flessurale (FT, *flexural toppling*) e caduta libera (FF, *free fall*). Su tutta l'area analizzata è presente un generale valore elevato (circa 15) per il meccanismo di ribaltamento di cunei (WF, *wedge failure*) che genera le numerose porzioni gialle nella mappa dell'indice di pericolosità cinematica globale (Figura 100).

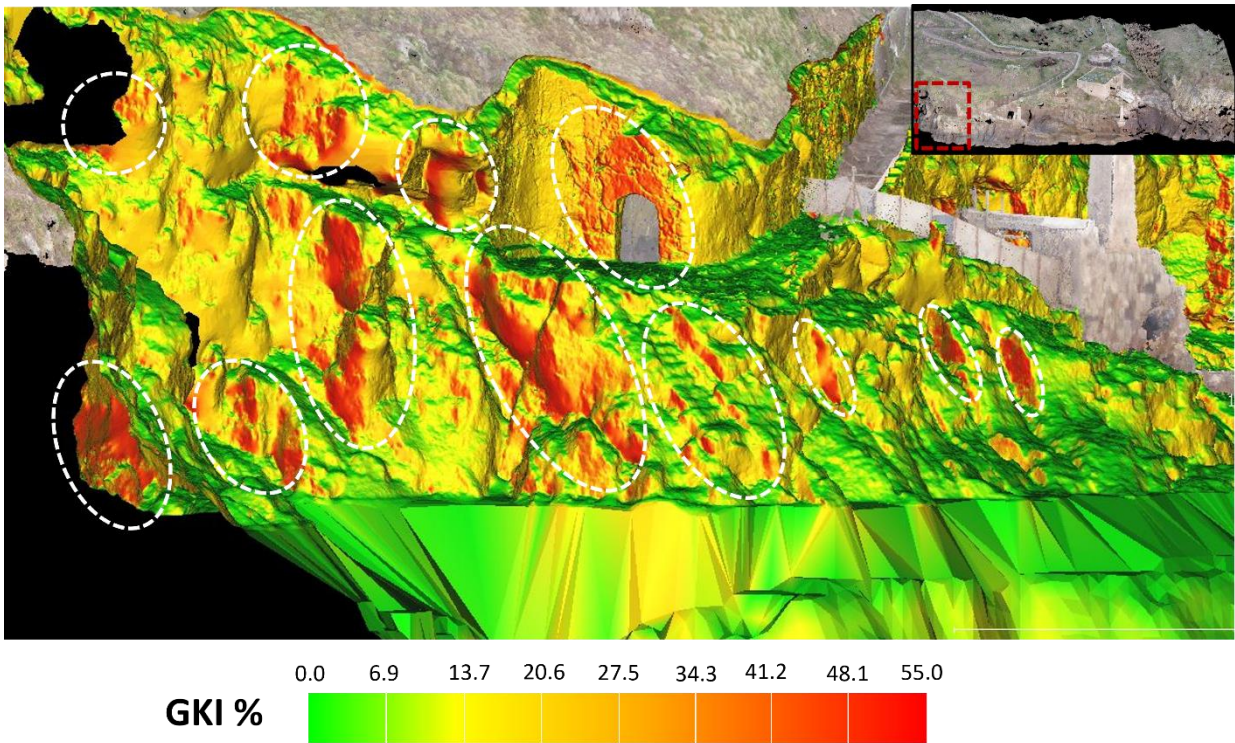


Figura 99 - Indice di pericolosità cinematica globale della parete di uscita della galleria dello Scalo Marinella con individuazione delle aree a maggiore pericolosità (tratteggio bianco).

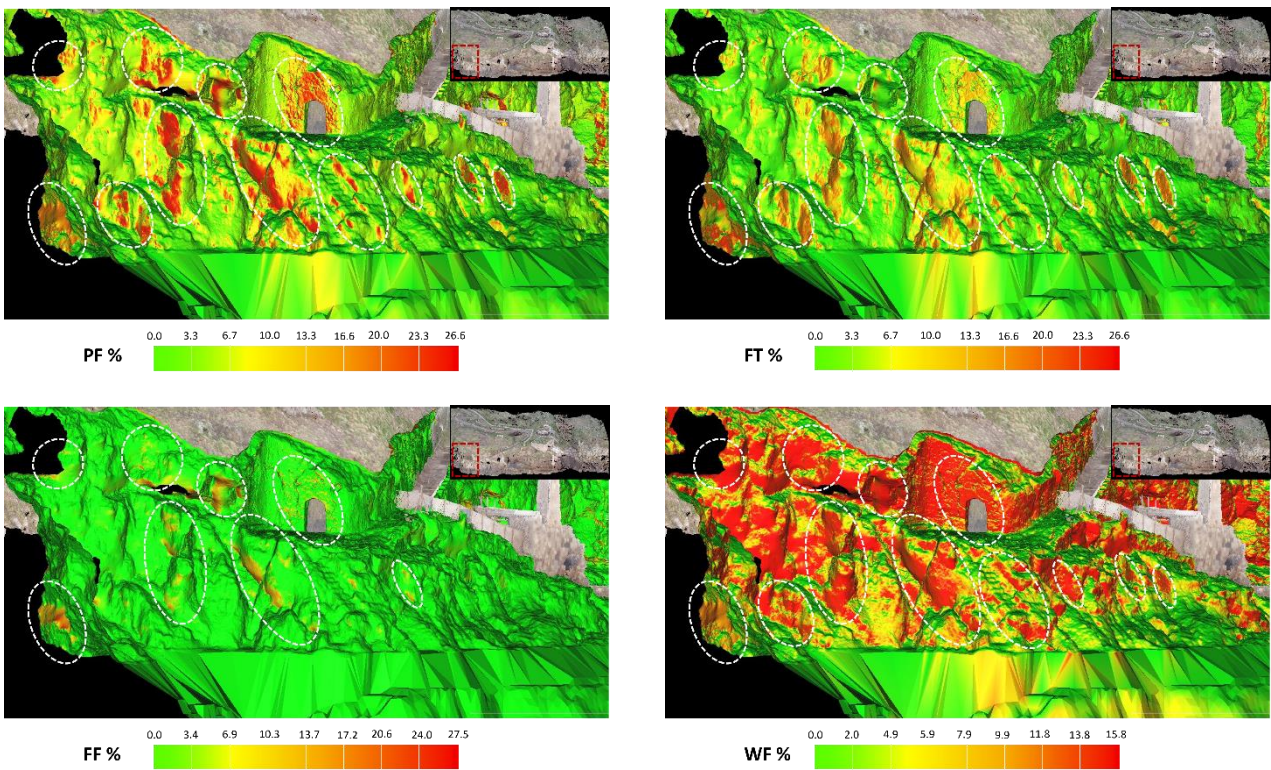


Figura 100 - Indice di pericolosità per scivolamento planare (PF, in alto a sinistra), ribaltamento flessurale (FT, in alto a destra), caduta libera (FF, in basso a sinistra) e per scivolamento di cunei (WF, in basso a destra) sulla parete di uscita della galleria dello Scalo Marinella con individuazione delle aree a maggiore pericolosità (tratteggio bianco).

PARETE DELL'APPRODO CON ENTRATA GALLERIA

Nella Figura 101 si può notare che la maggior parte della parete è caratterizzata da un valore medio di GKI intorno a 15 (colore giallo), come già riscontrato in precedenza in tutta l'area dello Scalo Marinella. Sono comunque presenti alcune zone che mostrano valori maggiori rispetto a quelli di fondo, principalmente di porzioni rocciose più o meno verticali o aggettanti. I valori di pericolosità riscontrati sono dovuti principalmente a scivolamento planare (PF, *planar failure*), ribaltamento flessurale (FT, *flexural toppling*) e caduta libera (FF, *free fall*); come per tutta l'area analizzata è presente un generale valore elevato (circa 15) per il meccanismo di ribaltamento di cunei (WF, *wedge failure*) che genera le numerose porzioni gialle nella mappa dell'indice di pericolosità cinematica globale (Figura 102).

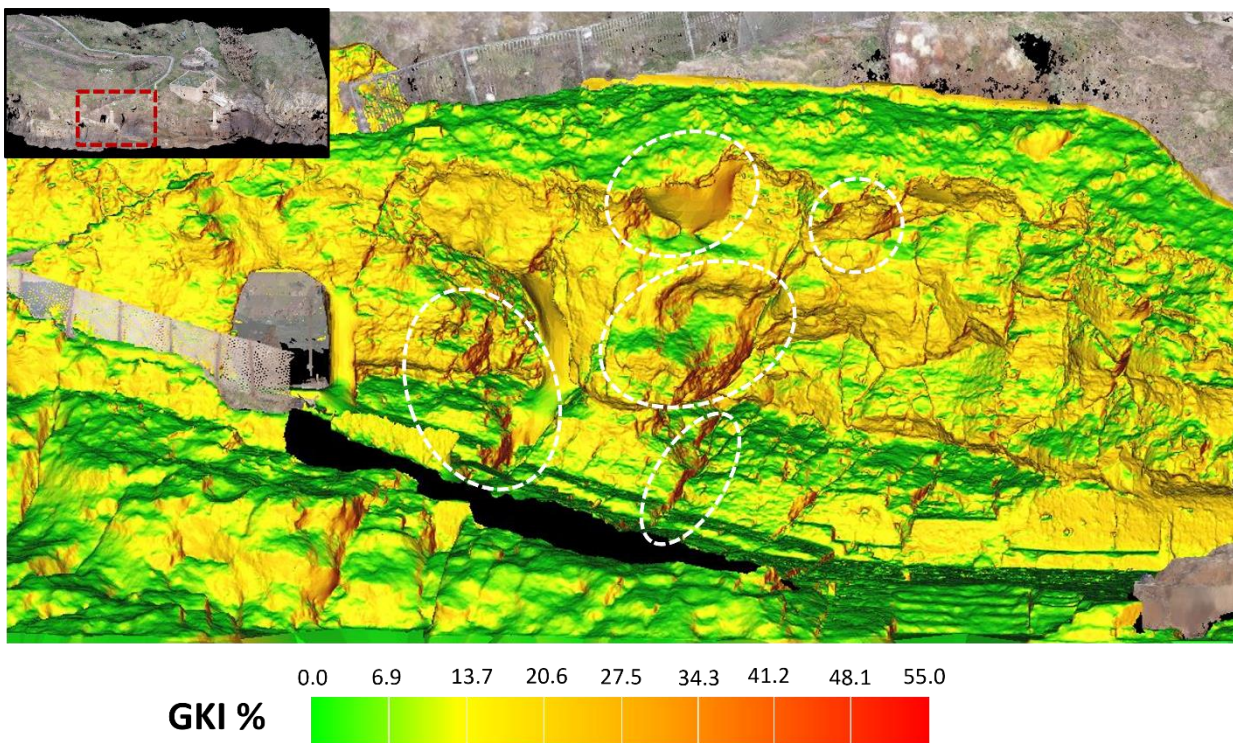


Figura 101 - Indice di pericolosità cinematica globale della parete dell'approdo con l'entrata della galleria dello Scalo Marinella con individuazione delle aree a maggiore pericolosità (tratteggio bianco).

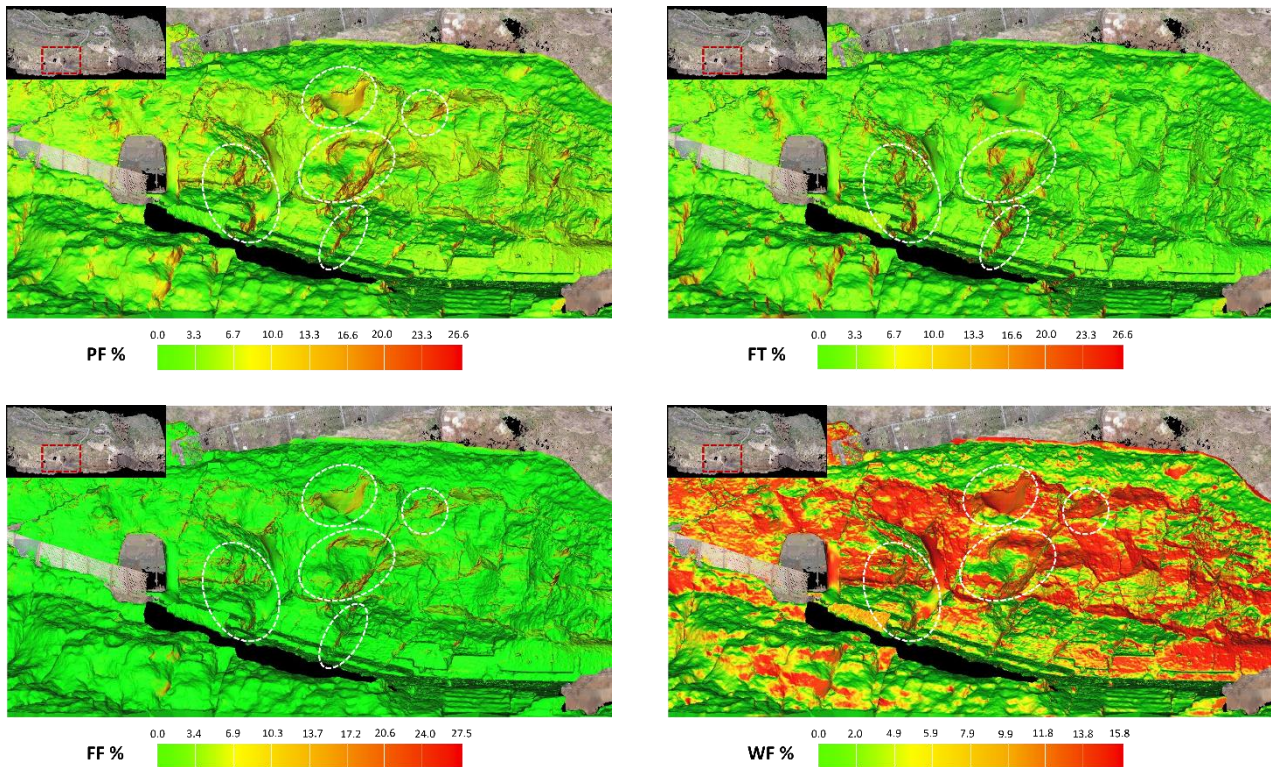


Figura 102 - Indice di pericolosità per scivolamento planare (PF, in alto a sinistra), ribaltamento flessurale (FT, in alto a destra), caduta libera (FF, in basso a sinistra) e per scivolamento di cunei (WF, in basso a destra) sulla parete dell'approdo di entrata della galleria dello Scalo Marinella con individuazione delle aree a maggiore pericolosità (tratteggio bianco).

PARETE DELLA RAMPA SUPERIORE DELLA SCALINATA

La Figura 103 mostra la zona di dettaglio della parete della rampa superiore della scalinata dello Scalo Marinella; essa presenta in generale un valore dell'indice di pericolosità cinematica globale medio di circa 15 (colore giallo) come già riscontrato nelle precedenti analisi. In questa zona di dettaglio sono state individuate quattro zone con valori elevati situate nelle zone laterali alla parete e costituite essenzialmente da pareti di fratture. I valori di pericolosità riscontrati sono dovuti principalmente a scivolamento planare (PF, *planar failure*) e ribaltamento flessurale (FT, *flexural toppling*); come per tutta l'area analizzata è presente un generale valore elevato per il meccanismo di ribaltamento di cunei (WF, *wedge failure*) che genera le numerose porzioni gialle nella mappa dell'indice di pericolosità cinematica globale (Figura 104).

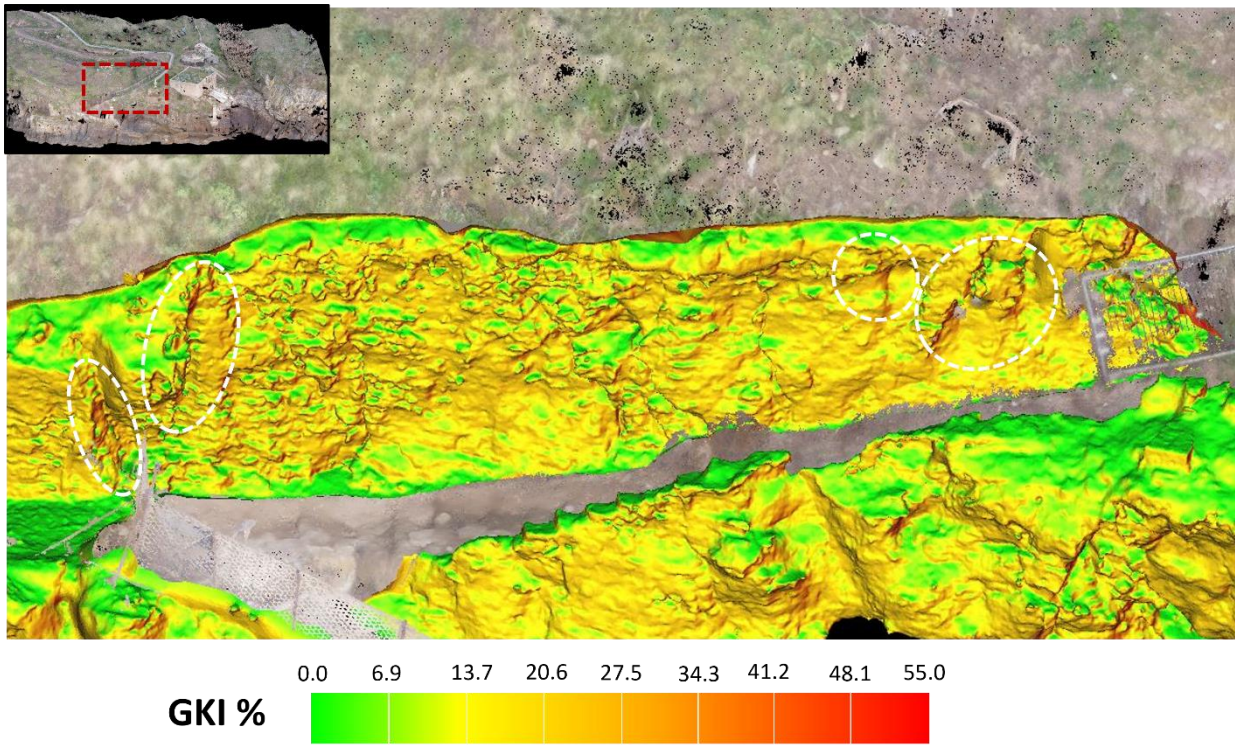


Figura 103 - Indice di pericolosità cinematica globale della parete della rampa superiore della scalinata dello Scalo Marinella con individuazione delle aree a maggiore pericolosità (tratteggio bianco).

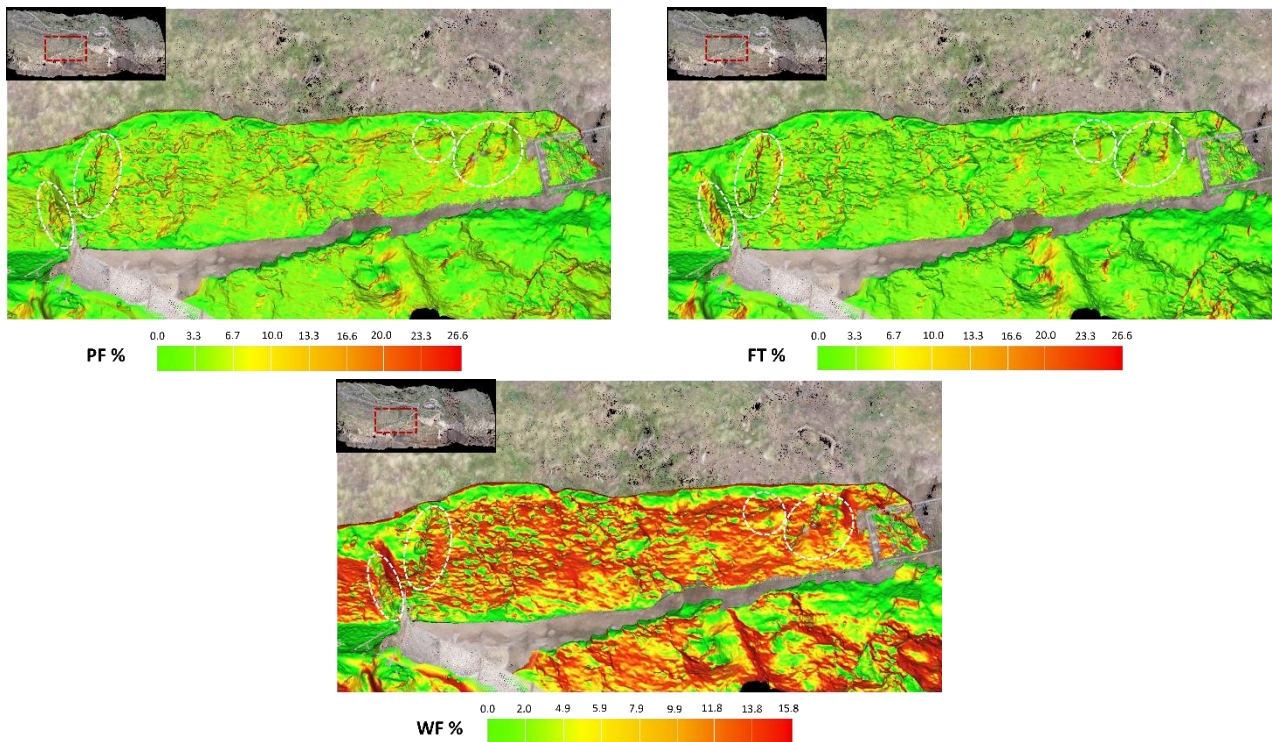


Figura 104 - Indice di pericolosità per scivolamento planare (PF, in alto a sinistra), ribaltamento flessurale (FT, in alto a destra) e per scivolamento di cunei (WF, in basso) sulla parete della rampa superiore della scalinata con individuazione delle aree a maggiore pericolosità (tratteggio bianco).

4.5.3 Analisi cinematica galleria approdo Marinella

In Figura 105, Figura 106, Figura 107, Figura 108, Figura 109 e Figura 110 vengono rappresentati i risultati delle elaborazioni grafiche relative all'analisi cinematica quantitativa dell'ammasso della galleria ubicata nei pressi dell'approdo Marinella.

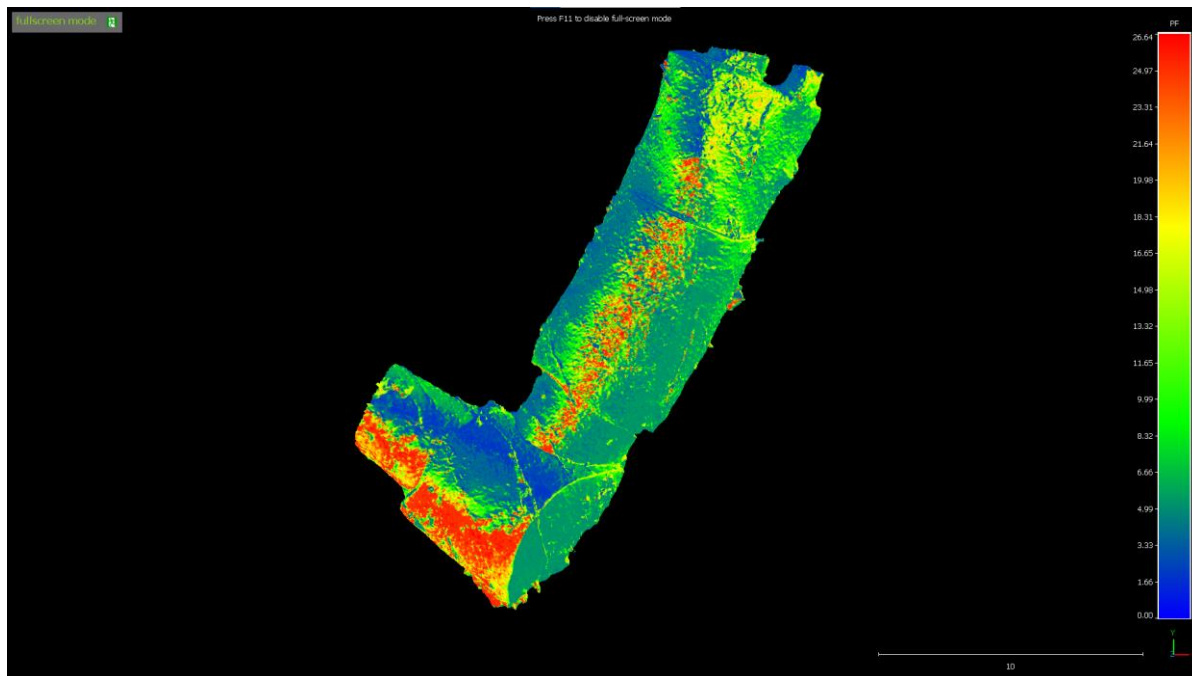


Figura 105 - Mappa dell'indice di pericolosità cinematica per il meccanismo di scivolamento planare (galleria approdo Marinella).

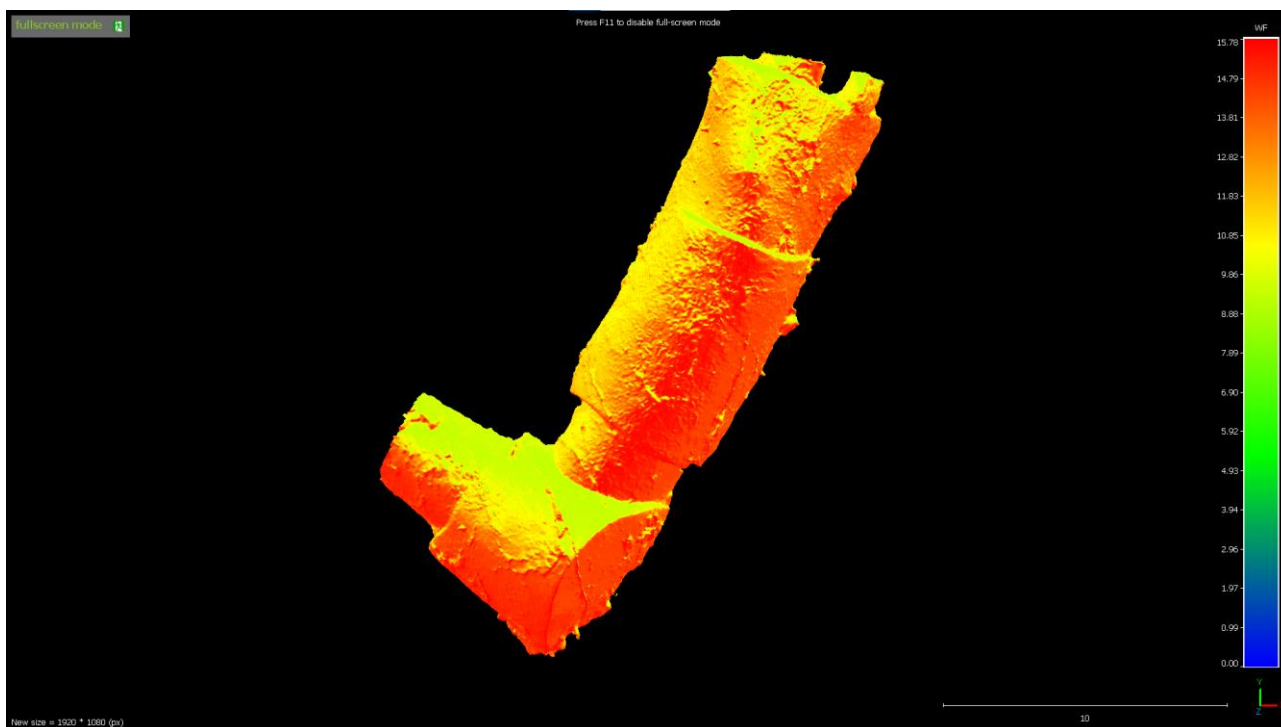


Figura 106 - Mappa dell'indice di pericolosità cinematica per il meccanismo di scivolamento cunei (galleria approdo Marinella).

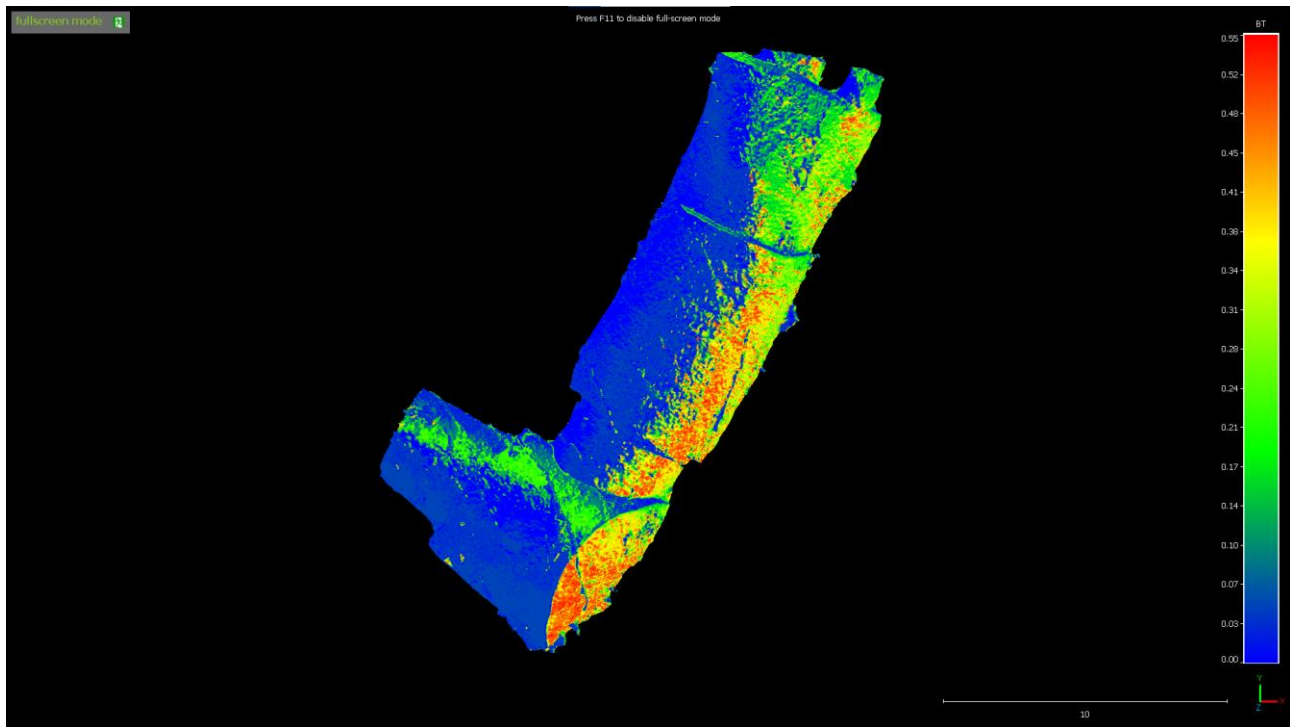


Figura 107 - Mappa dell'indice di pericolosità cinematica per i meccanismi di ribaltamento diretto (galleria approdo Marinella).

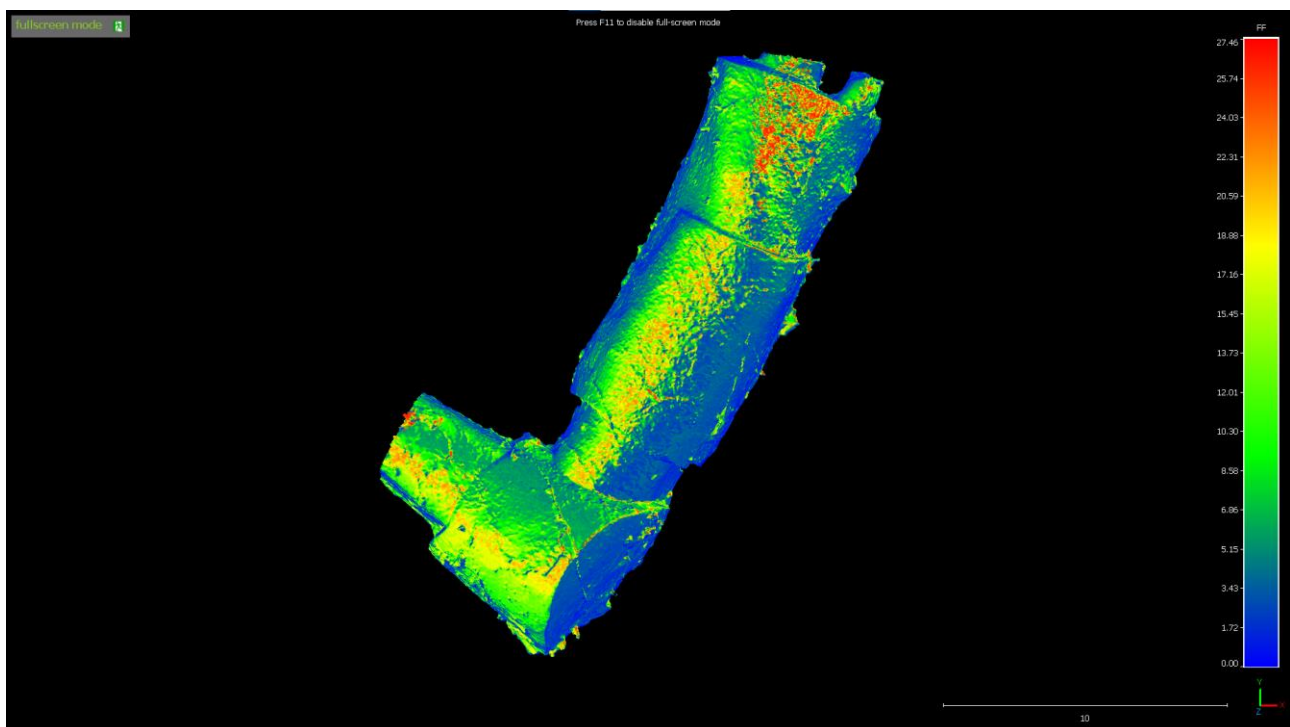


Figura 108 - Mappa dell'indice di pericolosità cinematica per il meccanismo di caduta libera (galleria approdo Marinella).

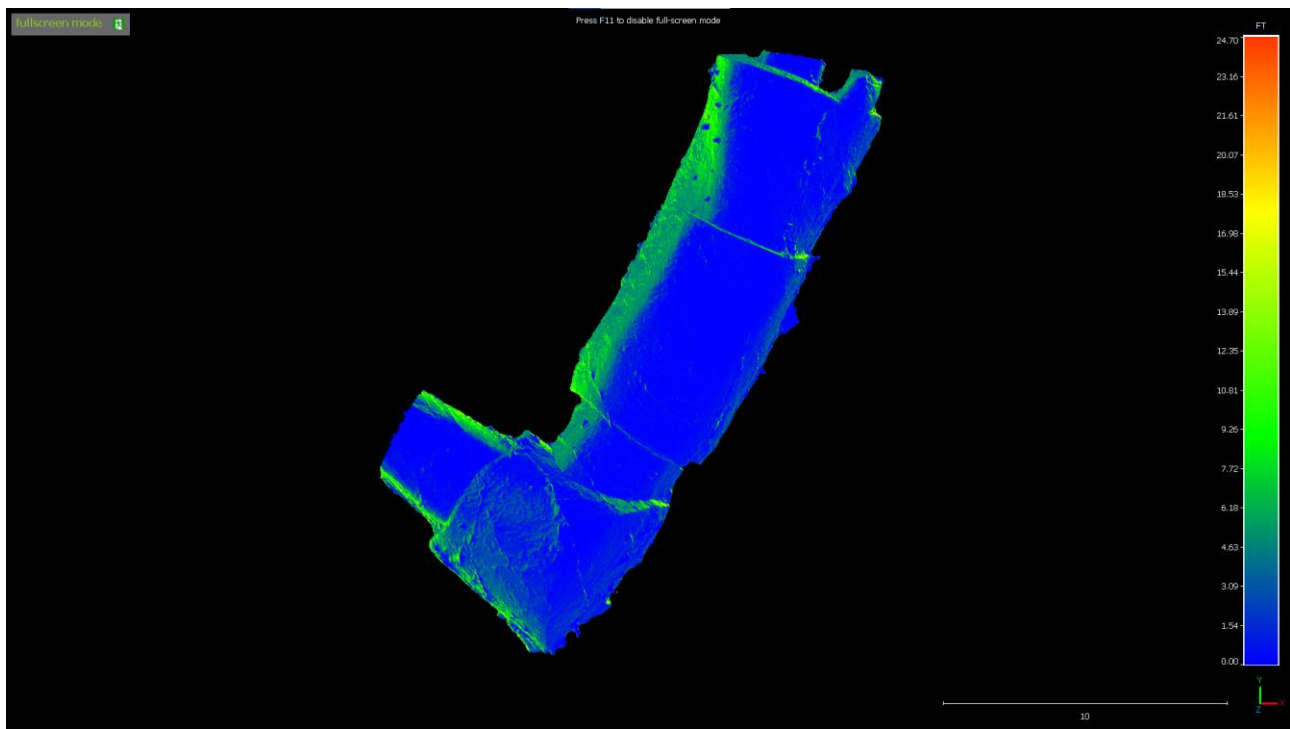


Figura 109 - Mappa dell'indice di pericolosità cinematica per il meccanismo di ribaltamento di flessura (galleria approdo Marinella).

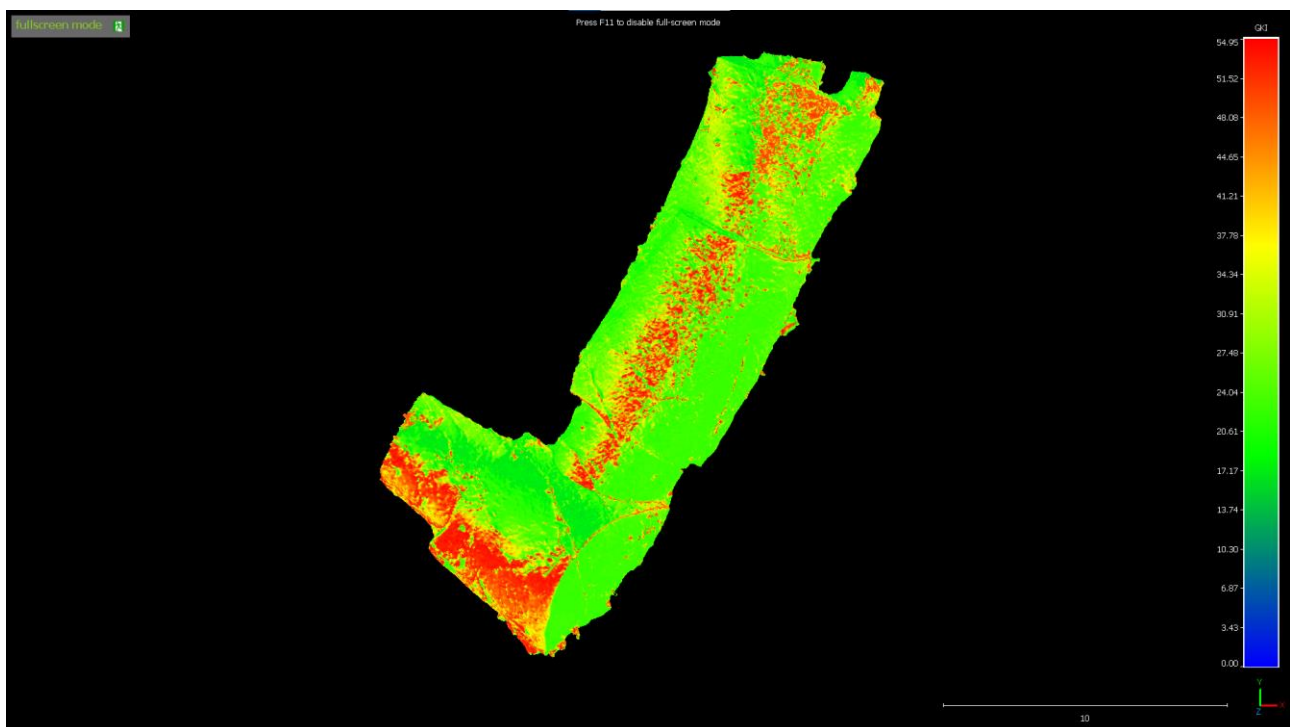


Figura 110 - Mappa dell'indice di pericolosità cinematica globale per i meccanismi di dissesto esaminati (galleria approdo Marinella).

Dalle figure precedenti e dai dati della Tabella 21si evince come i meccanismi di dissesto più probabili siano quello di caduta libera con valori massimi di 27.5% e lo scivolamento planare e il ribaltamento di flessura con valori massimi di 26.6% e 24.7% rispettivamente. Gli altri meccanismi mostrano indici nettamente più bassi, rispettivamente a 15.8% per lo scivolamento di cunei e 0.5% per il

ribaltamento di blocchi (praticamente assente come per la parte esterna dello scalo). Dal punto di vista della distribuzione il meccanismo più diffuso è lo scivolamento di cunei che presenta un valore medio molto vicino al valore massimo registrato e una deviazione standard ridotta. A questo si aggiungono scivolamento planare, ribaltamento per flessura e caduta libera che presentano valori medi abbastanza alti e valori di deviazione standard abbastanza ridotti. I valori massimi dell'indice cinematico globale sono pari a 54.9%.

	PF (%)	WF (%)	BT (%)	FF (%)	FT (%)	GKI (%)
max	26.6	15.8	0.5	27.5	24.7	54.9
media	8.0	11.6	0.2	4.8	4.0	26.5
dev std	6.2	3.6	0.2	5.7	4.2	11.2

Tabella 21 – Valori massimi, medi e deviazione standard degli indici di instabilità cinematica per la galleria presente presso lo Scalo Marinella.

4.6 Rilievi geomorfologici

Ad integrazione dei rilievi geomeccanici sia tradizionali che mediante laser scanner e delle analisi cinematiche dei meccanismi di dissesto è stato effettuato un esame geomorfologico basato su osservazioni di campagna ed esame di immagini aeree con lo scopo di individuare eventuali elementi riconducibili ad altre tipologie di dissesto non rientranti nello studio geomeccanico.

Approdo Marinella

L'approdo Marinella, localizzato sulla costa Nord Ovest dell'isola, è caratterizzato da una piattaforma rocciosa piuttosto ampia sovrastata da una ripida falesia (Figura 111).



Figura 111 - Scalo Marinella.

La piattaforma rocciosa, subpianeggiante limitatamente all'approdo in senso stretto, poi leggermente acclive, è stata oggetto, fin dall'epoca romana, di modifiche antropiche mirate alla fruibilità dell'area proprio come approdo principale dell'isola. In tale ottica anche la porzione inferiore della falesia è stata oggetto di interventi antropici.

Gli interventi antropici più evidenti presso lo scalo in senso stretto, per quanto attualmente osservabile, sono i seguenti (Figura 112):

- livellamento della piattaforma di approdo mediante spianamento e messa in posto di pavimentazione in pietra
- realizzazione di gradini a mare e della piattaforma di approdo in cls.
- sottoescavazione della porzione inferiore della falesia, probabilmente per ricavare spazio in prossimità dell'approdo
- realizzazione, mediante scavo nella roccia, della gradinata che conduce al sentiero che conduce al carcere.



Figura 112 - Elementi antropici presso lo scalo Marinella. a) livellamento approdo e pavimentazione; b) sottoescavazione falesia; c) gradinata di accesso al sentiero per il carcere.

Oltrepassata la gradinata ricavata nella roccia, si diparte il sentiero che conduce al carcere. Il primo tratto del sentiero è stato ricavato incassando il tracciato nel versante in corrispondenza della ripida fascia di collegamento con la falesia (Figura 113). Successivamente il sentiero prosegue sfruttando ripiani morfologici e tratti di versante meno acclivi per mantenere una livelletta accettabile.



Figura 113 - Primo tratto del sentiero che dallo scalo Marinella conduce al carcere.

Il versante a monte della falesia, che ha inizio sulla sommità dell'isola, degrada verso il mare con pendenze generalmente del 25-35% che tendono ad aumentare in prossimità della falesia. Il versante è inciso da un modesto impluvio, incassato in una vallecchia, che immette direttamente in mare immediatamente ad Ovest dell'approdo Marinella. A monte dell'approdo Marinella sono presenti due vecchi depositi per l'acqua in muratura. Molto interessante è il fatto che, con il carcere in funzione, per un certo periodo tutta l'isola (limitatamente alle aree sommitali ed ai versanti meno acclivi) è stata oggetto di attività agricola portata avanti dai reclusi. Attualmente il suolo è interessato da vegetazione erbacea e arbustiva spontanea e non vi sono più tracce delle antiche colture. Sono però ancora osservabili in molte aree i terrazzamenti a suo tempo realizzati per utilizzare il territorio ai fini agricoli. Lungo i versanti a monte dell'approdo Marinella, sono ben visibili i suddetti terrazzamenti che, a parte locali dissesti dovuti all'abbandono delle pratiche agricole con conseguente assenza di manutenzione, non mostrano elementi attribuibili a fenomeni attivi a livello di versante.

Posto che i dissesti in corrispondenza della falesia sovrastante l'approdo sono oggetto dello studio geomeccanico, cui si rimanda per i risultati, il rilievo di campagna condotto in sito nonché l'esame delle foto aeree e satellitari hanno fatto rilevare quanto segue:

- lo spessore della coltre regolitica/colluviale che ricopre il substrato in posto (Formazione di Villa Giulia e Unità di Santo Stefano) lungo il versante a monte dell'approdo Marinella è mediamente di pochi decimetri (Figura 114);
- sui versanti a monte dello scalo Marinella non sono individuabili elementi riconducibili a franosità attiva o quiescente;
- i versanti a monte dell'approdo sono soggetti ad erosione idrica diffusa da parte delle acque meteoriche che, nei settori di versante con pendenza moderata o terrazzati sono di entità modesta e molto mitigati dalla vegetazione spontanea, mentre nei settori di versante più acclivi, soprattutto in prossimità del limite con le falesie, sono più intensi e a tratti denudano il substrato (Figura 115); i processi erosivi a spese della copertura sono anche favoriti dalla giacitura radiale del substrato e dalla litologia incoerente della copertura stessa;
- l'orlo della falesia prospiciente l'approdo Marinella (Figura 116 e Figura 117) è in parte aggettante e sono state osservate potenziali situazioni di instabilità dovute sostanzialmente

a caduta di materiale della coltre regolitica/colluviale (terra, pietre) e distacco del substrato lapideo (membro SS2 dell'Unità Santo Stefano).



Figura 114 - Copertura regolitica/colluviale su Formazione di Villa Giulia.



Figura 115 - Scalo Marinella: aree soggette ad erosione idrica diffusa severa.



Figura 116 - Scalo Marinella: orlo della falesia/1. Tratti in aggetto sede potenziale di instabilità per caduta terriccio, pietre e crolli localizzati.



Figura 117 - Scalo Marinella: orlo della falesia/2. Tratti in aggetto sede potenziale di instabilità per caduta terriccio, pietre e crolli localizzati.

In sintesi, a livello geomorfologico la fascia di territorio che comprende l'approdo Marinella e la prima parte del sentiero che conduce al carcere è interessata dalle seguenti criticità (Figura 118):

- approdo:
 - crolli localizzati in corrispondenza delle porzioni aggettanti dell'orlo della falesia
 - caduta di pietre e materiale terroso per dilavamento della coltre da parte delle acque meteoriche e/o per gravità
- tratto iniziale del sentiero
 - caduta di pietre e materiale terroso per dilavamento della coltre da parte delle acque meteoriche e/o per gravità.



Figura 118 - Approdo Marinella. Criticità geomorfologiche: in giallo caduta di pietre e materiale terroso per dilavamento della coltre da parte delle acque meteoriche e/o per gravità; in rosso scuro crolli localizzati delle parti aggettanti lungo l'orlo superiore.

Scalo n.4

Lo Scalo n.4 è un piccolo approdo di emergenza localizzato sulla costa Nord Est dell'isola, che può essere utilizzato quando determinate condizioni di mare o di vento non rendono possibile l'utilizzo dell'approdo Marinella.

Gli interventi antropici sono in quest'area ridotti a minimo e consistono essenzialmente nella scalinata ricavata nella roccia che dal carcere conduce allo scalo.

Lo scalo consiste in una piccola insenatura nella quale le barche si accostano ad un gradone ricavato nella roccia per consentire lo sbarco. Dal gradone di sbarco si passa sugli affioramenti dell'Unità di Santo Stefano per arrivare alla scalinata.

La scalinata, realizzata nel periodo borbonico sulla traccia della scalinata romana probabilmente ammalorata (i cui resti sono a tratti visibili a fianco della scala attuale), segue un percorso incassato nella roccia e grosso modo corrispondente alla linea di massima pendenza del versante.

Una falesia marca anche in questo caso il passaggio tra il versante ed il mare. Il versante a monte della falesia, che si origina dalla sommità dell'isola, degrada verso il mare con pendenze crescenti. La fascia che dal carcere si estende fino a circa metà del versante presenta ancora le tracce dei terrazzamenti realizzati per scopi agricoli. La vegetazione è di tipo spontaneo erbacea e arbustiva.

A partire da metà versante l'acclività aumenta ed i fenomeni di erosione idrica diffusa della coltre da parte delle acque meteoriche, inizialmente moderati e molto mitigati sia dalla vegetazione che dai terrazzamenti, assumono intensità maggiore e si manifestano mettendo a nudo il substrato su aree piuttosto estese. L'area di maggiore estensione si trova sul settore di versante che termina sulla falesia della piccola insenatura dell'approdo (Figura 119).



Figura 119 - Scalo n.4: aree soggette ad erosione idrica diffusa severa.

Un'altra criticità di tipo geomorfologico è identificabile sia su in corrispondenza di un affioramento in aggetto della Formazione di Villa Giulia che si trova a partire dal punto in cui termina la scalinata di accesso allo Scalo 4 e procedendo verso Ovest (Figura 120) sia in corrispondenza di un affioramento in aggetto di SS2 sopra i gradini che portano a mare (Figura 121).



Figura 120 - Scalo n.4: affioramento aggettante della Formazione di Villa Giulia potenzialmente soggetto a distacco di elementi litoidi per alterazione del litotipo.

Le caratteristiche litologiche della Formazione di Villa Giulia (depositi piroclastici) la rendono più rapidamente soggetta ai processi di alterazione da parte degli agenti atmosferici, come peraltro dimostrato dall'attuale stato dell'affioramento; nel caso di SS2 il litotipo è più resistente in quanto costituito da depositi piroclastici cementati ma comunque alterabili. La criticità è rappresentata in ambedue i casi dalla elevata probabilità di distacco di elementi litoidi dalle parti aggettanti con caduta di pietre anche di grandi dimensioni e terra.

In sintesi le criticità geomorfologiche che interessano il sito dello scalo 4 sono le seguenti (Figura 122):

- erosione idrica diffusa severa sul versante a monte dell'insenatura dello Scalo 4 e su una fascia di versante sovrastante l'ultimo tratto della scalinata con conseguente possibilità di caduta pietre;
- potenziale distacco di elementi litoidi per alterazione della formazione in posto dall'affioramento aggettante sopra il tratto finale della scalinata.

La criticità principale è rappresentata dalla possibilità di caduta di elementi lapidei dagli affioramenti aggettanti e può essere mitigata sensibilmente con interventi sugli affioramenti stessi:

- pulizia e disaggio degli elementi instabili
- messa in posto di rete a maglia esagonale a doppia torsione con eventuali cavi di contenimento in acciaio e aperta sul fondo per evitare l'accumulo di elementi litoidi (Figura 123).



Figura 121 - Scalo n.4: affioramento aggettante della Formazione SS2 potenzialmente soggetto a distacco di elementi litoidi per alterazione del litotipo.

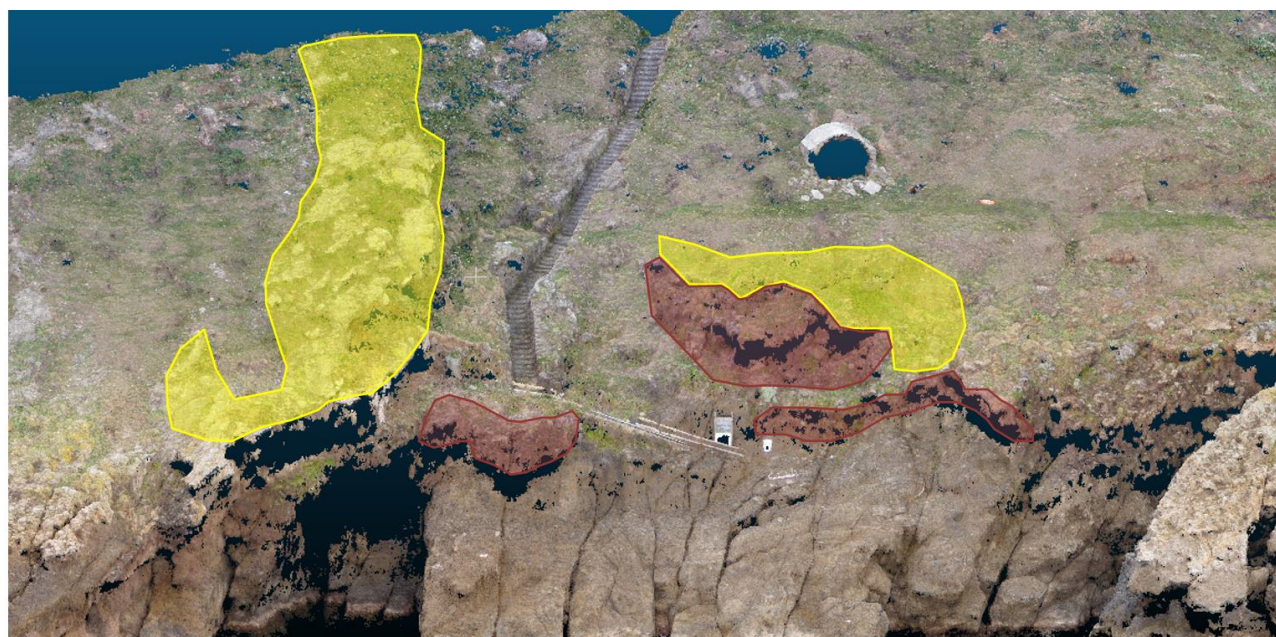


Figura 122 - Scalo n.4. Criticità geomorfologiche: in giallo caduta di pietre e materiale terroso per dilavamento della coltre da parte delle acque meteoriche e/o per gravità; in rosso scuro crolli localizzati delle parti aggettanti.



Figura 123 - Esempio di intervento con rete a maglia esagonale a doppia torsione con cavi in acciaio.

La mitigazione dei fenomeni erosivi, che rappresentano la criticità minore ai fini della fruibilità dei luoghi, è più complessa in quanto la pendenza dei versanti interessati dai fenomeni è piuttosto elevata e gran parte delle fasce in erosione è denudata con il substrato affiorante denotando che il fenomeno è allo stato avanzato. La protezione del suolo dall'erosione diffusa può essere attuata mediante opere di ingegneria naturalistica sui versanti tipo fascinate o interventi assimilabili mirati a trattenere il suolo (Figura 124).

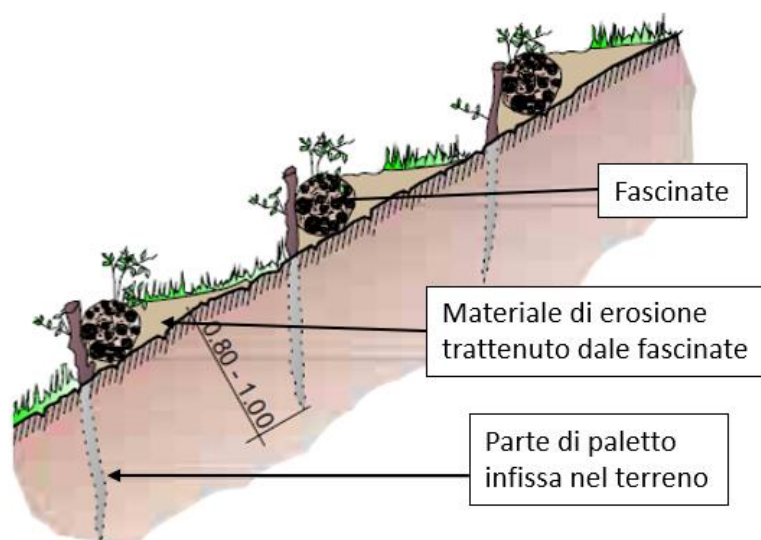


Figura 124 - Sezione-tipo di intervento di fascina su versante interessato da erosione.

5 Conclusioni

Al fine di identificare la suscettibilità al dissesto delle due aree dell'isola di Santo Stefano oggetto del presente incarico mediante una metodologia di lavoro basata su un'analisi cinematica 3D, è stata realizzata una campagna di rilievi che si è composta di un rilievo geologico - geomeccanico - geomorfologico tradizionale, da un rilievo fotogrammetrico da drone e da un rilievo con *laser-scanner* terrestre. Di seguito vengono descritte le principali risultanze delle indagini e delle analisi svolte.

Caratterizzazione dell'ammasso roccioso

I dati ricavati dai rilievi realizzati sono stati utilizzati per la caratterizzazione dell'ammasso roccioso. La caratterizzazione è stata svolta utilizzando due diversi approcci: un approccio qualitativo tramite l'impiego del metodo di *Bieniawski* e un approccio quantitativo-parametrico tramite l'utilizzo del criterio di rottura empirico di *Hoek & Brown* (1980). I parametri geotecnici ottenuti da quest'ultimo approccio sono stati utilizzati successivamente come input per la realizzazione dell'analisi cinematica finalizzata all'identificazione della suscettibilità al dissesto e dei meccanismi di dissesto più probabili.

La classificazione qualitativa dell'ammasso roccioso si è basata sui dati raccolti dal rilievo geomeccanico tradizionale ed è stata svolta applicando il metodo di classificazione di *Bieniawski*, *Rock Mass Rating* (RMR), ottenendo, in funzione del valore assegnato ai relativi parametri, un valore di RMR di base per ognuna delle tre stazioni geomeccaniche realizzate durante il rilievo geomeccanico tradizionale (GM1, GM2 e GM3, Tabella 22). Per tutte le stazioni i valori di RMR_b risultano rientrare nella Classe II (Buona).

	GM1	GM2	GM3
RMR _b	68,4	80,8	74,9

Tabella 22 - Valori di RMR_b ottenuto dall'applicazione del modo di *Bieniawski* per ogni stazione geomeccanica realizzata.

La classificazione quantitativo-parametrica è stata invece realizzata utilizzando il criterio di rottura empirico di *Hoek & Brown* (1980). Questo criterio, una volta definiti i parametri di entrata, che nel presente caso sono stati individuati tramite la valutazione di dati da letteratura o tramite approccio visivo, permette di ottenere una serie di parametri che definiscono il comportamento dell'ammasso roccioso. Al fine di poter implementare questi parametri nell'analisi cinematica dei meccanismi di dissesto però è stato necessario esprimere la resistenza dell'ammasso roccioso in termini di coesione c' e angolo d'attrito ϕ' (Tabella 23), passaggio possibile tramite apposite relazioni.

Parametri geomeccanici	
c [MPa]	2.1
phi	62
sigt [MPa]	-0.52
sigcm [MPa]	37.3
E [GPa]	2.6

Tabella 23 - Parametri di resistenza dell'ammasso roccioso.

Analisi cinematica dei meccanismi di dissesto

L'analisi cinematica è stata effettuata applicando una nuova metodologia (Gigli et al. 2022) basata sugli indici definiti da Casagli e Pini (1993), ma che estende la validità dei concetti dell'analisi cinematica classica anche ai versanti aggettanti ed ai meccanismi di caduta libera, introducendo un indice cinematico globale (GKI), che esprime la probabilità che si verifichi almeno uno dei meccanismi di dissesto investigati. Questo tipo di analisi consente di indentificare le aree che hanno la maggiore propensione al dissesto.

L'analisi è stata svolta sulle tre diverse aree investigate, sia su Scalo n.4 che su Scalo Marinella e all'interno della galleria presente in questo tratto di costa. I risultati delle analisi sono sintetizzati nei valori massimi, medi e di deviazione standard degli indici di suscettibilità cinematica suddivisi per i diversi meccanismi e per i due diversi settori investigati (Tabella 24).

Per la zona di Scalo n.4 il meccanismo con indice più alto è quello di caduta libera (FF, *free fall*), con un valore massimo di 43.5%, meccanismo che si può verificare nei settori in aggetto dei versanti analizzati, seguito dallo scivolamento planare (PF, *planar failure*) e dal ribaltamento per flessura (FT, *flexural toppling*), entrambi con valori di 40.6%. Analizzando però i valori medi dei tre meccanismi citati si nota come il meccanismo di caduta libera è quello meno diffuso nonostante registri il valore di picco più alto, in quanto presente solo nelle porzioni di aggetto. Il meccanismo più probabile è invece il ribaltamento per flessura, che ha un valore medio maggiore e una deviazione standard minore, indice di una minore dispersione dei valori figlia di una distribuzione più omogenea nell'area, mentre il meccanismo di scivolamento planare presenta una diffusione decisamente più bassa, testimoniata da un valore medio basso. Ai meccanismi citati in precedenza si aggiunge anche il meccanismo di scivolamento di cunei (WF, *wedge failure*) che, presenta un valore di picco nettamente inferiore rispetto ai meccanismi citati in precedenza, e un valore medio abbastanza ridotto, sintomo di una diffusione limitata nell'area. L'indice cinematico globale (GKI) massimo è pari al 59.1%. Questi valori sono considerati moderatamente elevati, quindi rappresentativi di condizioni di potenziale dissesto per fenomeni strutturalmente controllati medio-alte. Il meccanismo di ribaltamento di blocchi (BT, *block toppling*) risulta invece essere quasi assente, con valori ridotti sia per il massimo che per la media.

Anche presso Scalo Marinella il meccanismo con valore massimo più elevato risulta essere la caduta libera (FF, *free fall*), anche se con valori decisamente inferiori a quelli identificati presso Scalo n.4, con un massimo pari a 27.5%. Gli altri meccanismi identificati sono il ribaltamento per flessura (FT, *flexural topping*) e lo scivolamento planare (PF, *planar failure*) entrambi con valori massimi pari a 26.6%, quindi significativamente più bassi che nello Scalo n.4. Il meccanismo di scivolamento di cunei (WF, *wedge failure*) ha un valore massimo più basso (15.8%) e quello di ribaltamento di blocchi (BT, *block toppling*) quasi non presente (0.5%). Dal punto di vista della distribuzione il meccanismo più diffuso è lo scivolamento planare che presenta il valore medio maggiore tra i meccanismi analizzati e un valore di deviazione standard ridotto. In secondo luogo, con valori medi decisamente più bassi e quindi una diffusione inferiore abbiamo lo scivolamento planare e il ribaltamento flessurale. Il meccanismo di caduta libera, nonostante registri il valore massimo anche per quest'area, presenta un valore medio ridotto, sintomo che il picco registrato è legato a porzioni localizzate dell'area analizzata, ovvero principalmente le parti rocciose in aggetto. Il valore massimo dell'indice cinematico globale (GKI) è pari a 54.9%, leggermente più basso di quello dello Scalo n.4. Così come per Scalo n.4, anche per Scalo Marinella, i valori degli indici identificati, seppur inferiori a quelli di Scalo n.4, sono considerati moderatamente alti, quindi rappresentativi di condizioni di potenziale dissesto per fenomeni strutturalmente controllati medio-alte.

I valori massimi degli indici identificati all'interno della Galleria di Scalo Marinella sono in linea con quelli ottenuti sui versanti circostanti la galleria. I meccanismi di dissesto più probabili sono infatti quello di caduta libera con valori massimi di 27.5% e lo scivolamento planare e il ribaltamento di flessura con valori massimi di 26.6% e 24.7% rispettivamente. Gli altri meccanismi mostrano indici nettamente più bassi, rispettivamente a 15.8% per lo scivolamento di cunei e 0.5% per il ribaltamento di blocchi (praticamente assente come per la parte esterna dello scalo). Dal punto di vista della distribuzione il meccanismo più diffuso è lo scivolamento di cunei che presenta un valore medio molto vicino al valore massimo registrato e una deviazione standard ridotta. A questo si aggiungono scivolamento, planare ribaltamento per flessura e caduta libera che presentano valori medi abbastanza alti e valori di deviazione standard abbastanza ridotti. I valori massimi dell'indice cinematico globale sono in linea con l'analisi esterna dello scalo, pari a 54.9%.

		PF (%)	WF (%)	BT (%)	FF (%)	FT (%)	GKI (%)
Scalo n.4	max	40.6	17.9	1.8	43.5	40.6	59.1
	media	1.8	1.6	0.4	0.6	4.6	8.6
	dev std	3.9	3.0	0.5	2.9	7.5	11.7
Scalo Marinella	max	26.6	15.8	0.5	27.5	26.6	54.9
	media	3.4	4.9	0.2	0.7	2.8	11.3
	dev std	4.6	5.7	0.2	2.6	4.3	12.4
Scalo Marinella galleria	max	26.6	15.8	0.5	27.5	24.7	54.9
	media	8.0	11.6	0.2	4.8	4.0	26.5
	dev std	6.2	3.6	0.2	5.7	4.2	11.2

Tabella 24 - Valori degli indici di instabilità cinematica per i tre settori analizzati.

L'analisi degli inquadramenti di dettaglio dell'area dello Scalo n.4 ha evidenziato come meccanismo di dissesto principale il ribaltamento flessurale insieme allo scivolamento planare. Il meccanismo di scivolamento di cunei risulta avere valori medio-alti diffusi un po' su tutta l'area analizzata che però, nell'analisi generale dello Scalo n.4, presenta valori contenuti rispetto agli altri meccanismi di dissesto. In una porzione, il lato sud dell'insenatura a sud della zona di approdo, sono presenti anche un indice di pericolosità elevato per il meccanismo di caduta libera, dovuto alla conformità della parete rocciosa, la quale presenta numerose parti in aggetto.

L'analisi degli inquadramenti di dettaglio dell'area dello Scalo Marinella ha evidenziato un valore di fondo generale dell'indice di pericolosità cinematica globale di circa 15 (più alto rispetto allo Scalo n.4), testimoniato dalle numerose porzioni gialle presenti nelle mappe e dovuto a un valore elevato e diffuso per il meccanismo di ribaltamento di cunei. Su questo valore di fondo spiccano però diverse aree con indice elevato per i meccanismi di scivolamento planare, ribaltamento flessurale e caduta libera (quest'ultimo un po' meno diffuso rispetto agli altri due meccanismi citati e presente solo nelle porzioni di roccia aggettante).

Per entrambi gli scali le analisi di dettaglio hanno evidenziato l'assenza tra i meccanismi di dissesto locale del ribaltamento di blocchi, che risulta avere un indice di pericolosità molto basso (valori massimi di 1,8 per lo Scalo n.4 e 0,6 per lo Scalo Marinella) rispetto agli altri meccanismi di dissesto.

Da questa analisi si evince come le conclusioni riportate nell'analisi di dettaglio sono le medesime fatte in precedenza analizzando i valori massimi, medi e di deviazione standard registrati sulle aree in esame. È quindi possibile affermare che i meccanismi più diffusi e di conseguenza più probabili per entrambi gli scali sono lo scivolamento planare (PF, *planar failure*), il ribaltamento flessurale (FT, *flexural topping*) e scivolamento di cunei (WF, *wedge failure*); quest'ultimo presenta valori di picco inferiori rispetto ai primi due ma una diffusione comunque discreta. Il meccanismo di caduta libera (FF, *free fall*) rappresenta su entrambi gli scali il valore massimo registrato ma presenta una diffusione ridotta in quanti limitato alle porzioni aggettanti. Infine il ribaltamento di blocchi (BT, *block toppling*) risulta essere praticamente assente.

Il crollo di una porzione di roccia situata sopra l'insenatura a sud della zona di approdo dello Scalo n.4, avvenuto pochi giorni dopo i rilievi, ha permesso di effettuare una calibrazione degli indici cinematici. I meccanismi principali presenti nell'area con indici di pericolosità elevati sono ribaltamento flessurale, scivolamento planare e caduta libera, che rappresentano infatti i principali meccanismi di dissesto per l'intera area di rilievo di entrambi gli scali. Nell'area interessata dal crollo l'analisi mostra un indice di pericolosità cinematico globale pre-evento medio di circa 37.7% ed un valore massimo pari a 59.1%. Il valore medio di indice cinematico globale può essere utilizzato come soglia per l'individuazione di zone potenzialmente critiche presenti nell'area. Valori superiori a 30-35% di indice cinematico globale sono quindi da considerarsi, a parere degli scriventi, in questo contesto medio-alti indicativi di alto potenziale al dissesto per quanto concerne fenomeni strutturalmente controllati.

Rilievo geomorfologico

Le aree dello scalo Marinella e dello Scalo 4 sono interessate dalle stesse criticità geomorfologiche che sono dovute essenzialmente a fattori di tipo geologico. In entrambe le aree affiorano sia i due membri della Formazione di Santo Stefano (SS1 e SS2) sia, al tetto di SS2, la Formazione di Villa Giulia. I litotipi hanno un bedding con andamento radiale ed inclinazione variabile da meno inclinata del pendio a subparallela al pendio. Il substrato è coperto da una copertura regolitica/colluviale prevalentemente incoerente di spessore mediamente entro poche decine di centimetri. Il bedding radiale con giacitura a franapoggio, le caratteristiche del substrato che può agire da impermeabile relativo favorendo lo scorrimento di acque di percolazione alla base della coltre di copertura e le caratteristiche litologiche della copertura costituiscono, insieme all'alterabilità delle formazioni piroclastiche, le cause predisponenti per le criticità osservate.

Le criticità geomorfologiche riscontrate su entrambi gli approdi sono rappresentate dal potenziale distacco di elementi lapidei e terra in corrispondenza di affioramenti in aggetto delle due formazioni piroclastiche (Villa Giulia in maggior misura in quanto più alterabile e SS2) entrambe alterabili e da caduta di terra ed elementi litoidi causati da fenomeni erosivi da parte delle acque meteoriche a spese della coltre di copertura. I versanti a monte degli affioramenti rocciosi dell'approdo sono soggetti ad erosione idrica diffusa da parte delle acque meteoriche.

Un approfondimento particolare è stato svolto in corrispondenza dello scalo Marinella per verificare eventuali criticità sui versanti a monte dello scalo. Dall'analisi svolta si può affermare che non sono individuabili elementi riconducibili a franosità attiva o quiescente.

La criticità principale è rappresentata dalla possibilità di caduta di elementi lapidei dagli affioramenti aggettanti e può essere mitigata sensibilmente con interventi sugli affioramenti stessi:

- pulizia e disaggio degli elementi instabili;
- messa in posto di rete a maglia esagonale a doppia torsione con eventuali cavi di contenimento in acciaio e aperta sul fondo per evitare l'accumulo di elementi litoidi.

Mappe di sintesi analisi geomorfologica e cinematica

Con l'obiettivo di realizzare un quadro di sintesi per le analisi svolte su entrambi gli scali sono state realizzate due mappe (Figura 125 e Figura 126) contenenti le aree a maggiore pericolosità messe in evidenza dall'analisi cinematica (utilizzando l'indice cinematico globale, GKI) e dall'analisi geomorfologica (aree in erosione in rosso e aree con crolli localizzati in blu).

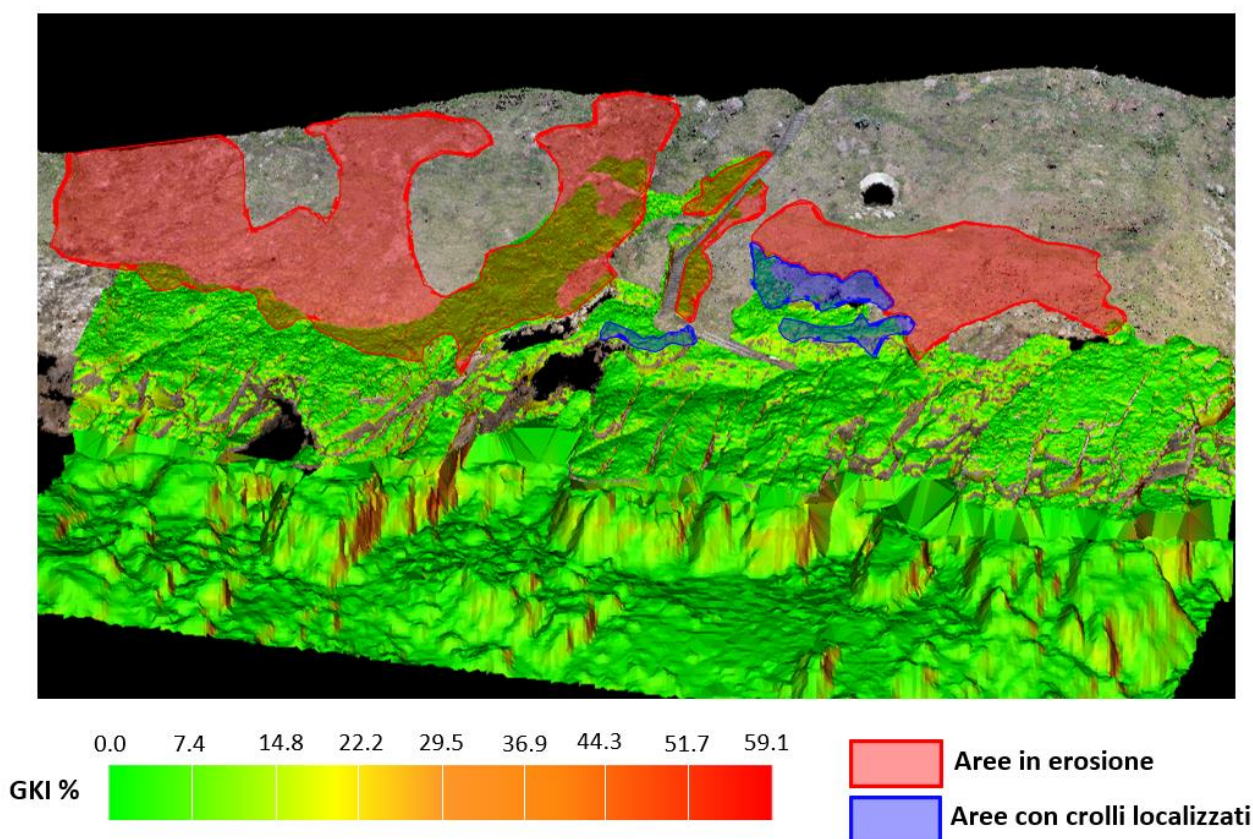


Figura 125 - Mappa di sintesi dell'analisi geomorfologica e cinematica dello Scalo n.4.

La mappa di sintesi dello Scalo n.4 (Figura 125) mostra quattro aree in erosione, localizzate principalmente su zone con una acclività media che terminano sulle pareti della falesia o della scala che conduce al carcere; nella zona nord sono presenti anche tre aree di estensione ridotta caratterizzate da possibili crolli localizzati, situate principalmente al contatto con la parete della falesia.

Dal punto di vista dell'analisi cinematica abbiamo un valore diffuso medio-basso dell'indice globale, ma sono presenti numerose aree localizzate con valori elevati principalmente lungo le pareti dell'insenatura presente a sud della zona di approdo, compresa la zona in cui è stato registrato il crollo, e lungo le pareti della scalinata che conduce al carcere.

La mappa di sintesi dello scalo Marinella (Figura 126) mostra quattro aree caratterizzate da erosione diffusa localizzate come per lo Scalo n.4 su zone con una acclività media che terminano sulle pareti della falesia o su pareti con un acclività nettamente più alta; nella parte alta della parete di fronte alla zona di approdo delle barche è presente un'area caratterizzata da possibili crolli localizzati. Dal punto di vista dell'analisi cinematica invece si evidenzia un valore medio di indice cinematico globale presente in modo diffuso su tutta l'area analizzata, con picchi presenti nella parete di fronte alla zona di approdo e nella parete sottostante la prima rampa della scalinata che porta al carcere, con fratture che proseguono anche sotto il livello del mare.

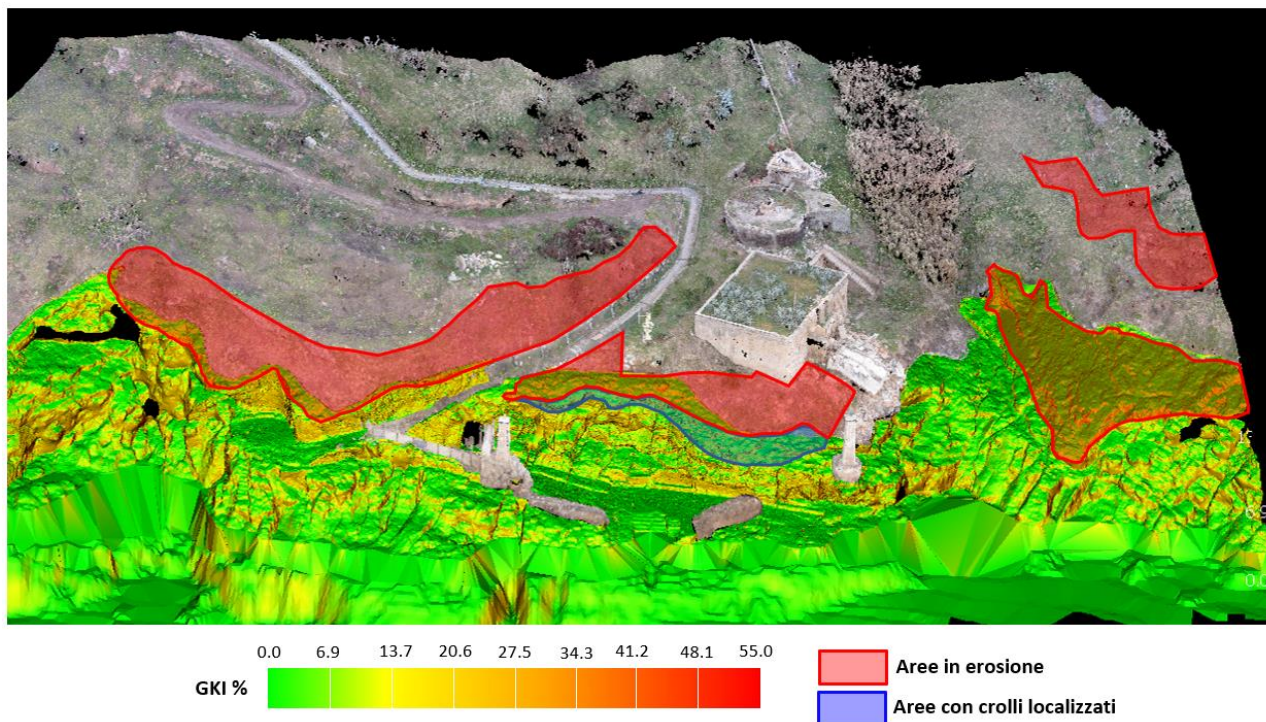


Figura 126 - Mappa di sintesi dell'analisi geomorfologica e cinematica dello Scalo Marinella.

6 Bibliografia

APAT Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e per i servizi Tecnici Atlante delle opere di sistemazione dei versanti 10/2002. Dipartimento Difesa del Suolo, Servizio Istruttorie, Piani di Bacino Raccolta dati e Tecnologie del Sito

Bellucci, F., Lirer, L., Mummo, R. Geology of Ponza, Ventotene and Santo Stefano Islands- Acta Vulcanologica, Vol. 11 (2) - 1999, pp197-222

Casagli N., Pini G., 1993 Analisi cinematica della stabilità in versanti naturali e fronti di scavo in roccia. Atti 3° Convegno Nazionale dei Giovani Ricercatori in Geologia Applicata, Potenza.

Davarpanah, S.M., Sharghi, M., Vásárhelyi, B. et al. Characterization of Hoek–Brown constant mi of quasi-isotropic intact rock using rigidity index approach. Acta Geotech. 17, 877–902 (2022). <https://doi.org/10.1007/s11440-021-01229-2>.

De Rita, D., Fabbri, M., Cimarelli, C. Evoluzione Pleistocenica del margine tirrenico dell'Italia Centrale tra eustatismo, vulcanismo e tettonica

Gigli G., Casagli N., 2011 Semi-automatic extraction of rock mass structural data from high resolution LIDAR point clouds. International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, 48(2011): 187–198.

Gigli G., Lombardi L., Carla T., Beni T., Casagli C., 2022 A method for full three-dimensional kinematic analysis of steep rock walls based on high-resolution point cloud data. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 157 (2022) 105178.

Goodman R.E. & Bray J.W., 1976 Toppling of rock slopes. Proc. Special Conf. on Rock Engineering for Foundations & Slopes. ASCE, Boulder (Colorado), 2, 201-234.

Hoek, E., Carranza-Torres, C.T., and Corkum, B., 2002 Hoek-Brown failure criterion - 2002 edition. Proc. North American Rock Mechanics Society meeting in Toronto in July 2002.

Hoek E. & Bray J.W., 1981 Rock Slope Engineering. Revised Third Edition. Institution of Mining and Metallurgy, London.

Hoek E., 1999 Rock Engineering. Course notes. University of Toronto. Disponibile presso il sito: www.rocsience.com.

Hoek E., Kaiser PK., Bawden WF., 1995 Support of underground excavations in hard rock. Rotterdam: A.A Balkema.

Marinos. P, and Hoek, E., 2001 - Estimating the geotechnical properties of heterogeneous rock masses such as flysch, Bull. Engg. Geol. Env. 60, 85-92.

Maksimovic M., 1996 The shear strength components of rough rock joint. International Journal Rock Mechanics and mining scieces. Vol 33n. 8 pp.769-783.

Matheson G.D., 1989 The collection and use of field discontinuity data in rock slope design. Q. J. Eng. Geol., vol. 22, pp. 19-30.

RIEGL Laser Measurement Systems GmbH, 2004 Technical data at www.riegl.com.

Sacchi, E., Petti, M. Insect pupation chambers from the Pleistocene paleosols of Santo Stefano Island (Pontine Archipelago, Central Italy), Studi Trent. Sci. Nat. Acta Geol., 83 (2008) pp. 205-210