



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

**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

**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

**PROGETTO DEFINITIVO**

ELABORATO			DATA	NOME	FIRMA
Documenti generali Relazione geologica Studio di compatibilità geomorfologica degli interventi ----			REDATTO	05-03-2021	GUIDO
			VERIFICATO	05-03-2021	GUIDO
			APPROVATO	05-03-2021	Rosa di NUZZO
			DATA	05-03-2021	CODICE BREVE
			SCALA	----	
REVISIONE	DATA	AGGIORNAMENTI	CODICE ELABORATO		
Rev. 1	13-09-2021	Revisione in sede di procedura di VIA	2017E037INV-02-D-GE-RGEO00		
Rev. 2	20-11-2023	Integrazione condizione ambientale n.6	CODICE FILE		
Rev. 3			2017E037INV-02-D-GE-RGEO00.dwg		

**GE-RGEO000**

## Sommario

1	<i>Premesse</i> .....	4
2	<i>Inquadramento geologico generale</i> .....	7
2.1	<i>Fondali e morfostrutture collegate a fuoriuscite di fluidi (pokmark)</i> .....	8
3	<i>Unità stratigrafiche Isola di Santo Stefano</i> .....	8
4	<i>Geologia del sito approdo Marinella</i> .....	14
5	<i>Osservazione sullo scalo n.4</i> .....	19
6	<i>Interventi di messa in sicurezza in somma urgenza dello scalo n.4</i> .....	24
6.1	<i>Descrizione degli interventi eseguiti</i> .....	31
6.1.1	<i>Zone di intervento</i> .....	31
6.1.2	<i>Tipologie degli interventi</i> .....	33
6.1.2.1	<i>Intervento 1: Ispezione e pulizia della parete rocciosa</i> .....	34
6.1.2.2	<i>Intervento 2: Demolizione di porzioni rocciose in precarie condizioni di stabilità</i> .....	34
6.1.2.3	<i>Intervento 3: Rafforzamento e protezione della parete rocciosa mediante chiodature con barre metalliche, reti e funi in acciaio</i> .....	35
7	<i>Indicazione del Livello di Rischio Sismico dell'Opera ai sensi del R.R.n.26/2020 – Allegato C – Regione Lazio.</i> .....	36
7.1	<i>Classificazione sismica</i> .....	38
7.2	<i>Indagini geofisiche per la definizione della classe di suolo di fondazione ai fini del calcolo dell'amplificazione sismica ed indagini geofisiche a mare</i> .....	41
8	<i>Campagne di indagini geognostiche</i> .....	45
9	<i>Caratterizzazione geotecnica</i> .....	45
10	<i>Inquadramento geomorfologico, rischio idrogeologico</i> .....	48
11	<i>Indagini integrative geomeccanico da remoto e classico (ottemperanza condizione ambientale n.6 e parere ABDAC)</i> .....	49
11.1	<i>Rilievo geomeccanico tradizionale scalo Marinella</i> .....	50
11.2	<i>Famiglie rilevate e sintesi RMR</i> .....	51
11.3	<i>Rilievo geomeccanico da remoto scalo Marinella</i> .....	54

11.4	<i>Caratterizzazione ammasso roccioso</i>	56
11.5	<i>Indici di pericolosità generico (GKI) e specifico per ogni cinematismo individuato</i>	61
11.6	<i>Pericolosità geomorfologiche e sintesi dei dissesti presso lo scalo Marinella</i>	72
11.7	<i>Rilievo geomeccanico tradizionale e da remoto della cavità antropica nei pressi dello scalo Marinella</i>	73
11.8	<i>Rilievo geomeccanico tradizionale scalo n.4</i>	78
11.9	<i>Famiglie rilevate e sintesi RMR</i>	80
11.10	<i>Rilievo geomeccanico da remoto scalo n.4</i>	81
11.10.1	<i>Pericolosità geomorfologiche e sintesi dei dissesti presso lo scalo n.4</i>	81
12	<i>Rilievo geostrutturale prima campagna</i>	84
13	<i>Sintesi delle verifiche di stabilità del pendio</i>	84
13.1	<i>Generalità Verifica di stabilità scalo n.4</i>	85
13.2	<i>Verifica di stabilità scalo n.4 – Sezione A-A'</i>	87
13.3	<i>Verifica di stabilità scalo n.4– Sezione B-B'</i>	95
13.4	<i>Verifica di stabilità scalo n.4 – Sezione C-C'</i>	100
13.5	<i>Generalità Verifica di stabilità scalo Marinella</i>	105
13.6	<i>Verifica di stabilità scalo Marinella – Sezione A-A'</i>	106
13.7	<i>Verifica di stabilità scalo Marinella – Sezione B-B'</i>	112
13.8	<i>Verifica di stabilità scalo Marinella – Sezione C-C'</i>	118
13.9	<i>Verifica di stabilità scalo Marinella – Sezione D-D'</i>	124
14	<i>Interventi di mitigazione presso l'approdo Marinella</i>	127
15	<i>Ulteriori Vincoli idrogeologici</i>	129
16	<i>Prescrizioni delle Norme di Attuazione del P.A.I. (ex autorità dei Bacini Regionali del Lazio) Autorità di Bacino Distretto Idrografico Centrale – iter per la richiesta di ripermetrazione del rischio</i>	130
16.1	<i>Piano di monitoraggio aree a pericolo e rischio di frana</i>	131
17	<i>Inquadramento ed osservazioni idrogeologiche</i>	137
18	<i>Conclusioni</i>	138

Allegato 1 Carta geologica Marinella – codice elaborato 2017E037INV-02-D-R0-TAV014

Allegato 2 Sezioni geologiche Marinella – codice elaborato 2017E037INV-02-D-R0-TAV015

Allegato 3 Carta geomorfologica Marinella – codice elaborato 2017E037INV-02-D-R0-TAV016

Allegato 4 Carta geologica Scalo n.4 – codice elaborato 2017E037INV-02-D-R0-TAV017

Allegato 5 Sezioni geologiche Scalo n.4 – codice elaborato 2017E037INV-02-D-R0-TAV018

Allegato 6 Carta geomorfologica Scalo n.4 – codice elaborato 2017E037INV-02-D-R0-TAV019

Allegato 7 Report analisi di stabilità del pendio SSAP2010 – codice elaborato 2017E037INV-02-D-GE-RPT001

Allegato 8 Rilievi geomeccanici prima campagna – codice elaborato codice elaborato  
2017E037INV-02-D-GE-IND001

Allegato 9 Rilievi geomeccanici integrativi da remoto – codice elaborato codice elaborato  
2017E037INV-02-D-GE-IND002

## 1 Premesse

La presente relazione è parte integrante del progetto n. **3.a - Realizzazione/adequamento degli approdi all'Isola di Santo Stefano – Opere di mitigazione del rischio crolli sulla falesia**. Il progetto fa parte di una serie di interventi contemplati nell'Accordo Operativo tra il Ministero per i beni e le Attività Culturali e per il Turismo e l'Agenzia Nazionale per l'attrazione degli investimenti e lo sviluppo d'impresa SpA per la realizzazione delle attività di soggetto attuatore del CIS per il RECUPERO E LA RIFUNZIONALIZZAZIONE DELL'EX CARCERE BORBONICO DELL'ISOLA DI S. STEFANO VENTOTENE" (fig.1).

L'intervento prevede la mitigazione del rischio crolli della falesia prospiciente lo scalo Marinella e lo scalo n.4, vista la perimetrazione delle aree a pericolosità A e rischio R4 di frana secondo l'Autorità di Bacino del Distretto Idrografico Centrale. La messa in sicurezza, tramite reti aderenti e chiodature, previo collaudo e monitoraggio di almeno un anno, sarà propedeutica al progetto di realizzazione di un molo di attracco in località Marinella dell'Isola di Santo Stefano. Il presente studio è stato sviluppato quindi con l'obiettivo di:

- eseguire uno studio di compatibilità geomorfologica delle opere di mitigazione del rischio crollo della falesia in funzione del fenomeno di dissesto presente e segnalato dall'AdB Appennino Centrale grazie anche ad un rilievo geomeccanico in corrispondenza della falesia (istruttoria prot. 12714/2022 del 23/11/2022);
- approfondire ed estendere l'area di studio ai poligoni del P.A.I., come indicato nella istruttoria dell'Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Centrale, attraverso un rilievo geomeccanico integrativo; i rilievi eseguiti, per l'area dello scalo Marinella, hanno interessato i poligoni denominati TSAS01 e TSAS46, per l'area dello scalo n.4, hanno riguardato i poligoni TSAS3, TSAS4 e TSAS6.

Lo scalo n.4 è stato interessato da un intervento in somma urgenza che ha risolto in larga parte le criticità presenti sulla falesia prospiciente l'approdo. Tale progettazione ha ottenuto il parere positivo dell'AdB prot. n 11843\_11844\_12320\_2023.

In ottemperanza all'Allegato 7 del Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico dell'Autorità dei Bacini Regionali del Lazio "LINEE GUIDA PER GLI STUDI FINALIZZATI ALLE VALUTAZIONI DI STABILITÀ DEI VERSANTI", il presente studio è corredato, per entrambe le aree, da:

- carta geologica in scala 1:300 (Marinella e Scalo n.4);
- sezioni geologiche in scala 1:200 (Marinella e Scalo n.4);
- carta geomorfologica in scala 1:300 (Marinella e Scalo n.4);

- report analisi di stabilità del pendio (Marinella e Scalo n.4);
- rilievo geomeccanico – prima campagna;
- rilievo geomeccanico integrativo da remoto

L'isola è interessata da diversi vincoli sia di natura ambientale-paesaggistica sia di natura idrogeologica. Di seguito si evidenziano le diverse disposizioni normative:

- Decreto del Ministero dell'Ambiente del 11 maggio 1999, *Istituzione della riserva naturale statale denominata Isole di Ventotene e Santo Stefano*;
- Decreto del Ministero dell'Ambiente del 12 dicembre 1997, *istituzione dell'Area Naturale Marina Protetta denominata "Isole di Ventotene e S. Stefano"*;
- *L.R.24/98, Pianificazione paesistica e la tutela dei beni e delle aree sottoposte a vincolo paesistico*;
- DCR n.5 del 02/08/2019, *Piano Territoriale Paesistico Regione Lazio*;
- DGR n. 49 del 13 febbraio 2020, *variante di integrazione del Piano Territoriale Paesistico Regionale (PTPR), ai sensi dell'articolo 23 della L.R. n. 24 del 6 luglio 1998 ed in ottemperanza degli artt. 135, 143 e 156 del D.Lgs. n. 42/2004, inerente alla rettifica e all'ampliamento dei beni paesaggistici di cui all'articolo 134, comma 1, lettere a), b) e c), del medesimo D.Lgs. n. 42/2004, contenuti negli elaborati del PTPR approvato con DCR n. 5 del 2 agosto 2019*;
- *Piano di Emergenza comunale di Protezione Civile del comune di Ventotene, approvato con DCS n°5 del 01/12/2016*;
- *Piano di Zonizzazione Acustica adottato con DCC n°15 del 29/08/2014*.
- *Deliberazione del Consiglio Regionale n. 17 del 04/04/2012, Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) aree sottoposte a tutela per dissesto idrogeologico ex Autorità dei Bacini Regionali del Lazio, oggi Autorità di Bacino Distrettuale dell'Appennino Centrale*;
- *DPR n° 1746 del 18/03/2008, l'ex carcere di Santo Stefano diventa Monumento Nazionale*;
- *Decreto di apposizione del vincolo di tutela per particolare interesse storico artistico ai sensi della legge 1089/39, del 14 maggio 1987, Ministero Beni Culturali e Ambientali*;

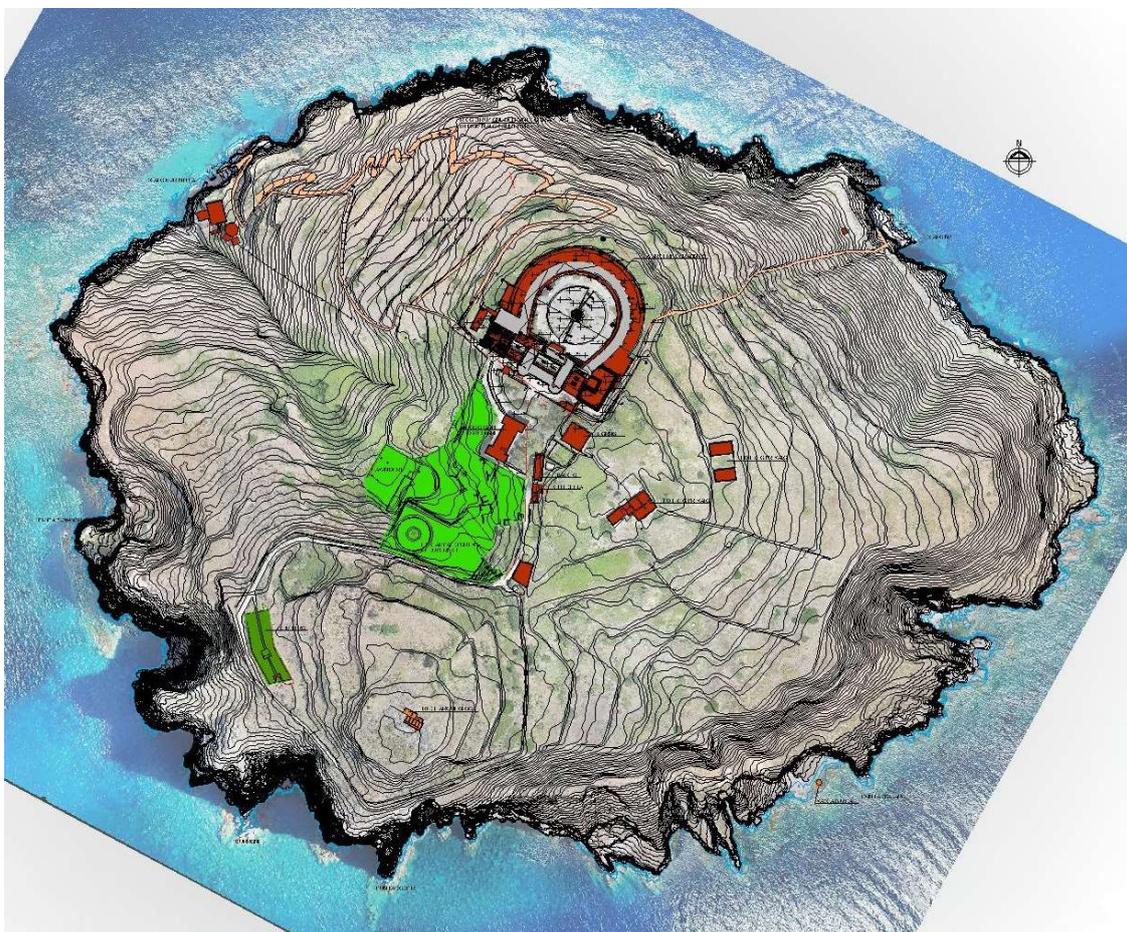


Fig.1 stralcio planimetrico con ubicazioni delle strutture presenti sull'isola

**Altre norme di riferimento**

- Decreto Ministeriale 17 gennaio 2018 – Norme Tecniche per le Costruzioni;
- Circolare 21 gennaio 2019, n. 7 CSLL.PP.;
- NUOVA CLASSIFICAZIONE SISMICA DELLA REGIONE LAZIO - DELIBERA DI GIUNTA REGIONALE n. 387 del 22.05.2009 (BUR Lazio n. 24 del 27.06.2009 - Supplemento Ordinario 106) e s.m.i.;
- Regolamento Regionale 26 ottobre 2020 n. 26;
- Delibera n.493 del 23 luglio 2019 "Modifica deliberazione di Giunta regionale 22 maggio 2009 n. 387 concernente "Nuova classificazione sismica del territorio della Regione Lazio in applicazione dell'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3519 del 28 aprile 2006 e della DGR Lazio 766/03;
- Norme di Attuazione del P.A.I. (ex autorità dei Bacini Regionali del Lazio) Autorità di Bacino Distretto Idrografico Centrale;
- Relazione Tecnica del Piano Stralcio per l'Assetto Idrogeologico dei Bacini Regionali Lazio

## 2 Inquadramento geologico generale

Ventotene è quel che resta di un grande vulcano, in parte collassato in mare. Non si conosce l'età esatta del vulcano ma è probabilmente stato attivo insieme al domo di Monte La Guardia di Ponza e la sua attività è proseguita fino a circa 400-300.000 anni fa. L'attività di Ventotene è stata essenzialmente esplosiva anche se non mancano le colate di lava. L'ultima eruzione potrebbe aver causato il collasso della parte terminale dell'edificio. Un dato interessante che merita attenzione per l'isola di Ponza è la bella superficie di terrazzamento marino ben visibile in cima alla falesia di Chiaia di Luna. Questa superficie testimonia il livello del mare circa 90.000 anni fa. La superficie è stata innalzata poi alla quota attuale per problemi di variazione del livello del mare, isostasia e forse anche tettonica.

Ventotene e Santo Stefano rappresentano la parte sommitale di un antico vulcano, che si stima raggiungesse un'altezza di circa 1000 metri e un diametro di una ventina di chilometri (fig.2). Dal punto di vista vulcanologico le due isole appartengono alla cosiddetta provincia campana, assieme al vulcano di Roccamonfina, ai Campi Flegrei, a Ischia e al Vesuvio. Ventotene rappresenta probabilmente il residuo di uno strato-vulcano; nella porzione conservata si distinguono una zona inferiore con livelli piroclastici e lave trachi-basaltiche datate 1,7 milioni di anni, una zona intermedia formata tutta da tufo e una zona superiore con depositi tuffitici (Bergomi et alii, 1969). Nell'isola di Santo Stefano, invece, le vulcaniti più antiche sono lave risalenti a 1,2 milioni di anni fa.

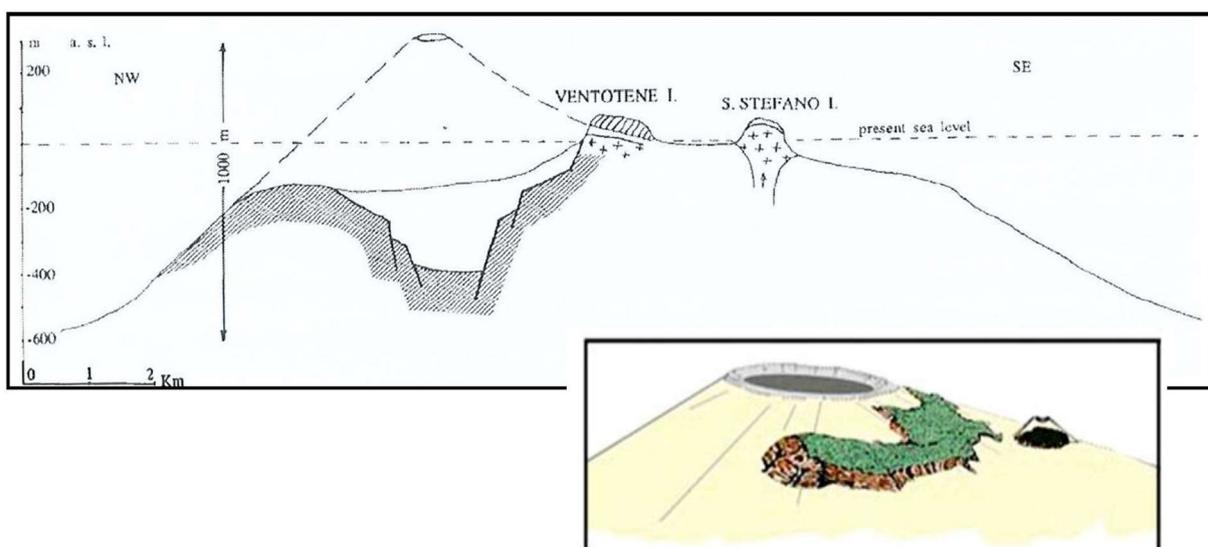


Fig.2 schema geologico esemplificativo delle isole di Ventotene e S. Stefano – da Bergomi et alii, 1969

## **2.1 Fondali e morfostrutture collegate a fuoriuscite di fluidi (pockmark)**

Delle Isole pontine orientali quella principale è l'Isola di Ventotene che corrisponde ad uno strato-vulcano in parte collassato, con diametro basale di circa 15-20 km, che in passato doveva raggiungere un'altezza di circa 800 m (De Rita et al., 1984). L'isola di Ventotene si è formata in diverse fasi effusive, con formazione di colate e duomi lavici, alternatesi a fasi esplosive, con depositi da caduta, flussi piroclastici e surge. I prodotti più antichi sono trachibasalti formati in ambiente sottomarino e datati ad 1.7 milioni di anni (Bergomi et al., 1969), l'attività vulcanica è cessata intorno a 0.15 – 0.30 Ma di anni fa (Perrotta et al., 1996). L'intero apparato vulcanico è localizzato al centro di un'area fortemente subsidente, il bacino di Ventotene, la cui formazione è imputabile ai movimenti tettonici distensivi avvenuti nel Pliocene inferiore correlati all'apertura del Tirreno (Zitellini et al., 1984).

I fianchi sommersi dell'edificio vulcanico di Ventotene sono caratterizzati da numerose forme vulcaniche (coni, colate) e morfologie legate a fenomeni riconducibili ad instabilità gravitativa, quali nicchie di frana e canali erosivi. Nei fondali del Bacino di Ventotene, a profondità comprese tra i -700 e i -750 m, sono presenti numerose depressioni riconducibili a fuoriuscite di fluidi (pockmark), diffusamente distribuiti nel bacino ad eccezione del settore orientale. Risultano anche presenti ridge isolati al di sopra dei quali sono presenti numerose piccole depressioni riconducibili a pockmark.

## **3 Unità stratigrafiche Isola di Santo Stefano**

L'isola di Santo Stefano appartiene all'arcipelago delle isole pontine, è situata 30 Km a sud del Golfo di Gaeta sul bordo della piattaforma continentale (fig.3). Con Ventotene appartiene alle Isole Pontine Orientali. Anche se le due isole oggi sono nettamente separate rappresentano i resti di un grande edificio vulcanico chiamato "Vulcano Ventotene", che è stato attivo tra 0,92 Ma e 0,33 Ma in accordo con la datazione isotopica K/Ar (Metrich et al. 1988; Bellucci et al. 1999a, 1999b). In una recente



Fig. 3 stralcio foto satellitare dell'arcipelago delle isole pontine

cartografia geologica (Bellucci et al., 1999) dell'Isola di Santo Stefano (fig. 4), sono state riconosciute tre differenti unità litostatigrafiche nominate:

- Formazione di Santo Stefano
- Unità di Villa Giulia
- Depositi eolici

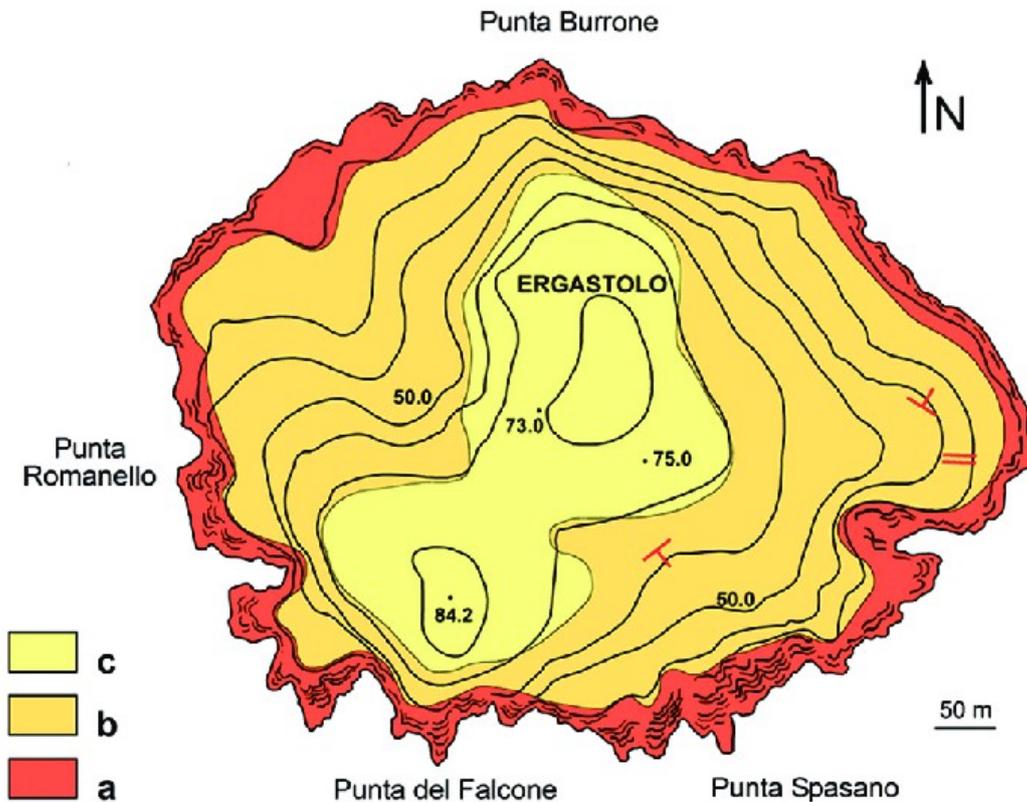


Fig. 4 Carta geologica dell'Isola di Santo Stefano da Bellucci et. al. 1999. a)lave e scorie; b)piroclastiti e pomici; c) piroclastiti e depositi eolici

L'unità basale (Formazione di Santo Stefano) è suddivisa in due membri. Il primo costituito da lave con fratture colonnari e strutture a rampa che passano verso l'alto a livelli scoriacei (fig.5). Questi depositi sono sovrastati dal secondo membro composto da depositi piroclastici massivi composti principalmente da frammenti di pomice sovrastate da livelli di scorie nere.



*Fig. 5 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).*

La Formazione di Santo Stefano è rimpiazzata verso l'alto da depositi piroclastici (Unità di Villa Giulia) attraverso una superficie irregolare. Questi depositi immergono radialmente e sono costituiti da un'alternanza di letti di pomici bianche da caduta e paleosuoli di origine piroclastica.

Nella parte più alta dell'isola sono stati segnalati depositi eolici (Bellucci et al. 1999b) anche se oggi non sono riconoscibili a causa della copertura vegetale e della presenza degli edifici dell'Ergastolo e relative pertinenze.



*Fig. 6 piroclastiti, pomici e paleosuoli– Unità di Villa Giulia – affioramento lungo il percorso dello scalo n.4*

Nella foto (fig. 6) si può osservare l'alternanza di paleosuoli piroclastici e sottili livelli biancastri di pomice – unità di Villa Giulia. Tali depositi si presentano con giacitura a franapoggio inferiore al pendio nell'area compresa tra l'ergastolo e lo scalo 4. Dalla parte opposta dell'isola, grossomodo in corrispondenza dell'area a valle del cimitero si possono osservare i contatti tra la formazione di Santo Stefano e l'unità di villa Giulia (fig. 7).



Fig. 7 Contatto stratigrafico tra la formazione di Santo Stefano e la sovrastante unità di Villa Giulia

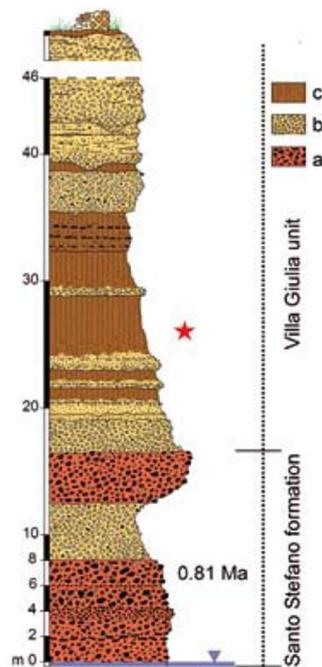


Fig. 8 Successione stratigrafica dell'Isola di Santo Stefano – a)lave e scorie; b) piroclastiti cementate sovrastanti le lave; c) piroclastici e livelli di pomici, paleosuoli (da Sacchi & Petti, 2008)

#### 4 Geologia del sito approdo Marinella

Per quanto riguarda il sito dell'approdo Marinella la litologia affiorante nelle aree a terra è il substrato lavico fratturato della Formazione di Santo Stefano riconducibile a trachi-basalti, mentre a mare sono state rinvenute sabbie, ghiaie, blocchi e ciottoli di natura lavica e piroclastica verosimilmente proveniente dallo smantellamento fisico delle unità affioranti sull'isola a causa dei crolli. I sedimenti poggiano sul substrato roccioso con un contatto probabilmente di tipo onlap.

Il substrato si presenta fratturato con fratture principali subverticali e ortogonali alla falesia, ha aspetto litoide ed a tratti vacuolare. L'attuale approdo, costituito da gradini scavati nella roccia, si presenta come superficie pianeggiante scavata sia dall'azione del moto ondoso sia dall'azione antropica al fine di ottenere una banchina adatta allo sbarco. Nella parte sommitale la falesia è interessata dall'azione delle radici della vegetazione e nonché dall'azione della pioggia e forma a tratti una coltre detritica che genera piccoli blocchi e/o clasti (aree soggette ad erosione diffusa). L'area in esame è stata oggetto di due rilievi geomeccanici, di cui uno integrativo al primo, che saranno trattati nei successivi paragrafi.

La geologia della parte marina dell'approdo è stata ricavata principalmente dalle n.2 stratigrafie relative ai sondaggi eseguiti da motopontone nello specchio d'acqua prospiciente lo scalo ed ubicati con criterio monte valle rispetto alle opere oggetto delle future progettazioni (cassone autoaffondante e radice molo per realizzazione nuovo approdo). I due sondaggi hanno messo in evidenza la presenza di sedimenti di origine vulcanica rappresentati dal punto di vista granulometrico da sabbie, ghiaie, ciottoli e blocchi. Verosimilmente i sedimenti, rimaneggiati dal moto ondoso, sono attribuibili a frane da crollo anche recenti per la componente lavica (nelle stratigrafie indicate come basaltica-andesitica) mentre per le piroclastiti la genesi potrebbe essere dovuta sia ai crolli "antichi" sia agli eventi eruttivi che si sono succeduti fino a circa 300.000 anni fa (Pleistocene). Di seguito si riportano le stratigrafie; per l'ubicazione si rimanda all'allegato 2017E037INV-02-D-GE-IND001 (figg.9-10).



### Sondaggio ST1

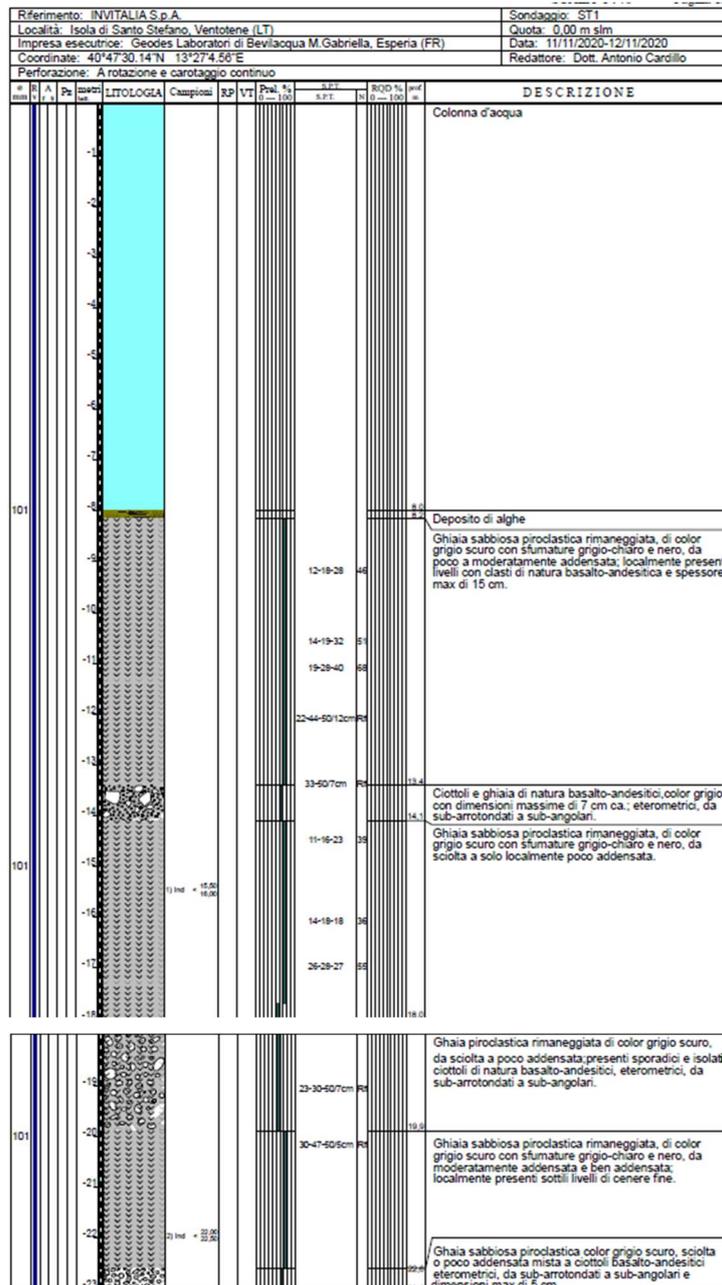


Fig. 10 Stratigrafia del sondaggio ST1 eseguito in mare (più lontano dall'isola)

Come si può notare la stratigrafia mostra un melange di sedimenti a varia granulometria e di diversa natura rimaneggiati tra loro dall'azione del mare. Per questo motivo la rappresentazione in sezione ed in carta geologica è stata uniformata, vista la difficoltà di riconoscere orizzonti stratigrafici ad una scala ancora più di dettaglio.

La parte affiorante dell'approdo (fig. 11), che sarà trattata al paragrafo *"Inquadramento geomorfologico, rischio idrogeologico"* per gli aspetti relativi al rischio frana, è costituita dalle lave e scorie della Formazione di Santo Stefano. Le lave e le scorie si presentano litoidi, a tratti vacuolari e presentano uno stato di fratturazione principalmente dovuto alla fase di messa in posto e di raffreddamento. Le fratture principali si presentano subverticali e circa perpendicolari alla falesia, mentre con frequenza minore si notano fratture con giacitura a franapoggio che concorrono con le prime alla formazione di blocchi potenzialmente instabili (per la descrizione dei cinematismi si vedano i paragrafi 10 e 11).



Fig. 11 falesia dell'approdo Marinella

Sull'area è presente una cavità di natura antropica che si incontra sulla prima rampa di scalini che risale lungo la falesia (fig.12). Tale cavità antropica, a forma di L in pianta, è stata studiata dal punto di vista geomeccanico attraverso le indagini integrative grazie ad un rilievo con laser scanner; l'ubicazione dell'ingresso e dell'uscita è mostrata nella medesima foto.



Fig. 12 cavità antropica

L'indagine R.O.V. ha confermato la composizione del fondale che nella prima parte è caratterizzato dalla presenza della scarpata rocciosa fino alla batimetrica di circa -6,00 m (fig. 13); in fig. 14 l'immagine R.O.V. conferma la presenza di sedimenti di varia natura e granulometria.



Fig. 13 immagine R.O.V. della scarpata rocciosa sommersa



Fig. 14 immagine R.O.V. del fondale marino in corrispondenza dell'approdo Marinella

Per quanto riguarda il percorso che dall'approdo conduce verso in carcere il rischio è identificato nella probabilità di crolli come precedentemente descritti che però interessano soprattutto la falesia anche per la sua conformazione geometrica e per la giacitura che si presenta subverticale.



Fig. 15 prima rampa del percorso dall'approdo  
Marinella al carcere



Fig. 16 seconda rampa del percorso dall'approdo  
Marinella al carcere

Nelle figg. 15 e 16 si nota come la prima parte del percorso sia stato scavato nelle rocce laviche.

## 5 Osservazione sullo scalo n.4

Lo scalo n.4 potrebbe essere utilizzato per sbarchi di emergenza da e per Santo Stefano quando le condizioni meteomarine sono particolarmente severe e non consentono sbarchi a Marinella. Come viene spiegato più dettagliatamente nel paragrafo 8 della presente relazione, il sito è stato oggetto di due rilievi geomeccanici con la finalità di restituire lo stato di fratturazione dell'ammasso roccioso e la successiva elaborazione di verifiche di stabilità globale del pendio. Il sito è infatti interessato da una perimetrazione a pericolo A e rischio R4 di frana da parte dell'ex Autorità dei bacini regionali del Lazio. Il rilievo integrativo geomeccanico è stato eseguito da remoto tramite drone e laser scanner come meglio dettagliato nei paragrafi successivi.

Sintetizzando i risultati del rilievo integrativo, sono stati individuati i principali cinematismi di dissesto possibili mediante l'attribuzione di un indice di probabilità di accadimento. Si rimanda al paragrafo 11 per il dettaglio dei risultati. Si sottolinea inoltre che lo scalo n.4 è stato interessato, nel periodo intercorso tra l'esecuzione dei rilievi integrativi e la restituzione risultati, da un crollo di un blocco la cui volumetria è valutabile in circa 10 m<sup>3</sup>. Per questo motivo è stato necessario

intervenire in somma urgenza con la finalità di rimuovere un ulteriore blocco in condizioni metastabili ed ulteriori interventi di disaggio, chiodature ed installazione di reti aderenti soprattutto nelle parti in aggetto della falesia.

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 (fig.17), 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.



Fig. 17 - Foto della zona di distacco post evento (tratteggio bianco) avvenuto presso lo Scalo n.4.

L'evento può essere 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% (fig.18).

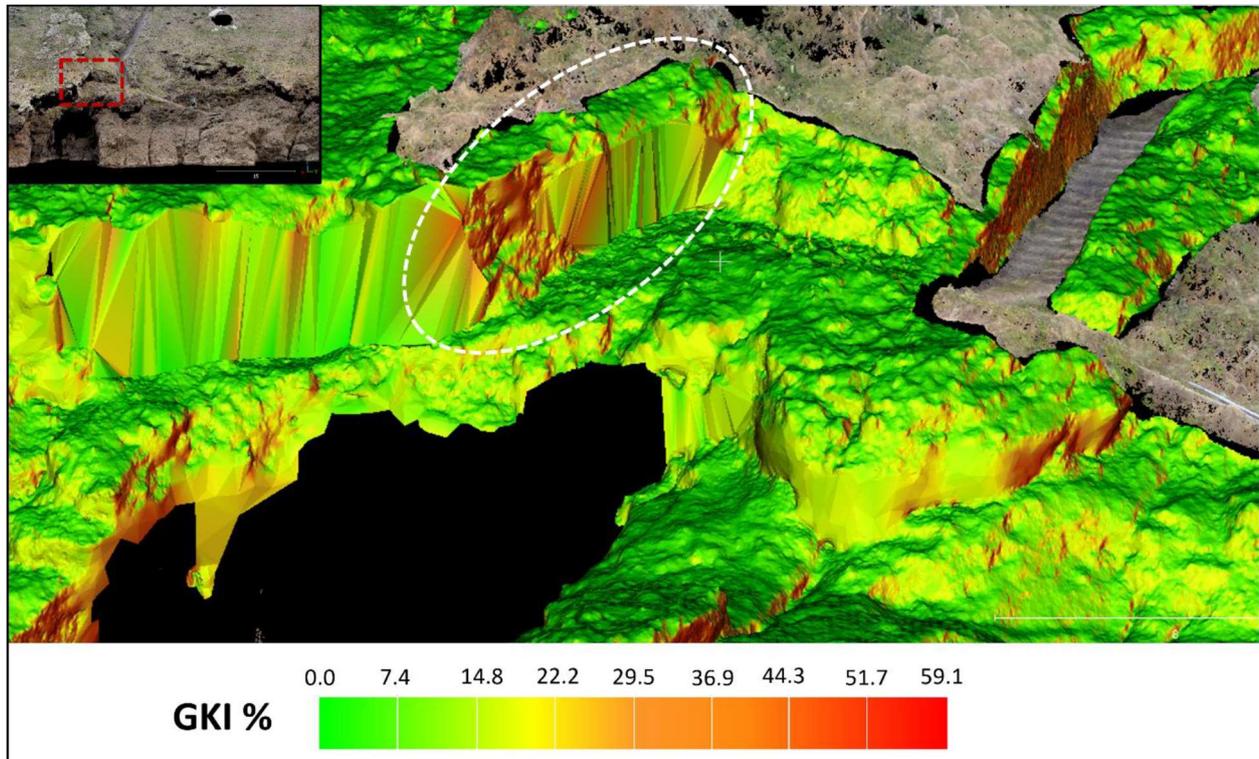


Fig. 18 - Indice di pericolosità cinematica globale della zona di dettaglio crollo presso lo Scalo n.4 con individuazione dell'incide di pericolosità presente pre-evento nell'area di distacco (tratteggio bianco).

Come si può notare dalla Figura 18, 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.

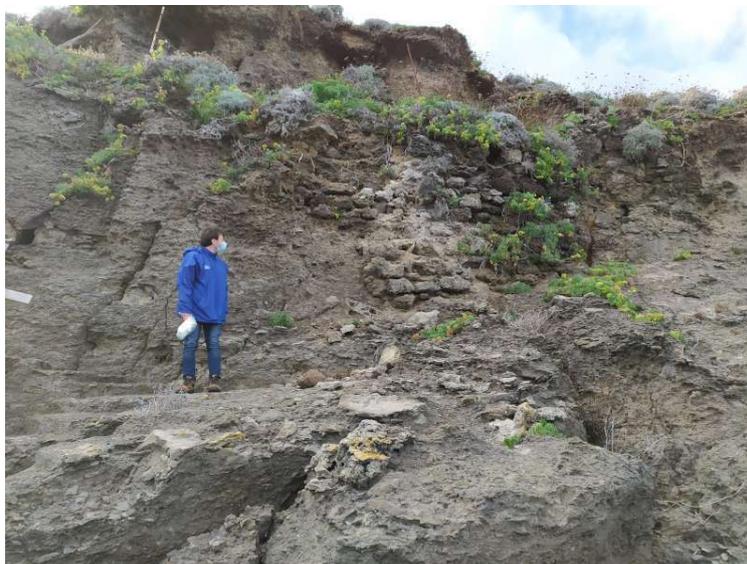


Fig. 17 muro in avanzato stato di degrado

Nella parte opposta dell'insenatura dello scalo, la falesia è sormontata da una parte alterata della roccia lavica a causa della presenza di vegetazione e degli agenti atmosferici. È inoltre presente un muro in mattoni in stato di degrado. Anche queste aree sono state oggetto dell'intervento di somma urgenza.



Fig. 18 aree sommitali della falesia costituite da fasce di alterazione

Gli interventi progettati in quest'area hanno il solo scopo di mitigare i rischi per l'incolumità delle persone che, solo nei casi di emergenza, abbiano l'esigenza di utilizzare l'approdo ed il percorso già esistente in luogo del realizzando approdo in località Marinella.



Fig. 19 percorso scavato nella piroclastite – evidenza di vegetazione ed aggetti

Fuori dalle aree del P.A.I., lungo la scalinata, sono previsti degli interventi minori di ripristino di muri a secco preesistenti.

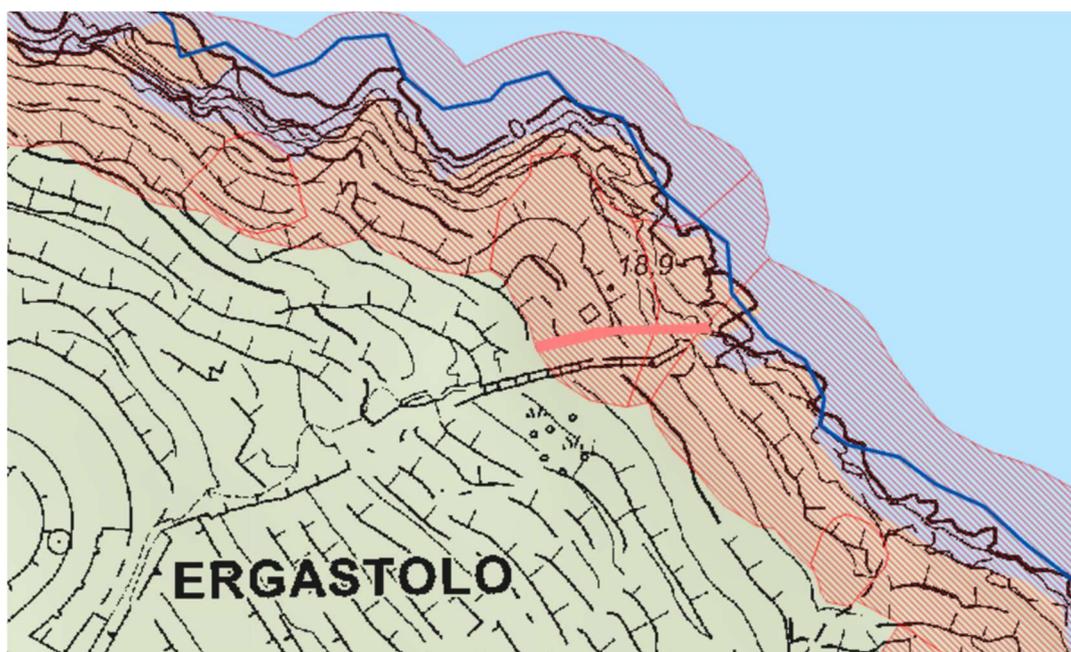


Fig. 20 stralcio delle aree a pericolo A (campitura trasparente) e rischio R4 (rosso intenso riferito alle scale scavate in roccia) – da webgis Autorità di Bacino dell'Appennino Centrale Nazionale

<https://webgis.abdac.it/portal/apps/webappviewer/index.html?id=b4f5f37d97e9427c9c2e4ce7e30928f9>

Per una migliore comprensione si rimanda al paragrafo 11 sulle indagini integrative. Gli interventi

in somma urgenza sono invece sintetizzati al paragrafo 6 “Esiti esecuzione del progetto di messa in sicurezza in somma urgenza dello scalo n.4”.

## **6 Interventi di messa in sicurezza in somma urgenza dello scalo n.4**

Al fine di rendere fruibile lo scalo n.4 alle maestranze impegnate sull'isola per i lavori di Messa in Sicurezza dell'ex Carcere Borbonico, da utilizzare nei casi di emergenza, sono stati necessari dei lavori in somma urgenza di mitigazione del rischio crolli della falesia.

L'insenatura naturale che ospita lo scalo n.4 (approdo costituito da scalini scavati nella roccia lavica) presentava, nella parte sommitale della falesia esposta verso N-NE, un blocco di roccia fratturato prossimo al crollo e che, come riportato nel precedente paragrafo, è stato recentemente interessato dalla caduta di una porzione di dimensioni considerevoli. La frattura principale, infatti, presentava una immersione a franapoggio, come il fronte della falesia interessata, e poteva essere classificata come giunto di trazione (figg.22,23 e 24).

In una prima fase conoscitiva, la geometria del blocco sembrava avere una dimensione stimata di circa 10 m<sup>3</sup>. Si notavano, inoltre, nella parte frontale dell'elemento, le superfici fresche lasciate dal precedente blocco crollato, valutato in circa 8 m<sup>3</sup> (fig 22).

Il disgaggio finale di quest'area, avvenuto nel corso dei lavori realizzati, ha riguardato un volume totale di circa 20 m<sup>3</sup> (figg. 26,27,28); procedendo, infatti, con l'ispezione in corso d'opera, dopo un primo disgaggio, è stato necessario effettuare la demolizione di un secondo blocco che presentava una frattura aperta nella zona di valle (fig. 27).

Dopo il disgaggio è stato eseguito un intervento di rinforzo corticale tramite pannelli di rete e funi e chiodature da 3,00 m e da 4,50 m di lunghezza, come meglio specificato nei paragrafi successivi,

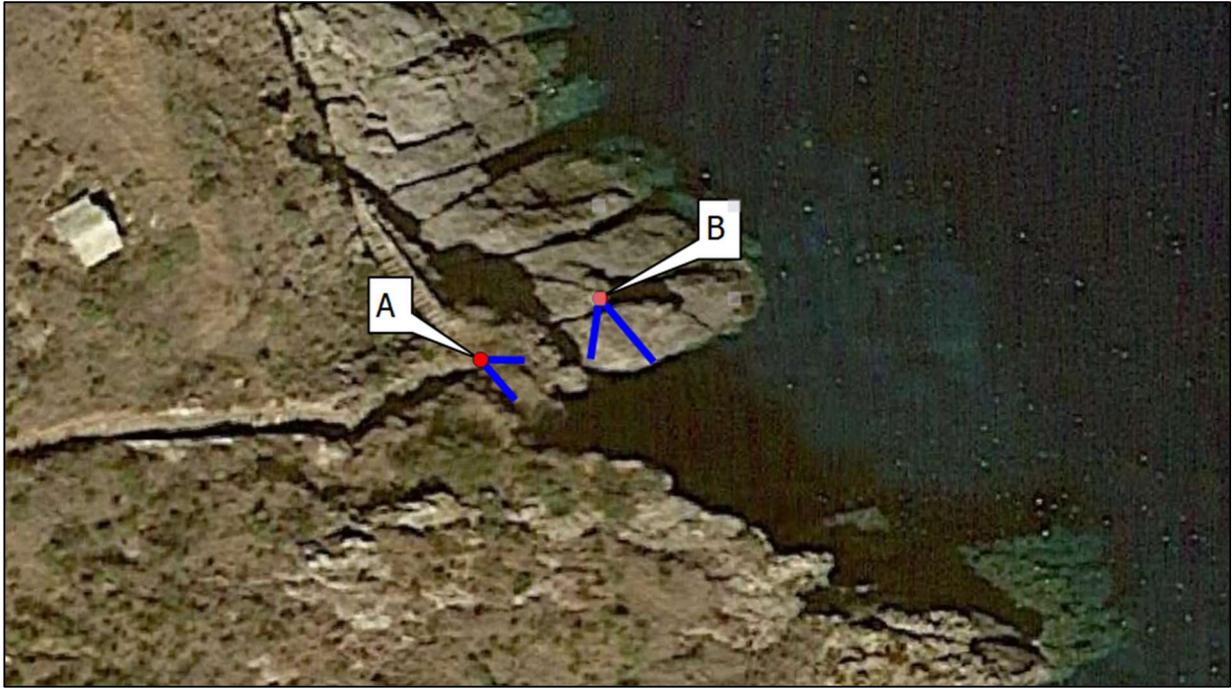


Fig. 21 - Vista aerea dello scalo con indicazione dei coni ottici di cui alle foto seguenti



Fig. 22 - Ante operam - Vista B del blocco a rischio crollo



Fig. 23 - Ante operam - Vista A del blocco a rischio crollo



Fig. 24 - Ante operam - Vista A con evidenza delle fratture



Fig. 25 - Ante operam - Vista B con evidenza delle fratture (blu) e della superficie di un precedente distacco (rosso)



Fig. 26 - Post operam - Vista A dopo il primo disaggio effettuato con malte espansive



Fig. 27 - Particolare della frattura residua dopo il primo disaggio



Fig.28 - Post operam - Vista dopo il disaggio del grande blocco individuato come instabile  
Sul muro che si presenta in stato di degrado si è eseguita la demolizione delle porzioni distaccate e poco cementate e, successivamente, si è applicata la rete in acciaio e barre di chiodatura.



Fig. 29 -: Post operam: Intervento di mitigazione sul paramento murario con reti, funi e chiodi

In questa stessa area la falesia si presentava sormontata da una parte alterata delle lave e scorie (membro stratigraficamente più alto della Formazione di Santo Stefano), per la presenza di vegetazione e per le azioni indotte dagli agenti atmosferici; queste porzioni di roccia erano caratterizzate da aggetti che avrebbero potuto causare il crollo di elementi lapidei, aventi dimensioni da piccole a medie (dell'ordine di qualche decimetro).

In questo caso l'intervento di messa in sicurezza si è concretizzato con la eliminazione delle cause dei potenziali crolli, scivolamenti, distacchi con cadute di detriti o massi, mediante una riprofilatura del versante (disgaggi), finalizzata alla eliminazione degli aggetti esistenti.

Su tutte le superfici trattate si è proceduto, quindi, con un intervento di rafforzamento e protezione mediante l'installazione di reti metalliche aderenti, ad alta resistenza, e funi d'acciaio diagonali per contenere la caduta di elementi lapidei di piccole dimensioni (decimetri). Il sistema delle reti e funi è stato fissato con barre di 3.0 m di lunghezza. L'intervento è stato esteso sul paramento in muratura di pietrame su richiamato.



Fig. 30 - Post operam disaggi aggetti in roccia – vista laterale

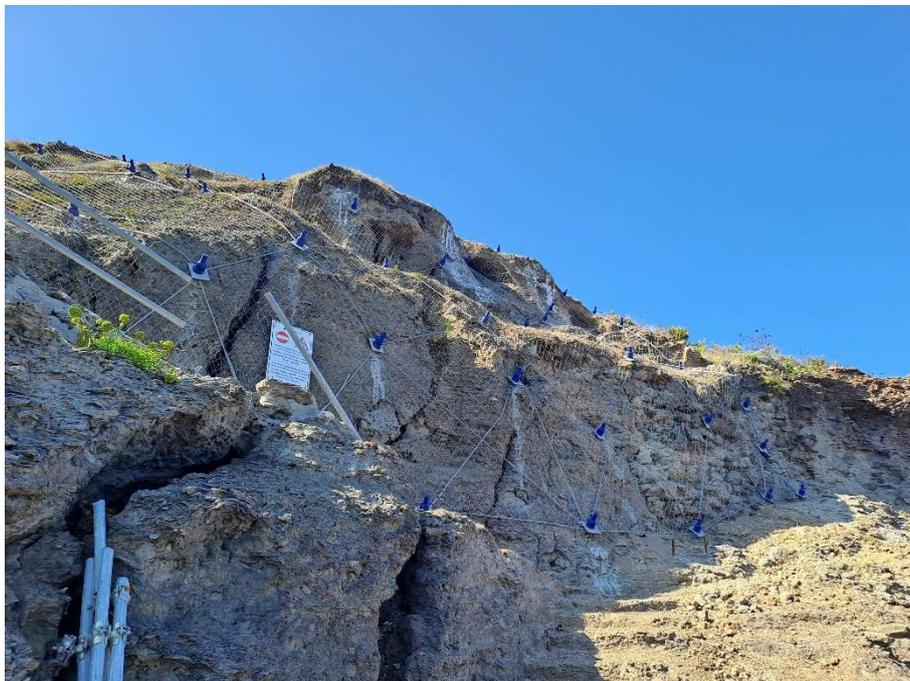


Foto 31 - Post operam – vista frontale ripresa dal basso

## 6.1 Descrizione degli interventi eseguiti

### 6.1.1 Zone di intervento

I lavori di mitigazione dei rischi di instabilità locale dell'area dello scalo n.4, di cui alla presente relazione, hanno riguardato quattro settori o zone, come indicato negli stralci di planimetria, prospetto e sezioni seguenti (Figure 32- 41). Per i dettagli esecutivi si rimanda alle tavole allegate alla documentazione del progetto realizzato (As built).

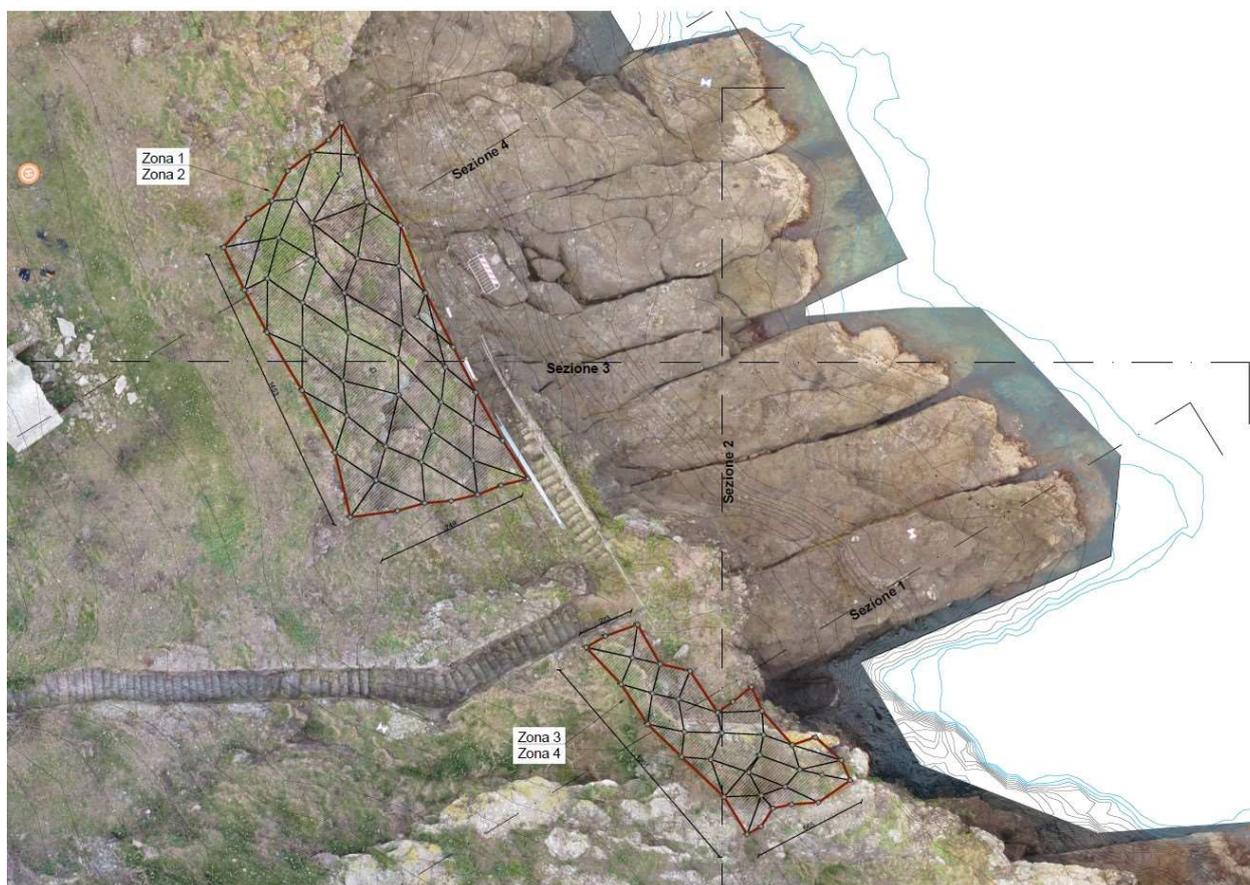


Figura 32: Zone di intervento – vista aerea con schematizzazione degli interventi

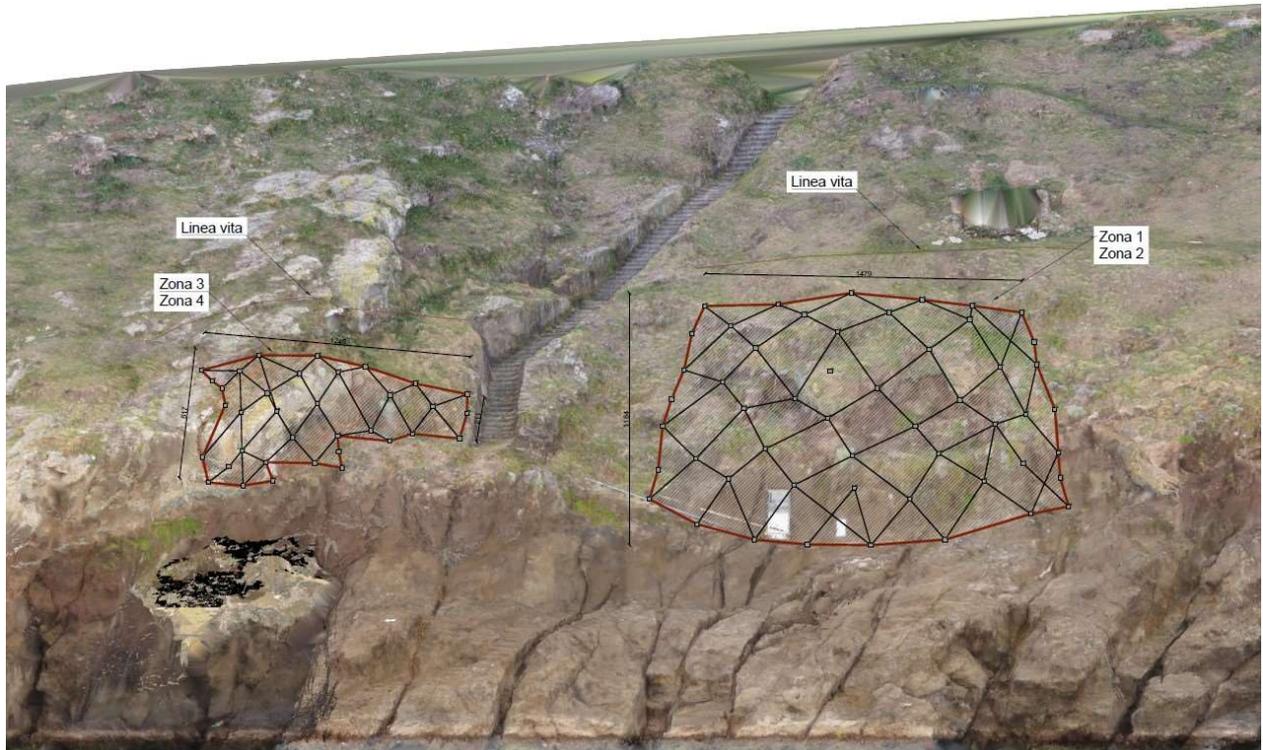


Figura 33: Zone di intervento – vista prospettica con schematizzazione degli interventi

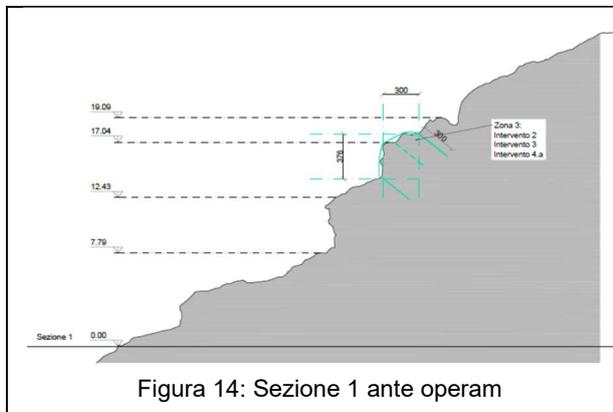


Figura 14: Sezione 1 ante operam

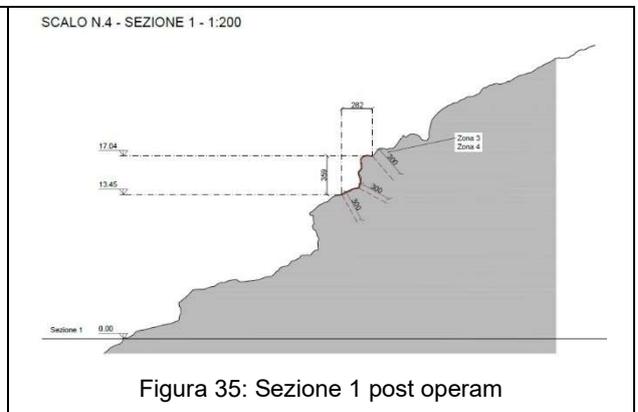


Figura 35: Sezione 1 post operam

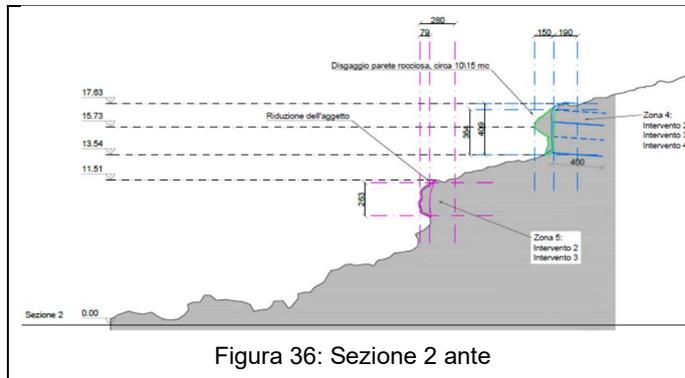


Figura 36: Sezione 2 ante

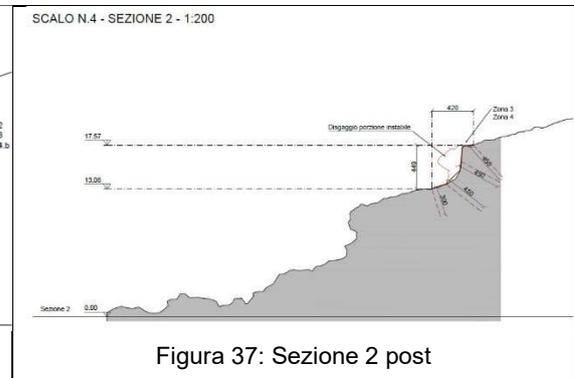


Figura 37: Sezione 2 post

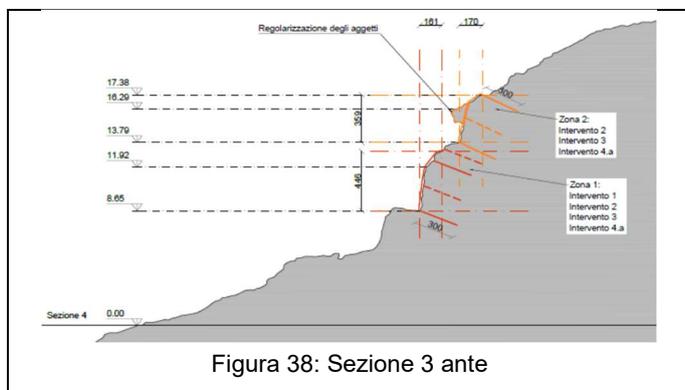


Figura 38: Sezione 3 ante

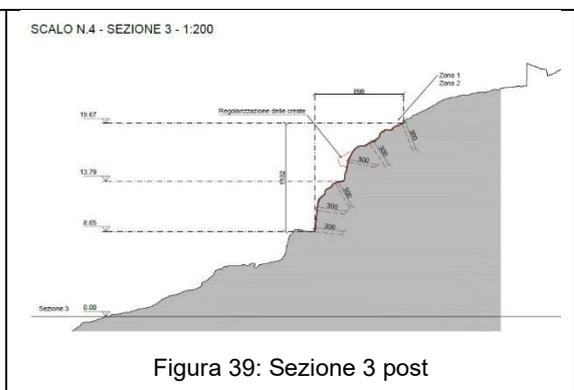


Figura 39: Sezione 3 post

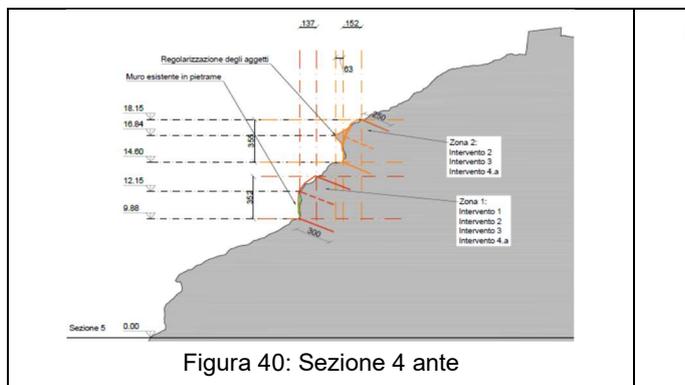


Figura 40: Sezione 4 ante

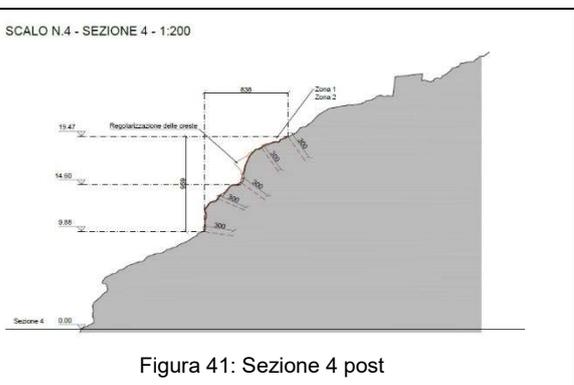


Figura 41: Sezione 4 post

Le zone di intervento sono state individuate sulla base delle criticità riscontrate nel corso delle ricognizioni e dai rilievi effettuati, come su documentato.

### 6.1.2 Tipologie degli interventi

Sulle zone individuate sono state applicate tre diverse tipologie di intervento, definite sulla base delle criticità osservate, di cui all'elenco seguente:

- **Intervento 1:** Ispezione e pulizia della parete rocciosa;
- **Intervento 2:** Demolizione di porzioni rocciose in precarie condizioni di stabilità;

- **Intervento 3:** Rafforzamento e protezione della parete rocciosa mediante chiodature con barre metalliche, reti e funi in acciaio.

Nella figura seguente si riportano le tipologie degli interventi applicati sulle quattro zone (le zone 1 e 2 e le zone 3 e 4 sono da ritenersi contigue).

ZONE	INTERVENTI ESEGUITI
Zona 1 Zona 2	Demolizione e regolarizzazione delle creste superiori aggettanti. Perforazione ed installazione di barre d'acciaio DYWIDAG 1050 Ø26,5 mm cementate con CEM II/A-LL 42,5 R, piastre in acciaio 200*200*10 mm e dado conico scanalato chiuso con calotta plastica protettiva - 52 barre L = 3000mm. Installazione di rete in filo d'acciaio ad alte prestazioni aderenti a maglia romboidale - 4 moduli 4*h15 m. Installazione di funi d'acciaio diagonali Ø12 mm disposti a serpentina. Installazione di fune d'acciaio perimetrale Ø16 mm disposto a serpentina.
Zona 3 Zona 4	Disgaggio chimico e meccanico della porzione instabile. Perforazione ed installazione di barre d'acciaio DYWIDAG 1050 Ø26,5 mm cementate con CEM II/A-LL 42,5 R, piastre in acciaio 200*200*10 mm e dado conico scanalato chiuso con calotta plastica protettiva - 15 barre L = 3000mm e 20 barre L = 4500mm. Installazione di rete in filo d'acciaio ad alte prestazioni aderenti a maglia romboidale - 2 moduli 4*h10 m e 2 moduli 4*h5 m. Installazione di funi d'acciaio diagonali Ø12 mm disposti a serpentina. Installazione di fune d'acciaio perimetrale Ø16 mm disposto a serpentina.

Figura 42: Legenda esplicativa delle zone e delle tipologie di intervento

#### 6.1.2.1 Intervento 1: Ispezione e pulizia della parete rocciosa

L'intervento di pulizia ha previsto la rimozione della vegetazione ed il disgaggio delle porzioni instabili per mezzo di piccole attrezzature meccaniche manuali. In fase preliminare e in corso d'opera è stata effettuata un'accurata ispezione con l'obiettivo principale di:

- verificare il contesto ai fini dell'applicabilità degli interventi di progetto;
- rilevare eventuali condizioni impreviste al momento del progetto;
- definire le soluzioni di ottimizzazione per la messa in opera degli interventi di progetto, degli apprestamenti di cantiere e delle misure di sicurezza a seguito degli approfondimenti fatti dalla Direzione dei Lavori.

#### 6.1.2.2 Intervento 2: Demolizione di porzioni rocciose in precarie condizioni di stabilità

La demolizione (disgaggio) di porzioni rocciose in precarie condizioni di stabilità è stata effettuata per un blocco di dimensioni medio-grandi, nella zona 4, e per creste aggettanti, nelle altre zone. La demolizione dell'ammasso roccioso, soprattutto nella zona 4, è stata effettuata per via chimica e completata per via meccanica.

Nella demolizione chimica si è proceduto a realizzare una serie di fori tramite perforatrice di ridotte dimensioni, ad inserire le miscele espansive nelle perforazioni preliminarmente eseguite e nelle

fessure presenti allo scopo di aumentare, in maniera controllata, lo stato di fratturazione fino a completa rottura, dislocazione e distacco.

Successivamente si è proceduto a sagomare la porzione di roccia con leve e martelli demolitori portatili.

Il volume di roccia demolito con entrambe le metodologie, nella zona 3 e 4, è stato di circa 25 m<sup>3</sup> di cui 20 m<sup>3</sup> ascrivibili alla massa instabile principale e 5 m<sup>3</sup> alle creste presenti sul ciglio di valle delle due aree.

In corso d'opera si è previsto un approfondimento di indagine del quadro fessurativo per definire le zone da disaggiare.

Per le porzioni aggettanti della zona 2, i volumi di demolizione sono risultati minori rispetto alle zone 3-4; il totale di roccia disaggiata è stato pari a circa 8 m<sup>3</sup>.



Figura 43: zona 1-2: Creste aggettanti zona 1-2 ante opera



Figura 45: Creste aggettanti post opera

### 6.1.2.3 Intervento 3: Rafforzamento e protezione della parete rocciosa mediante chiodature con barre metalliche, reti e funi in acciaio

L'intervento 3 è consistito nell'applicazione delle misure di rafforzamento e protezione della porzione di parete rocciosa interessata dagli interventi 1 e 2, mediante chiodature con barre metalliche, reti e funi in acciaio. L'intervento si prefigge i seguenti scopi principali:

- le chiodature consentono di aumentare la resistenza media dell'ammasso roccioso nella porzione superficiale, per effetto della ricucitura delle fessure principali e del parziale intasamento delle stesse indotto dalle iniezioni cementizie;
- le funi e la rete metallica consentono un confinamento superficiale della parete ed una protezione passiva dalla caduta dei massi.

Le fasi esecutive si sono susseguite come di seguito indicato:

- perforazioni ed installazione delle barre metalliche di chiodatura tipo Dywidag Ø 26.5, di lunghezza 3.0 m (intervento zona 1, 2, 3 e 4) e 4.5 m (intervento zona 3 e 4), legate con miscele cementizie, con disposizione a maglia rombica, con densità di almeno 1 barra ogni 6mq. La geometria dei chiodi, come rappresentato negli elaborati grafici, ha previsto uno schema di una maglia 3 m x 2 m, nelle zone 1-2; nelle zone 3-4 la densità delle barre è stata di circa 1 barra ogni 3,5 mq, dovendo adeguare la geometria alla morfologia non regolare della parete rocciosa.
- Messa in opera delle reti metalliche aderenti e delle funi metalliche Ø 12 mm diagonali; in zona 1 e 2 sono stati installati 4 pannelli di rete in filo d'acciaio ad alta resistenza DELTAX G82/2 STAINLESS della GEOBRUGG di dimensione 4 mx15 m, per un totale di 240 mq. Nella zona 3 la rete ha dimensioni 8 m x 5 m, mentre nella zona 4 ha dimensioni 8 m x 10 m, per un totale di 120 mq.
- Fissaggio superiore e inferiore e perimetrale delle reti per mezzo di funi metalliche Ø 16. Le funi sono state direttamente ancorate alle barre di chiodatura; per quanto riguarda le funi diagonali si precisa che le stesse sono state bloccate al di sotto delle piastre di contrasto delle barre di chiodatura, successivamente bullonate e serrate.
- Serraggio dei bulloni sulla testa dei chiodi;
- Messa in opera di calotte di protezione in materiale plastico sulla testata delle barre di ancoraggio, per garantire la durabilità dell'intervento, tenuto conto delle particolari condizioni ambientali del sito.

Per l'efficacia dell'intervento le reti e le funi sono state installate in aderenza alla parete rocciosa. Il sistema è, infatti, sufficientemente flessibile per adattarsi a morfologie non piane.

## **7 Indicazione del Livello di Rischio Sismico dell'Opera ai sensi del R.R.n.26/2020 – Allegato C – Regione Lazio.**

Ai consolidamenti in progetto è stata attribuita la classe d'uso III con riferimento alle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni DM 17 gennaio 2018. Il Livello di Rischio Sismico dell'Opera, vista la classificazione sismica del Comune di Ventotene "in zona sismica 3b" NUOVA CLASSIFICAZIONE SISMICA DELLA REGIONE LAZIO - DELIBERA DI GIUNTA REGIONALE n. 387 del 22.05.2009 (BUR Lazio n. 24 del 27.06.2009 - Supplemento Ordinario 106) e s.m.i., in accordo con il Regolamento 26 ottobre 2020 n. 26, secondo la matrice dell'Allegato C risulterebbe, vista la classe d'uso III, di livello "Medio"

		PERICOLOSITA'				
		Zona Sismica				
PROGETTI		1	2a	2b	3a	3b
classi d'uso I e II		MEDIO	MEDIO	MEDIO	BASSO	BASSO
→ classe d'uso III		ALTO	ALTO	MEDIO	MEDIO	MEDIO
classe d'uso IV		ALTO	ALTO	ALTO	MEDIO	MEDIO

Per il livello di Vulnerabilità dell'Opera Medio il R.R. fornisce un elenco di indagini e prove minime; nel caso in questione, come si chiarirà più avanti, si ricade nella casista "Su roccia affiorante o sepolte o con substrato roccioso entro i primi 3 mt di profondità dovranno eseguirsi":

- Almeno 1 Prova Penetrometrica Statica (CPT, CPTE, CPTU), dinamica (DPSH) o dilatometrica DMT, che attraversino i terreni di copertura, coesivi e granulari, nel caso di ammassi rocciosi sepolti.; *(non si rientra in questa casistica)*
- Almeno 1 prova geofisica in sito attive (MASW, SASW, MFT, FTAN, ecc.) o passive (REMI, SPAC, ESAC, f-k), MAAM, ecc.) possibilmente perpendicolari tra di loro per la definizione del profilo di velocità dell'onda S;
- Analisi delle Risposta Sismica Locale, per tutte le classi d'uso III o IV come previsto dalla DGR 493/19 ed in tutti i casi in cui (es. inversione di velocità, bruschi passaggi di rigidità, ecc.) il sottosuolo non è classificabile nelle categorie di cui alla Tabella 3.2.II delle NTC'18, eseguita tramite: codice di calcolo 1D unicamente per sottosuoli costituiti da strati orizzontali continui e superficie topografica piana; codice di calcolo 2D da eseguire per sottosuoli non costituiti da strati orizzontali continui e superficie topografica non pianeggiante;

Per ottemperare a quanto richiesto dalle normative ed in ragione delle necessità progettuali è stata eseguita una campagna di indagini geognostiche come meglio esposta nel paragrafo successivo. In merito alle richieste del R.R. è necessario chiarire quanto segue:

per la parte a mare, le indagini sono state effettuate a mare tramite motopontone ed i sondaggi sono stati realizzati sul fondale marino con notevoli difficoltà legate alla stabilità del pontone; è stata eseguita una campagna geofisica marina mediante indagini di tipo subbottom profiler, multibeam e side scan sonar, per ottenere dati sulla stratigrafia, morfologia e batimetria dei fondali; a terra sono state eseguite n.3 indagini geofisiche di tipo M.A.S.W. di cui una sull'approdo presente in località Marinella e due in corrispondenza dell'ex carcere; sul sito è stato eseguito un rilievo geomeccanico per la verifica di stabilità della falesia suddiviso su tre stazioni. Inoltre, è stato effettuato un rilievo geomeccanico integrativo tramite drone e laser scanner che ha consentito un ulteriore approfondimento della caratterizzazione geotecnica mediante il valore GSI (Geological Strength Index) Cai et al. (2007) nonché l'acquisizione dei parametri JRC (da rilievo classico). Inoltre, la delibera n.493 del 23 luglio 2019 *"Modifica deliberazione di Giunta regionale 22 maggio 2009 n. 387 concernente "Nuova classificazione sismica del territorio della Regione Lazio in applicazione dell'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3519 del 28 aprile 2006 e della DGR Lazio 766/03", come modificata dalla deliberazione di Giunta regionale 17 ottobre 2012, n. 489"* al punto 3. stabilisce *"di prevedere la possibilità di avviare allo studio di RSL per le opere di Classe d'uso III, eccetto le Strutture per l'Istruzione, laddove dalle indagini di cui all'Allegato C del regolamento regionale n. 14/2016 scaturiscano indicazioni tecniche evidenti e inconfutabili dell'appartenenza del sottosuolo a una delle Categorie di sottosuolo di fondazione indicate nella Tabella 3.2.II del DM. 17.01.2018, utilizzando in questi casi l'approccio semplificato previsto dallo stesso DM"*. Nel caso in esame è stato possibile associare una classe di suolo ai fini sismici semplificata. Trovandoci su roccia affiorante ed avendo a disposizione il profilo di Vs di un'indagine M.A.S.W. eseguita sulla roccia lavica si può evincere che la classe di suolo di fondazione può essere cautelativamente considerata **B**.

## 7.1 Classificazione sismica

Secondo la classificazione sismica della Regione Lazio DGR\_387\_22\_05\_2009 il Comune di Ventotene è classificato in zona 3b.

Per le NTC18 il reticolo per il calcolo dei parametri che definiscono l'azione sismica di progetto, quindi l'accelerazione massima  $a_g$  nel periodo di ritorno considerato, hanno parametri univoci che non variano per coordinate (Allegato B NTC). Di seguito si mostra la tabella valida per le isole italiane:

TABELLA 2: Valori di  $a_g$ ,  $F_o$ ,  $T_C$  per le isole, con l'esclusione della Sicilia, Ischia, Procida e Capri.

Isole	$T_R=30$			$T_R=50$			$T_R=72$			$T_R=101$			$T_R=140$			$T_R=201$			$T_R=475$			$T_R=975$			$T_R=2475$		
	$a_g$	$F_o$	$T_C$	$a_g$	$F_o$	$T_C$	$a_g$	$F_o$	$T_C$	$a_g$	$F_o$	$T_C$	$a_g$	$F_o$	$T_C$	$a_g$	$F_o$	$T_C$	$a_g$	$F_o$	$T_C$	$a_g$	$F_o$	$T_C$	$a_g$	$F_o$	$T_C$
Arcipelago Toscano, Isole Egadi, Pantelleria, Sardegna, Lampedusa, Linosa, Ponza, Palmarola, Zannone	0,186	2,61	0,273	0,235	2,67	0,296	0,274	2,70	0,303	0,314	2,73	0,307	0,351	2,78	0,313	0,393	2,82	0,322	0,500	2,88	0,340	0,603	2,98	0,372	0,747	3,09	0,401
Ventotene, Santo Stefano	0,239	2,61	0,245	0,303	2,61	0,272	0,347	2,61	0,298	0,389	2,66	0,326	0,430	2,69	0,366	0,481	2,71	0,401	0,600	2,92	0,476	0,707	3,07	0,517	0,852	3,27	0,564
Ustica, Tremiti	0,472	2,50	0,400	0,558	2,50	0,400	0,661	2,50	0,400	0,776	2,50	0,400	0,901	2,50	0,400	1,056	2,50	0,400	1,500	2,50	0,400	2,000	2,50	0,400	2,725	2,50	0,400
Alicudi, Filicudi,	0,350	2,70	0,400	0,558	2,70	0,400	0,807	2,70	0,400	1,020	2,70	0,400	1,214	2,70	0,400	1,460	2,70	0,400	2,471	2,70	0,400	3,212	2,70	0,400	4,077	2,70	0,400
Panarea, Stromboli, Lipari, Vulcano, Salina	0,618	2,45	0,287	0,817	2,48	0,290	0,983	2,51	0,294	1,166	2,52	0,290	1,354	2,56	0,290	1,580	2,56	0,292	2,200	2,58	0,306	2,823	2,65	0,316	3,746	2,76	0,324

Seppur classificata con rischio sismico basso, è importante segnalare che in uno studio sui "MATERIALI PER UN CATALOGO DEI TERREMOTI ITALIANI: REVISIONE DELLA SISMICITÀ MINORE DEL TERRITORIO NAZIONALE" D. Molin<sup>1</sup>, F. Bernardini<sup>2</sup>, R. Camassi<sup>2</sup>, C. H. Caracciolo<sup>2</sup>, V. Castelli<sup>2</sup>, E. Ercolani<sup>2</sup>, L. Postpischl del 1 Dipartimento della Protezione Civile - Roma - 2 Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - Sezione di Bologna, in merito alla sismicità storica di Ventotene, Mercalli (1893) riporta integralmente, stralciandola dal "manoscritto Ranieri continuato da Ferdinando Patalano, una breve nota datata "Ventotene, 12 luglio 1848", nella quale vengono descritti gli effetti del terremoto nell'isola; sulla base delle informazioni contenute in questo documento sono state compilate tab. 1 ed app. A. Trasformando l'ora in cui si è avvertita la scossa in Ventotene dal sistema all'italiana a quello attuale si ottengono le ore ore 23 (GMT) circa.

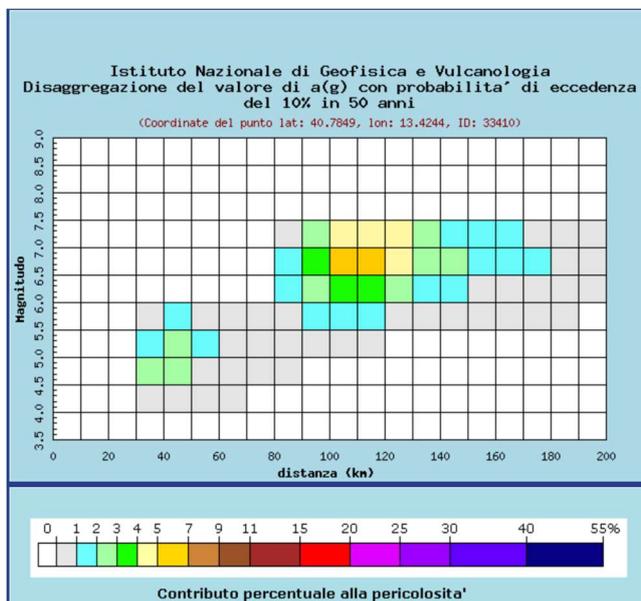
La nota è la seguente:

*"1848 – Luglio 5, verso le 5 ital. – Scossa fortissima in Ventotene, che svegliò tutti e lesionò le case. ... Il ms. Ranieri, continuato da Ferdinando Patalano racconta questo terremoto di Ventotene nei seguenti termini: ... mentre eravamo tutti nel più profondo sonno, fece una tremenda scossa di terremoto, che fece risvegliare tutti gli abitanti di quest'isola ... Tutte le fabbriche furono lesionate non escluso il castello della piazza; ma sia gloria a Dio e a S. Candida nostra che nessuno pericolò della vita. ..."*

Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani - Database Macrosismico Italiano					
Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia					
Data	1848	luglio	05	23	
Area epicentrale	Isola di Ventotene				
EqID	18480705	2300	000		

Studio di provenienza MDP	Molin et al., 2008					
Numero di MDP	2					
Massima intensità	7 MCS					
CPTI15	4.63 ± 0.46 [40.797, 13.431] lo 6					
Macro	4.63 ± 0.46 [40.797, 13.431] lo 6					
<b>PlaceID</b>	<b>Place name</b>	<b>Sc</b>	<b>Lat</b>	<b>Lon</b>	<b>Int</b>	<b>Country</b>
IT_54748	Ventotene	MS	40,797	13,431	7	IT
IT_54623	Ponza		40,892	12,965	4-5	IT

È stato inoltre eseguito, tramite il sito dell'Istituto di Geofisica e Vulcanologia <http://esse1gis.mi.ingv.it/>, uno studio di disaggregazione sismica. Lo studio ha confermato la bassa sismicità dell'area, tenendo conto del parametro di scuotimento in termini di ag, probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni. Di seguito si mostrano i grafici e le tabelle del risultato.



Distanza in km	Disaggregazione del valore di a(g) con probabilita' di eccedenza del 10% in 50 anni (Coordinate del punto lat: 40.7849, lon: 13.4244, ID: 33410)										
	Magnitudo										
	3,5-4,0	4,0-4,5	4,5-5,0	5,0-5,5	5,5-6,0	6,0-6,5	6,5-7,0	7,0-7,5	7,5-8,0	8,0-8,5	8,5-9,0
0-10	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
10-20	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
20-30	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
30-40	0.000	0.769	2.110	1.880	0.979	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
40-50	0.000	0.600	2.120	2.310	1.380	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
50-60	0.000	0.115	0.834	1.200	0.823	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
60-70	0.000	0.001	0.238	0.565	0.453	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
70-80	0.000	0.000	0.046	0.281	0.251	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
80-90	0.000	0.000	0.005	0.442	0.861	1.040	1.120	0.698	0.000	0.000	0.000
90-100	0.000	0.000	0.000	0.468	1.790	2.950	3.740	2.690	0.000	0.000	0.000
100-110	0.000	0.000	0.000	0.205	1.720	3.580	5.290	4.290	0.000	0.000	0.000
110-120	0.000	0.000	0.000	0.038	1.240	3.240	5.320	4.640	0.000	0.000	0.000
120-130	0.000	0.000	0.000	0.000	0.779	2.730	4.910	4.520	0.000	0.000	0.000
130-140	0.000	0.000	0.000	0.000	0.337	1.580	2.930	2.610	0.000	0.000	0.000
140-150	0.000	0.000	0.000	0.000	0.150	1.080	2.150	1.890	0.000	0.000	0.000
150-160	0.000	0.000	0.000	0.000	0.062	0.762	1.660	1.410	0.000	0.000	0.000
160-170	0.000	0.000	0.000	0.000	0.020	0.536	1.330	1.090	0.000	0.000	0.000
170-180	0.000	0.000	0.000	0.000	0.006	0.348	1.020	0.843	0.000	0.000	0.000
180-190	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.209	0.764	0.651	0.000	0.000	0.000
190-200	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.125	0.608	0.557	0.000	0.000	0.000

Valori medi		
Magnitudo	Distanza	Epsilon
6.420	109.000	1.710

Si può notare come la ricerca di coppie Magnitudo-Distanza Epicentrale in grado di generare un'eccedenza del 10% di ag in 50 anni mostri una distanza media pari a 109 km dall'ipotetica sorgente sismogenetica ed una magnitudo media di 6,4. Inoltre, si nota anche la forte dispersione del contributo percentuale che ogni coppia di dati mostra.

## 7.2 Indagini geofisiche per la definizione della classe di suolo di fondazione ai fini del calcolo dell'amplificazione sismica ed indagini geofisiche a mare

Ai sensi del paragrafo 3.2.2 CATEGORIE DI SOTTOSUOLO E CONDIZIONI TOPOGRAFICHE delle NTC18, per definire la categoria di sottosuolo ai fini del calcolo dell'amplificazione sismica così come definita in tabella Tab. 3.2.II – Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato, sono state eseguite n.3 prospezioni sismiche di tipo M.A.S.W. (Multichannel Analysis of Surface Waves). Le stesa sismiche, come indicato nella planimetria ubicazione indagini 2017E037INV-02-D-GE-IND001, sono state eseguite, in funzione dello spazio disponibile, sull'approdo Marinella (MASW1) parallelamente alla linea di costa e in corrispondenza dell'ex carcere (MASW2 e 3).

**Tab. 3.2.II – Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato**

<b>Categoria</b>	<b>Caratteristiche della superficie topografica</b>
<b>A</b>	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.</i>
<b>B</b>	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.</i>
<b>C</b>	<i>Depositi di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.</i>
<b>D</b>	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.</i>
<b>E</b>	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i>

Dalla prova M.A.S.W.1, si evince che la  $V_s$  ( $V_{seq}$ ) è pari a 594,00 m/s corrispondente ad una **classe di suolo B**. Il calcolo è stato ottenuto fissando a -5,00 m dal piano campagna il bedrock sismico ovvero dove la  $V_s$  supera 800 m/s, nel caso specifico 811 m/s. È evidente che seppur ubicata direttamente sul substrato lapideo la prova nei primi 5 m evidenzia lo strato di fratturazione ed alterazione dell'ammasso roccioso, con riferimento alla falesia.

Tutto ciò premesso anche per lo scalon.4, si consiglia l'attribuzione della **classe di suolo di tipo B** e la **categoria T2** per la configurazione topografica.

Di seguito i parametri sismici utilizzati per la progettazione:

Sito in esame.

latitudine: 40,7907060625041

longitudine: 13,4564014321457

Classe: 0

Vita nominale: 50

Parametri sismici

Categoria sottosuolo: B

Categoria topografica: T2

Periodo di riferimento: 75anni

Coefficiente  $c_u$ : 1,5

Operatività (SLO):

Probabilità di superamento: 81 %  
 Tr: 45 [anni]  
 ag: 0,029 g  
 Fo: 2,610  
 Tc\*: 0,266 [s]

Danno (SLD):

Probabilità di superamento: 63 %  
 Tr: 75 [anni]  
 ag: 0,035 g  
 Fo: 2,616  
 Tc\*: 0,301 [s]

Salvaguardia della vita (SLV):

Probabilità di superamento: 10 %  
 Tr: 712 [anni]  
 ag: 0,066 g  
 Fo: 3,004  
 Tc\*: 0,499 [s]

Prevenzione dal collasso (SLC):

Probabilità di superamento: 5 %  
 Tr: 1462 [anni]  
 ag: 0,077 g  
 Fo: 3,155  
 Tc\*: 0,537 [s]

Coefficienti Sismici Stabilità dei pendii

SLO:

Ss: 1,200  
 Cc: 1,430  
 St: 1,200  
 Kh: 0,008  
 Kv: 0,004

Amax: 0,407

Beta: 0,200

SLD:

Ss: 1,200

Cc: 1,400

St: 1,200

Kh: 0,010

Kv: 0,005

Amax: 0,497

Beta: 0,200

SLV:

Ss: 1,200

Cc: 1,260

St: 1,200

Kh: 0,019

Kv: 0,009

Amax: 0,929

Beta: 0,200

SLC:

Ss: 1,200

Cc: 1,250

St: 1,200

Kh: 0,022

Kv: 0,011

Amax: 1,083

Beta: 0,200

Le coordinate espresse in questo file sono in ED50

Coordinate WGS84

latitudine: 40.789700

longitudine: 13.455512

## 8 Campagne di indagini geognostiche.

Nel novembre del 2020, la ditta Geodes Laboratori di Bevilacqua M. Gabriella, aggiudicataria del Servizi di indagine geognostica a mare a supporto della progettazione nell'ambito del "Contratto Istituzionale di Sviluppo - Recupero e rifunzionalizzazione ex Carcere Borbonico dell'isola di Santo Stefano Ventotene" - Intervento n. 3 Realizzazione/adequamento degli approdi all'isola di Santo Stefano, ha eseguito, il piano di indagini geognostiche e geofisiche per il progetto dell'approdo (2017E037INV-02-D-GE-IND001). In particolare, per le finalità della presente relazione, Geodes ha eseguito:

1. un rilievo geomeccanico anche in prossima dello scalo n.4 (anche presso approdo Marinella).

Nel febbraio 2023 sono state eseguiti indagini integrative (codice elaborato 2017E037INV-02-D-GE-IND002). per estendere la caratterizzazione geomeccanica ad un intorno più esteso con la finalità di valutare l'estensione dei dissesti in atto; le indagini sono state eseguite da GEOAPP s.r.l. ed hanno riguardato:

2. Rilievo geomeccanico integrativo da remoto con drone e laser scanner in corrispondenza delle aree dello Scalo Marinella e Scalo n.4; rilievo geomeccanico tradizionale nelle stesse aree

## 9 Caratterizzazione geotecnica

La caratterizzazione della parte emersa dell'isola e comunque dell'ammasso roccioso costituente la falesia è stata ricavata dalle due campagne di indagini e rilievi geomeccanici eseguiti in corrispondenza dei due approdi. In particolare, nel corso della prima campagna sono state eseguite n.2 serie x 20 misure con martello di Schimdt in corrispondenza dell'approdo Marinella (stazioni di misura SG1-SG2A/B) e scalo n.4. Il risultato delle prove ed i parametri ricavati dal valore RMRb (Rock Mass Rating che verrà discusso nei prossimi paragrafi) sono di seguito mostrati:

stazione	RMRb	RMRs	RMRc	$\Phi$ (°)	Coesione (Kpa)	Deformabilità (Mpa)
SG1	63	56	38	36,5	315	26
SG2A	62	52	37	36	310	24
SG2B	61	51	36	35,5	305	22
SG3	67	60	42	38,5	335	34

Si sottolinea che i risultati sopra riportati si riferiscono alla superficie delle fratture e non all'ammasso roccioso.

Per quanto riguarda l'ammasso roccioso invece la caratterizzazione è stata ottenuta attraverso il criterio di Hoek & Brown (1981). Partendo dal valore GSI (Geological Strength Index) ottenuta nella seconda campagna e comunque in linea con in valore GSI indicato nei risultati della prima campagna di indagini, attribuendo la costante litologica  $m_i$ , il fattore di disturbo  $D$  ed avendo a disposizione i valori di compressione uniassiali tramite prove sclerometriche, è stato possibile definire i parametri medi  $c'$  e  $\phi'$  utilizzando il software ORMAS V.1.0 basato sul criterio di Hoek & Brown generalizzato ([www.roozbehgm.com/](http://www.roozbehgm.com/)); 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

Fig.46 - Attribuzione indice GSI

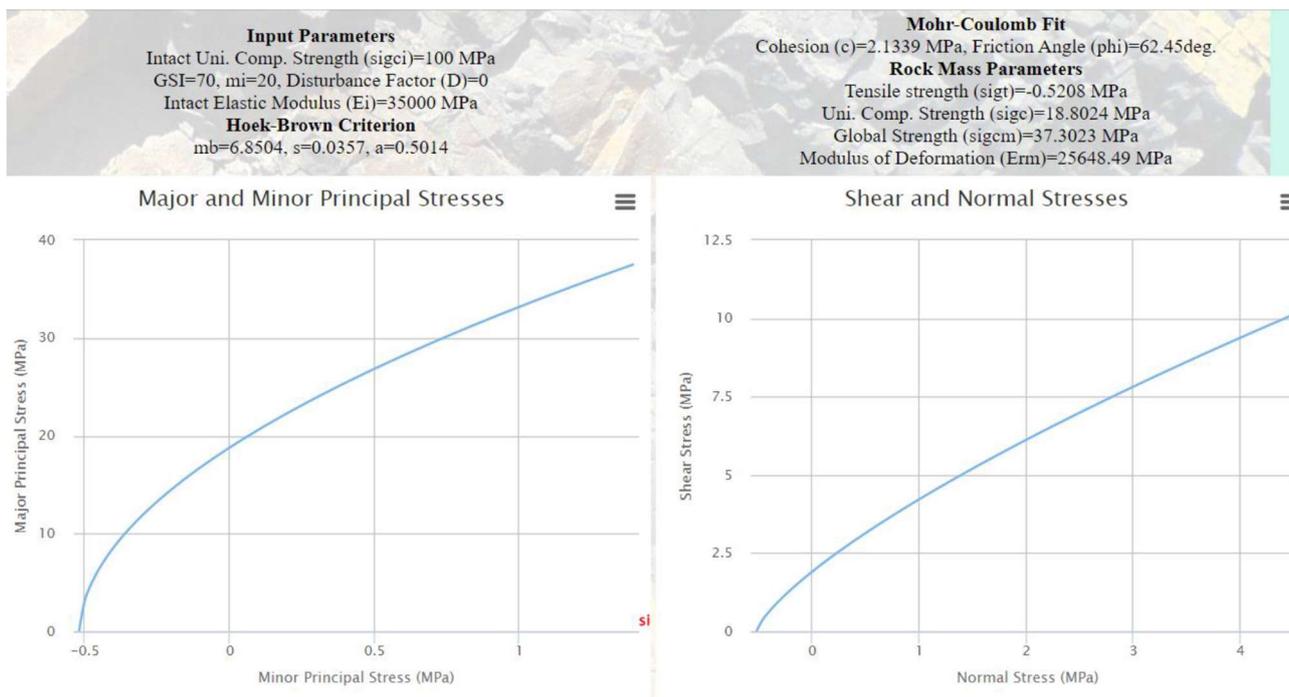


Fig. 47 - Valutazione dei parametri dell'ammasso sulla base del criterio Hoek-Brown generalizzato

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:

Parametri geomeccanici	
GSI	70
$m_i$ (roccia intatta)	20
$\sigma_c$ (roccia intatta) [MPa]	100
$m_b$	6.9
$s$	0.04
$a$	0.5
$c$ [MPa]	2.1
$\phi$	62
$\sigma_{gt}$ [MPa]	-0.52
$\sigma_{gcm}$ [MPa]	37.3
$E$ [GPa]	2.6

### *Indici di pericolosità generico (GKI) e specifico per ogni cinematismo individuato*

Per quanto riguarda i parametri geotecnici relativi alla coltre regolitica-colluviale e alle piroclastiti sovrastanti le lave e scorie dell'Unità Santo Stefano, si è fatto riferimento alla letteratura a disposizione su depositi della stessa natura ed età (tufo giallo napoletano e/o piroclastiti dell'area dei campi flegrei). Si è scelto di utilizzare i risultati relativa alla fonte "CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DI TERRENI PIROCLASTICI DI UN SITO DELLA CAMPANIA Aldo Evangelista; Marco Valerio Nicotera; Raffaele Papa; Gianfranco Urciuoli Dipartimento di Ingegneria Geotecnica, Università degli Studi di Napoli Federico II - Incontro Annuale dei Ricercatori di Geotecnica 2006 - IARG 2006 Pisa, 26 – 28 giugno 2006. Bisogna inoltre sottolineare che i risultati dello studio sopra riportato si riferiscono a materiali prevalentemente sciolti a differenza delle piroclastiti presenti sull'isola che hanno aspetto litoide, per questo è stata attribuito un valore di coesione pari a 10 Kpa. In sintesi, per le verifiche si sono utilizzati i seguenti valori:

<b>Litologia</b>	<b><math>\Phi'</math> (°)</b>	<b>C' (Kpa)</b>
*Piroclastiti (Villa Giulia)	35-38	10-20
Coltre regolitica-colluviale	24-30	5-15

\*non affioranti in zona scalo n.4

## **10 Inquadramento geomorfologico, rischio idrogeologico**

La geomorfologia dell'isola è legata ai processi vulcanici che hanno portato alla formazione dell'isola stessa. Abbiamo già detto che Santo Stefano rappresenta un cono laterale relitto dell'antico edificio del vulcano Ventotene. La forma dell'isola è circolare con la zona centrale che si presenta più o meno pianeggiante e che degrada con pendenza sempre più accentuate man mano che si procede verso mare. Le falesie sono condizionate dalla litologia di tipo lavico e si presentano subverticali. Tutto il perimetro dell'isola in corrispondenza delle falesie è cartografato dal piano stralcio per l'assetto idrogeologico a pericolo frana "Aree a Pericolo A (c. 2 art. 6 e art. 16)" EX AUTORITA' DEI BACINI REGIONALI DEL LAZIO-PIANO STRALCIO PER L'ASSETTO IDROGEOLOGICO (P.A.I.) - AREE SOTTOPOSTE A TUTELA PER DISSESTO IDROGEOLOGICO. Sono classificati a rischio R4 alcuni tratti del sentiero che conduce dall'approdo Marinella e dallo Scalo n.4 (fig.48) al carcere.

La fenomenologia del dissesto presente sulle falesie dell'isola è da identificare principalmente in crolli di cunei, caduta libera e ribaltamenti planari. Il rilievo geomeccanico integrativo, illustrato nei paragrafi successivi, ha consentito un'approfondita mappatura del pericolo in funzione di ogni singolo cinematismo individuato ed assegnando una percentuale di probabilità di accadimento.

## **AREE SOTTOPOSTE A TUTELA PER DISSESTO IDROGEOLOGICO**



Fig. 48 stralcio carta P.A.I. del rischio e pericolo frane

Vengono di seguito esposti i principali cinematismi individuati:

- Scivolamento planare;
- Ribaltamento di flessura;
- Scivolamento di cunei;
- Caduta libera;
- Ribaltamento di cunei;

### **11 Indagini integrative geomeccanico da remoto e classico (ottemperanza condizione ambientale n.6 e parere ABDAC)**

L'obiettivo delle attività svolte 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 accuratezze millimetriche

nella determinazione della posizione dei singoli punti, anche da centinaia di metri di distanza. L'elevata risoluzione spaziale (migliaia di punti al m<sup>2</sup>) 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.

Risultati indagini integrative

### 11.1 Rilievo geomeccanico tradizionale scalo Marinella

Il rilievo integrativo classico è stato effettuato su due linee di scansione denominate GM2 in corrispondenza dell'approdo di lunghezza pari a 39,5 m e GM3 in corrispondenza della seconda rampa di scale che porta al carcere di lunghezza pari a 15,4. Come per il precedente rilievo geomeccanico, sono stati rilevati i principali parametri per la definizione delle famiglie di giunti che interessano la falesia (direzione, immersione ed inclinazione, spaziatura, persistenza, rugosità, frequenza, etc...). Per i dettagli e le schede di sintesi del rilievo si rimanda all'elaborato

2017E037INV-02-D-GE-IND002.

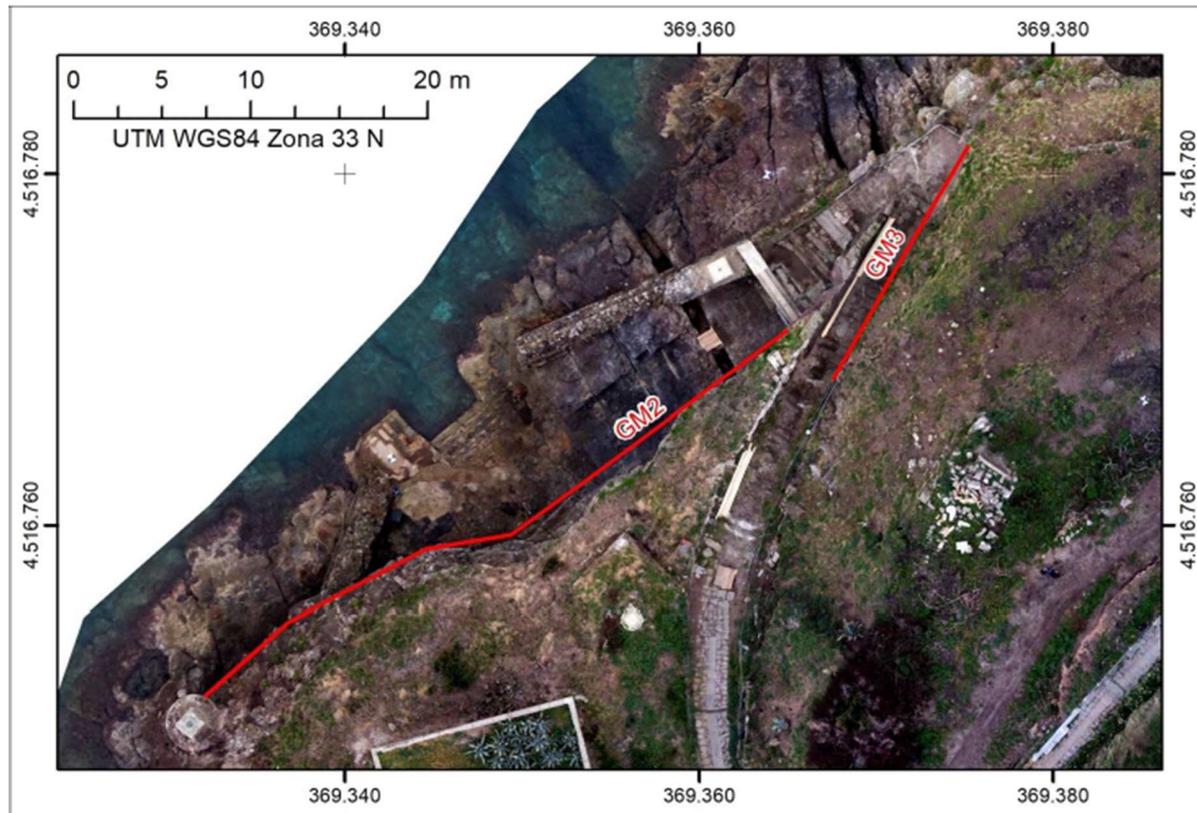


Fig.49– Ubicazione delle scan line GM2 e GM3

## 11.2 Famiglie rilevate e sintesi RMR

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 dai 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  $315^{\circ}/65$  e  $336^{\circ}/80^{\circ}$ . 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.

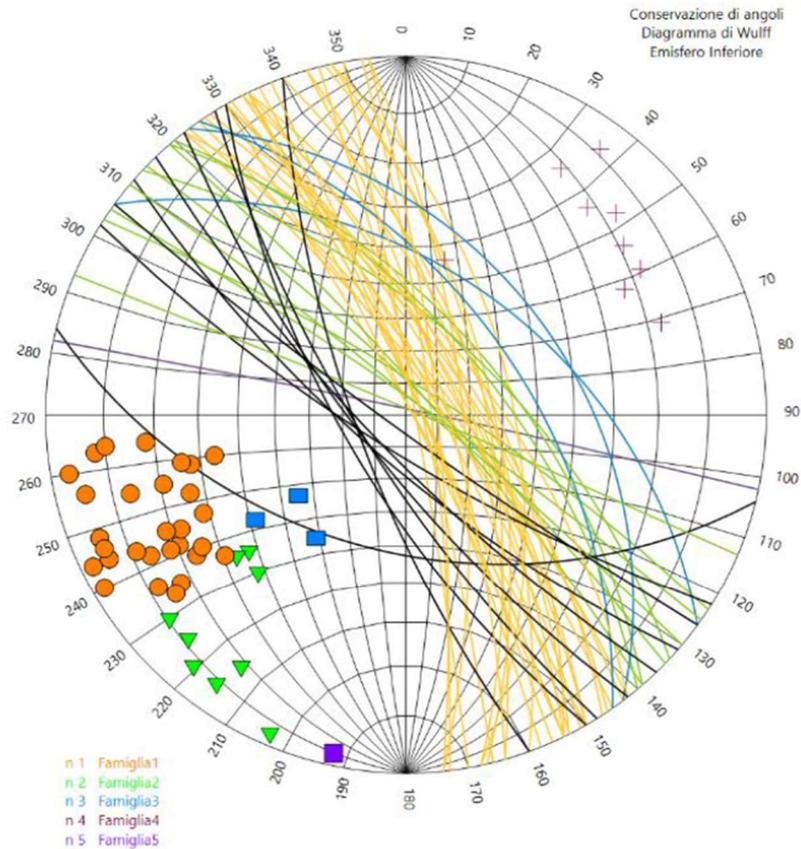


Fig.50 – Diagramma di Wulff con le tracce ciclografiche ed i poli delle discontinuità misurate alla stazione GM2

Come si osserva dai diagrammi in Figura 50, la Famiglia 1, che costituisce il gruppo di discontinuità più rappresentativo, con 31 occorrenze, assume una giacitura media di  $66^{\circ}/75^{\circ}$ ; 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  $41^{\circ}/76^{\circ}$  e  $45^{\circ}/44^{\circ}$ . Altre famiglie sono la Famiglia 4 (9 occorrenze), con giacitura media  $221^{\circ}/74^{\circ}$  e la Famiglia 5 (1 occorrenza) con giacitura  $12^{\circ}/88^{\circ}$ .

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.

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 49).

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  $303^{\circ}/85^{\circ}$ .

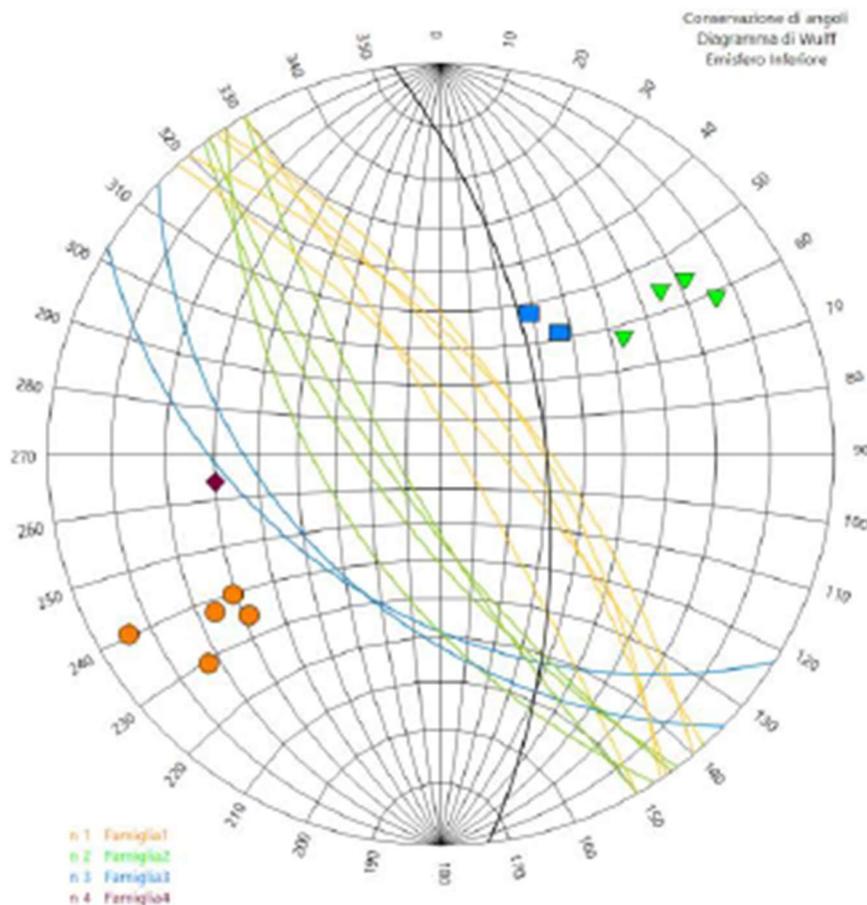


Fig.51 – Diagramma di Wulff con le tracce ciclografiche ed i poli dei piani di discontinuità misurati alla stazione GM3

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.

La Famiglia 1 risulta l'insieme di discontinuità più rappresentativo (Figura 51), 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.

L'indice Rock Mass Rating base (RMRb) ottenuto con il metodo di Bieniawski è pari a 80,8 per GM2 e 74,9 per GM3 corrispondente ad una classe II (Buona) della qualità dell'ammasso roccioso, in linea con le precedenti indagini svolte.

### 11.3 Rilievo geomeccanico da remoto scalo Marinella

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 per lo scalo Marinella ha consentito di individuare 164 superfici di discontinuità. 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 52, mentre in e Figura 53 sono riportati i poli e le relative linee

di isodensità considerando anche i piani determinati tramite il rilievo geomeccanico classico.

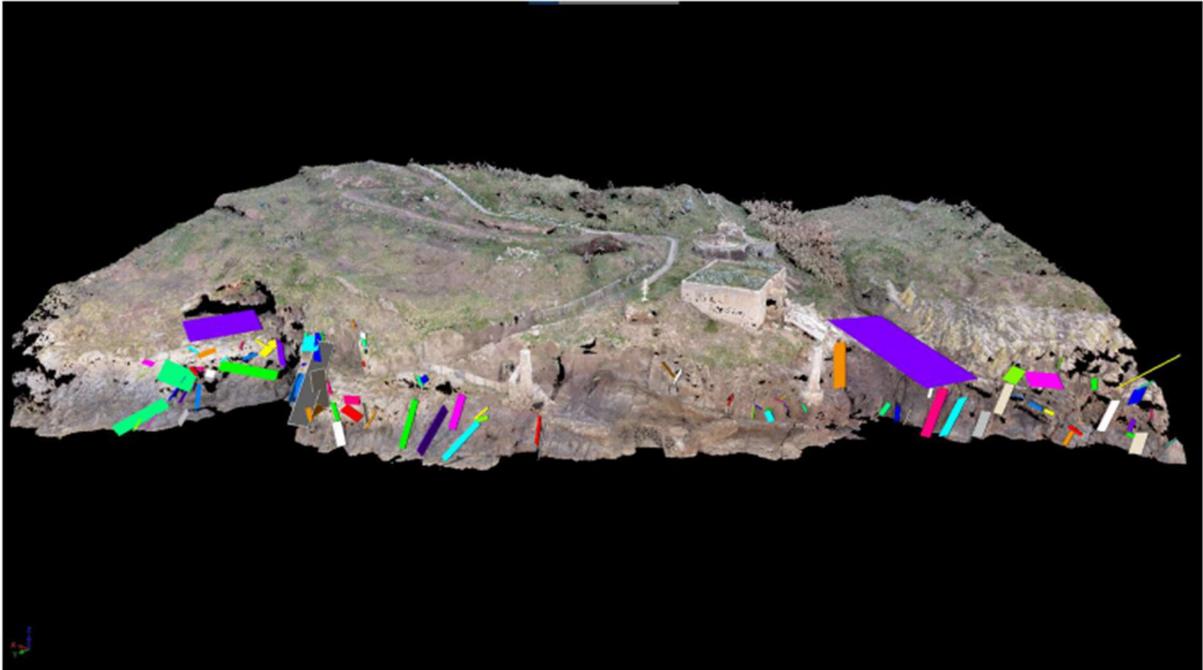


Fig.52 Estrazione dei piani di discontinuità da nuvola di punti TLS relativa allo Scalo Marinella

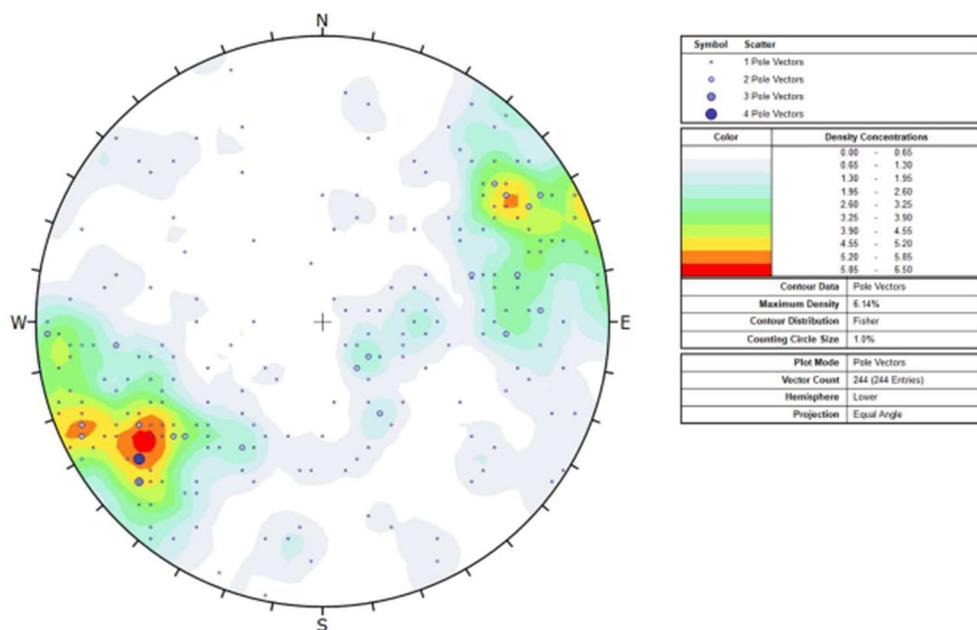


Fig.53 – Proiezione stereografica delle linee di isodensità dei poli di discontinuità relativi allo scalo Marinella

Le orientazioni dei piani modali delle famiglie individuate sono:

Scalo Marinella

JN1: 73°/340°

JN2: 86°/066°

JN3: 75°/237°

JN4: 85°/085°

JN5: 69°/262°

JN6: 27°/290°

#### 11.4 Caratterizzazione ammasso roccioso

I parametri per la caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso sono stati ottenuti attraverso il criterio di rottura empirico di Hoek & Brown (1981):

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

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

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

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 uniassiale della roccia intatta ( $\sigma_{ci}/\sigma_{ti}$ ), 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 seguente).

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	$m_i = \frac{\sigma_c}{ \sigma_t } - 0.21$

Relazioni per la valutazione della costante  $m_i$ , Davarpanahet et al. (2022)

Si dispone di valori resistenza compressione uniassiale per la roccia in sito ottenute tramite il martello di Schmidt confrontati con dati di letteratura (Hoek et al., 2002) per la valutazione della costante  $m_i$ .

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):

$$GSI = RMR' - GSI - 5$$

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

Per le analisi integrative l'indice GSI è stato valutato secondo l'approccio visivo di fig.54, come indicato da Hoek et al. (2002) sulla base delle tabelle di comparazione proposta da Marinou 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  $m_i$ , 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  $\phi'$ .

I parametri medi  $c'$  e  $\phi'$  sono stati determinati utilizzando il software ORMAS V.1.0 basato sul criterio di Hoek & Brown generalizzato ([www.roozbehgm.com/](http://www.roozbehgm.com/)) (Figura 55); i risultati sono stati ottenuti considerando per il campo tensionale quello caratteristico di affioramenti su pendii.

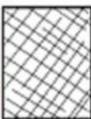
		SURFACE CONDITIONS				
		VERY GOOD	GOOD	FAIR	POOR	VERY POOR
<b>STRUCTURE</b>		DECREASING SURFACE QUALITY →				
	<b>INTACT OR MASSIVE</b> - intact rock specimens or massive in situ rock with few widely spaced discontinuities	90	80	70	N/A	N/A
	<b>BLOCKY</b> - well interlocked undisturbed rock mass consisting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

Figura 54 – Valutazione indice GSI

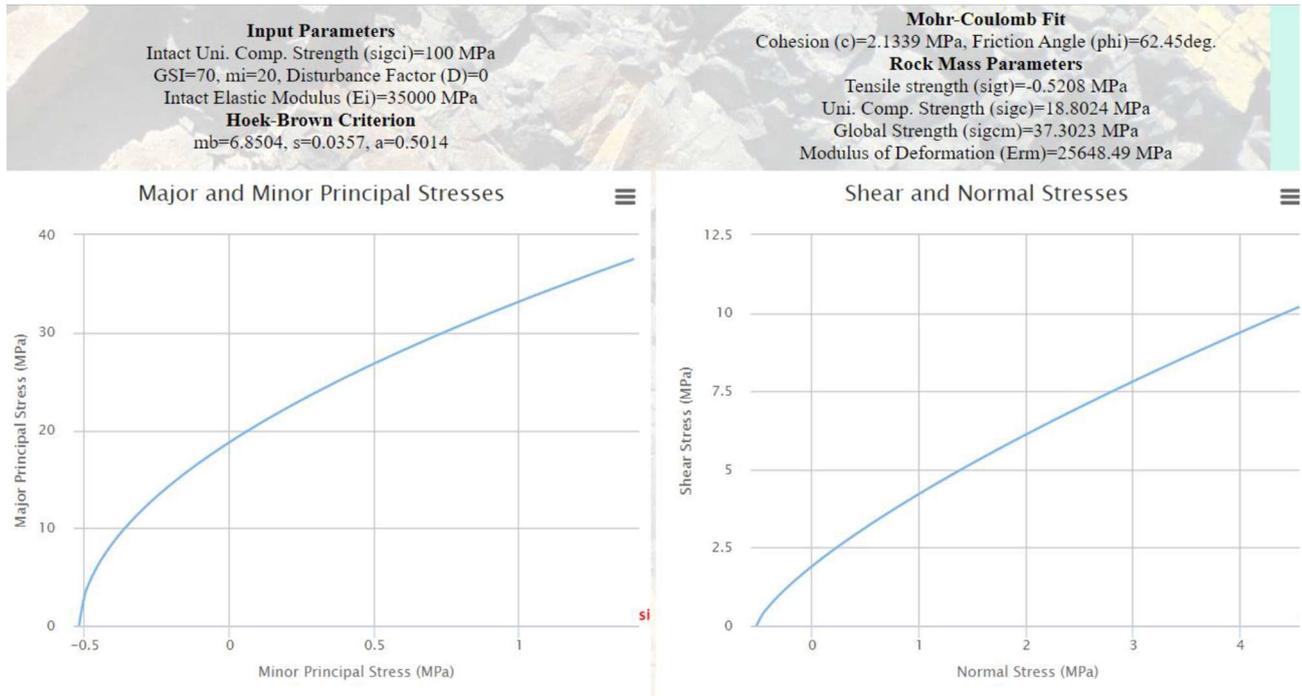


Fig.55 - Valutazione dei parametri dell'ammasso sulla base del criterio Hoek-Brown generalizzato

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 seguente):

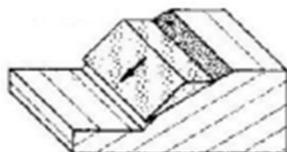
<b>Parametri geomeccanici</b>	
<b>GSI</b>	70
<b><math>m_i</math> (roccia intatta)</b>	20
<b><math>\sigma_c</math> (roccia intatta) [MPa]</b>	100
<b><math>m_b</math></b>	6.9
<b>s</b>	0.04
<b>a</b>	0.5
<b>c [MPa]</b>	2.1
<b>phi</b>	62
<b>sigt [MPa]</b>	-0.52
<b>sigcm [MPa]</b>	37.3
<b>E [GPa]</b>	2.6

### 11.5 Indici di pericolosità generico (GKI) e specifico per ogni cinematismo individuato

La propensione al dissesto dell'area è stata valutata, in un modello 3D, tramite analisi cinematica come comportamento di blocchi di roccia sotto il proprio peso e con resistenza allo scorrimento puramente attritiva lungo le superfici di discontinuità. I meccanismi di rottura più frequenti, considerati in questo tipo di analisi, sono (fig. 56):

- 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).

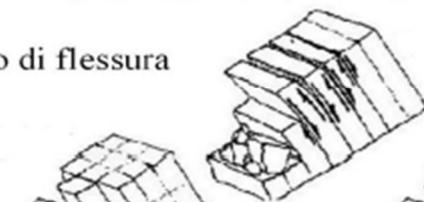
Scorrimento planare



Scorrimento di cunei



Ribaltamento di flessura



Ribaltamento diretto  
+ scivolamento



Ribaltamento diretto

Fig.56- 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<sub>pf</sub> numero dei poli delle discontinuità che soddisfano le condizioni per lo scivolamento planare;
- N<sub>wf</sub> numero dei poli delle discontinuità che soddisfano le condizioni per lo scivolamento di cunei;
- N<sub>bt</sub> numero dei poli delle discontinuità che soddisfano le condizioni per il ribaltamento diretto;
- I<sub>bt</sub> numero delle linee di intersezione che soddisfano le condizioni per il ribaltamento diretto;
- I<sub>ft</sub> 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<sub>pf</sub> =  $N_{pf}/N$  (%) per scivolamento planare;
- S<sub>wf</sub> =  $I_{wf}/I$  (%) per scivolamento di cunei;
- S<sub>btf</sub> =  $N_{btf}/N \times I_{btf}/I$  (%) 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  $S_{wfff} = I_{wfff}/I$

-  $GKI = 1 - (1 - S_{pff} - N_{fff} - S_{ftf})(1 - S_{wf} - I_{fff})(1 - S_{btf})$

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 57, Figura 58, Figura 59, Figura 60 e Figura 61 vengono mostrate delle illustrazioni schematiche che descrivono i diversi meccanismi di instabilità e la loro analisi cinematica su proiezione stereografica.

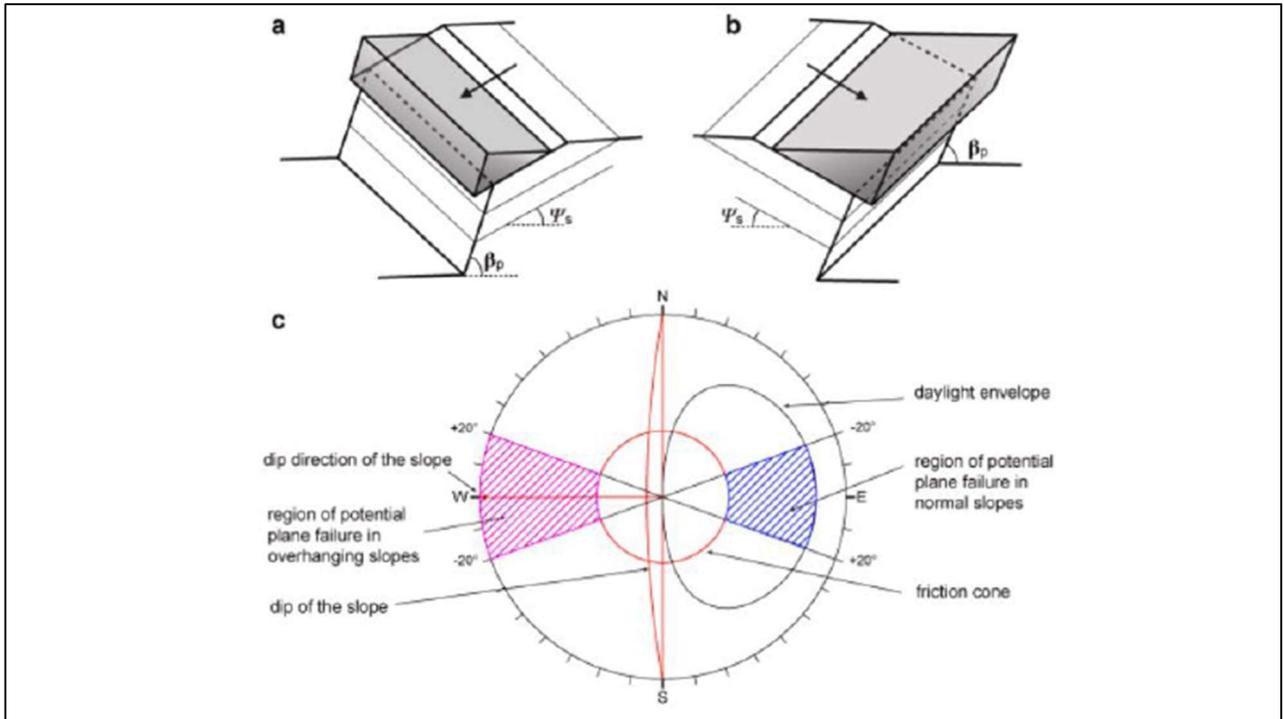


Fig.57- illustrazione schematica del meccanismo di scivolamento planare per versanti normali (a) e versanti in aggetto (b) e relativa analisi cinematica su proiezione stereografica (c) (Gigli et al., 2022)

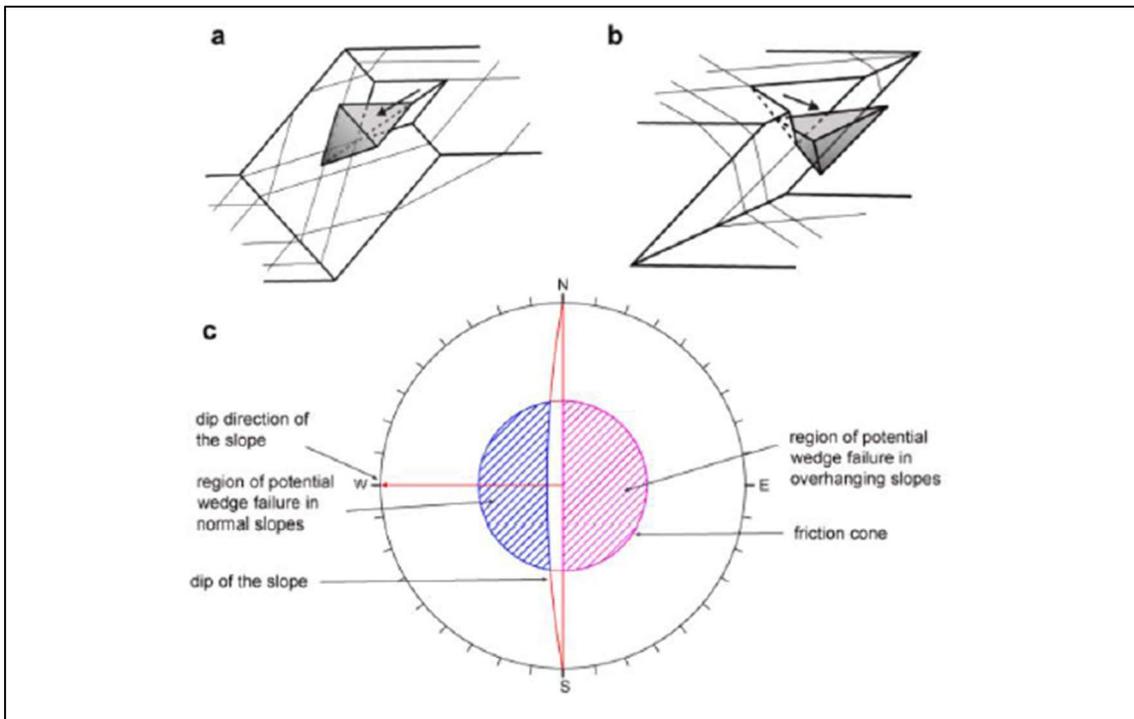


Fig.58- illustrazione schematica del meccanismo di scivolamento di cunei per versanti normali (a) e versanti in aggetto (b) e relativa analisi cinematica su proiezione stereografica (c) (Gigli et al., 2022)

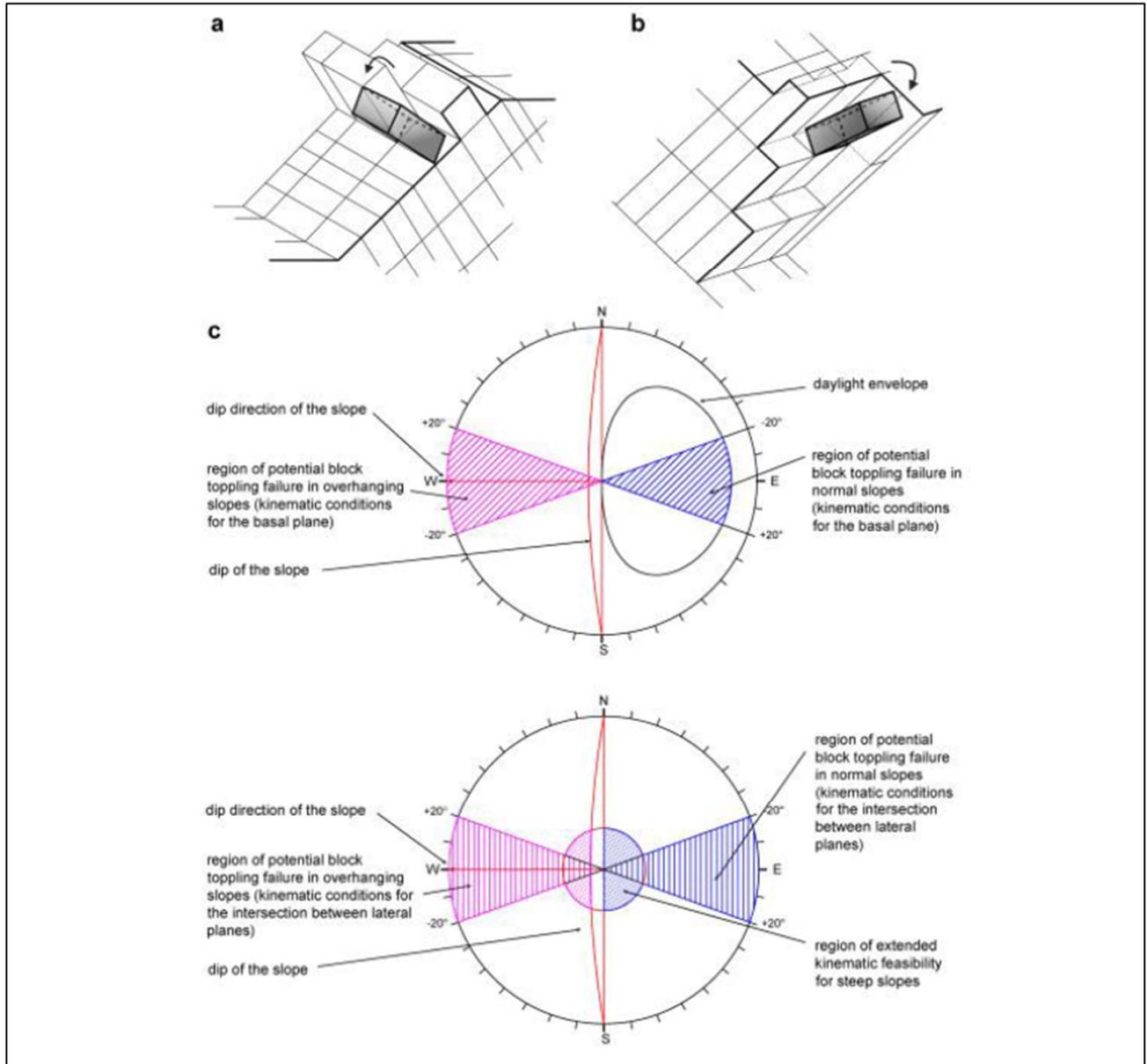


Fig. 59 illustrazione schematica del meccanismo di ribaltamento di blocchi per versanti normali (a) e versanti in aggetto (b) e relativa analisi cinematica su proiezione stereografica (c) (Gigli et al., 2022)

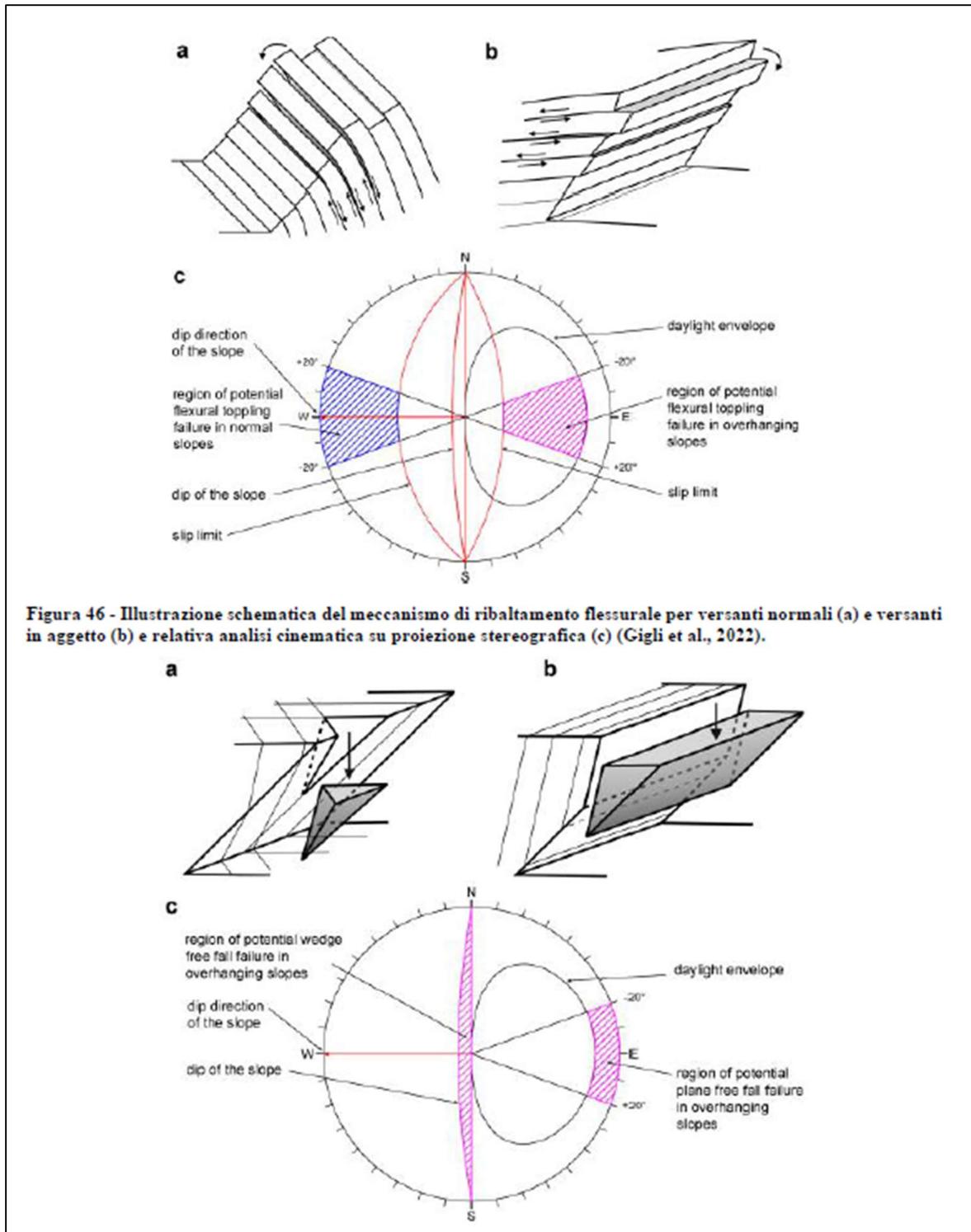


Figura 46 - Illustrazione schematica del meccanismo di ribaltamento flessurale per versanti normali (a) e versanti in aggetto (b) e relativa analisi cinematica su proiezione stereografica (c) (Gigli et al., 2022).

Fig. 60 illustrazione schematica del meccanismo di scivolamento di ribaltamento flessurale per versanti normali (a) e versanti in aggetto (b) e relativa analisi cinematica su proiezione stereografica (c) (Gigli et al., 2022) e in basso, illustrazione schematica del meccanismo di caduta libero di cuneo per versanti normali (a) e versanti in aggetto (b) e relativa analisi cinematica su proiezione stereografica (c) (Gigli et al., 2022)

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  $\phi_b$  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  $33^\circ$  (ottenuto cautelativamente da valori di letteratura e confrontato con le correlazioni ottenute dalla prova con martello di Schmidt), come valori di JRC0 i valori più bassi tra quelli medi di ogni singola famiglia di discontinuità e come lunghezza media significativa  $L_n = 2m$  (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  $39^\circ$ .

Il modello 3D su cui sono state effettuate le analisi è un 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. 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 sui suddetti 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 61).

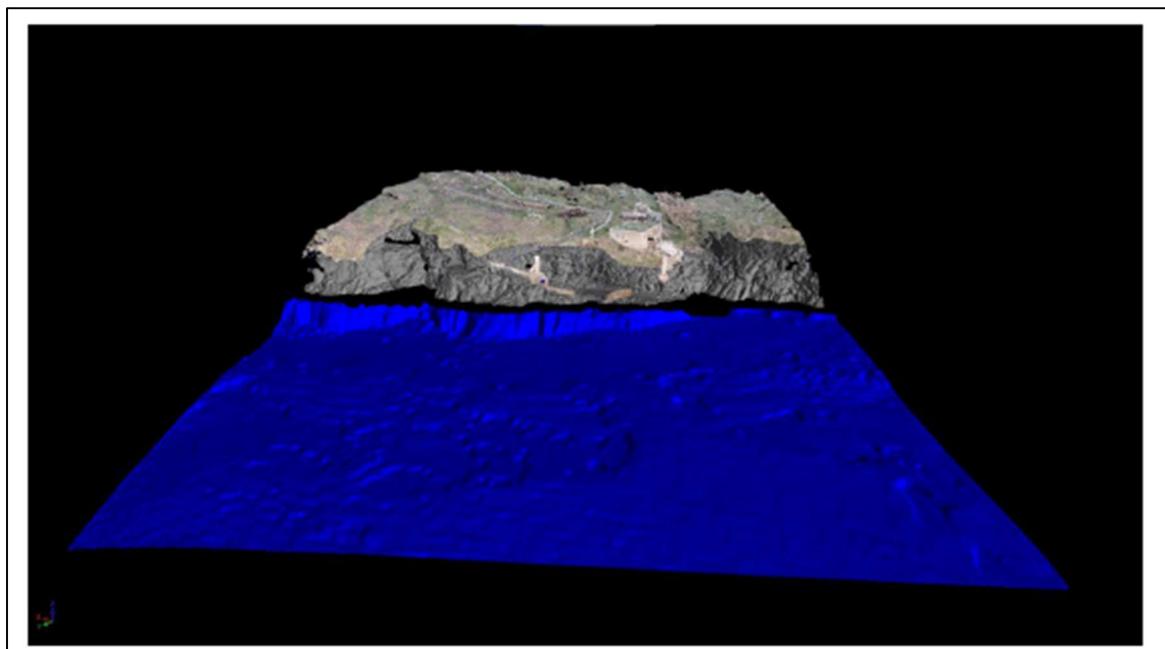


Fig. 61 Mesh di partenza, in grigio modello 3D della parte emersa in blu di quella sommersa (scalo Marinella)

I valori statistici relativi all'approdo Marinella sono sintetizzati in tabella:

		PF (%)	WF (%)	BT (%)	FF (%)	FT (%)	GKI (%)
<b>Molo Marinella</b>	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

Valori massimi, medi e deviazione standard degli indici di instabilità cinematica per lo scalo Marinella

Dalle figure seguenti e dai valori sopra esposti 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 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 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.

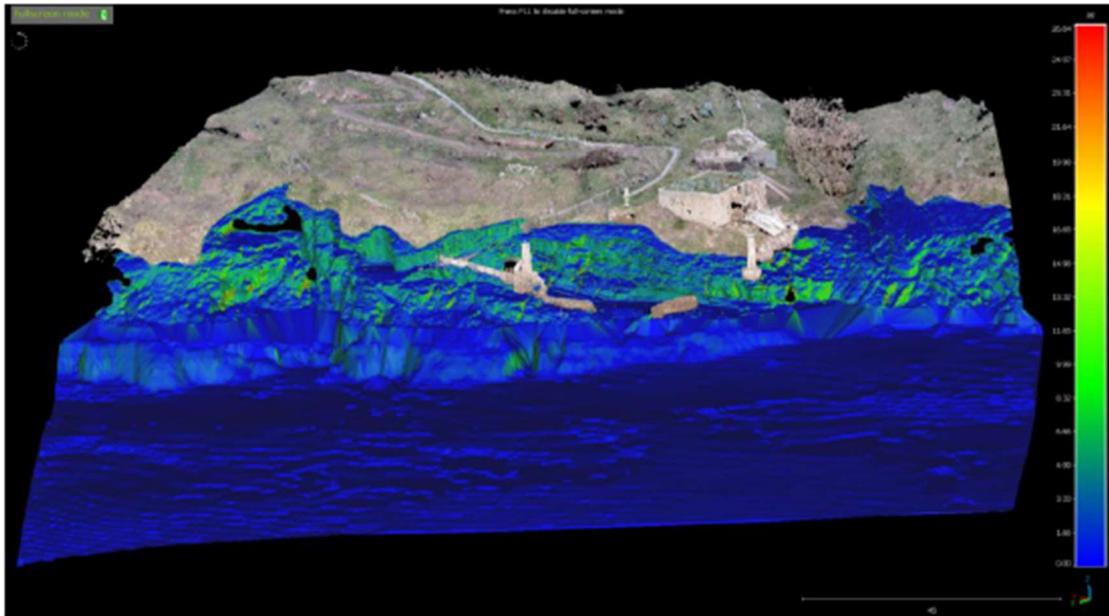


Fig.62 – Mappa dell'indice di pericolosità cinematica per il meccanismo di scivolamento planare (approdo Marinella)

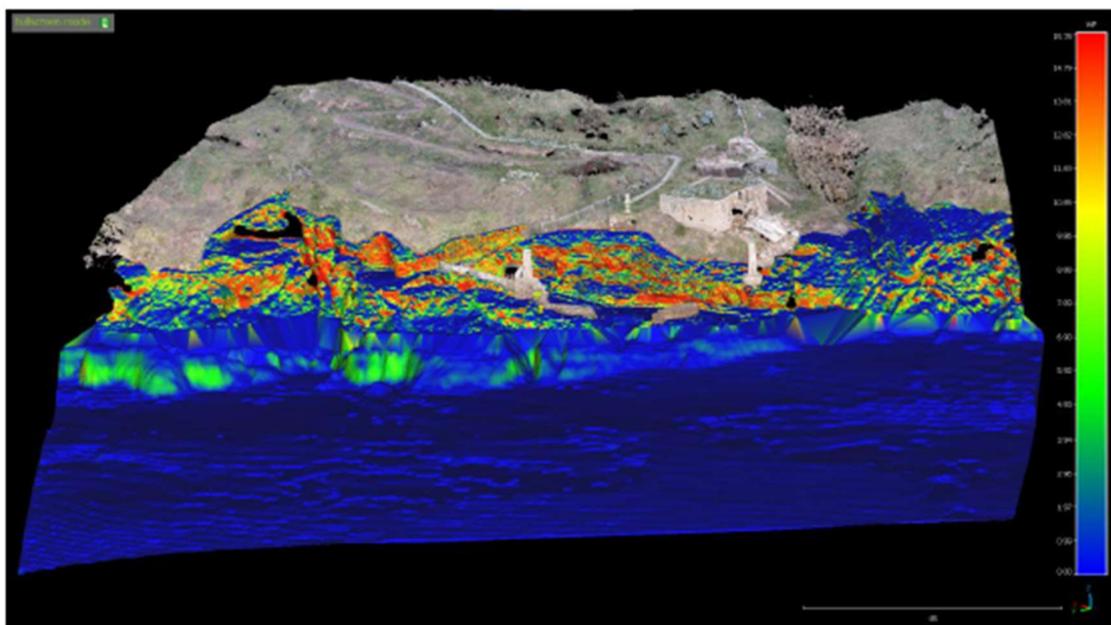


Fig.63 – Mappa dell'indice di pericolosità cinematica per il meccanismo di scivolamento cunei (approdo Marinella)

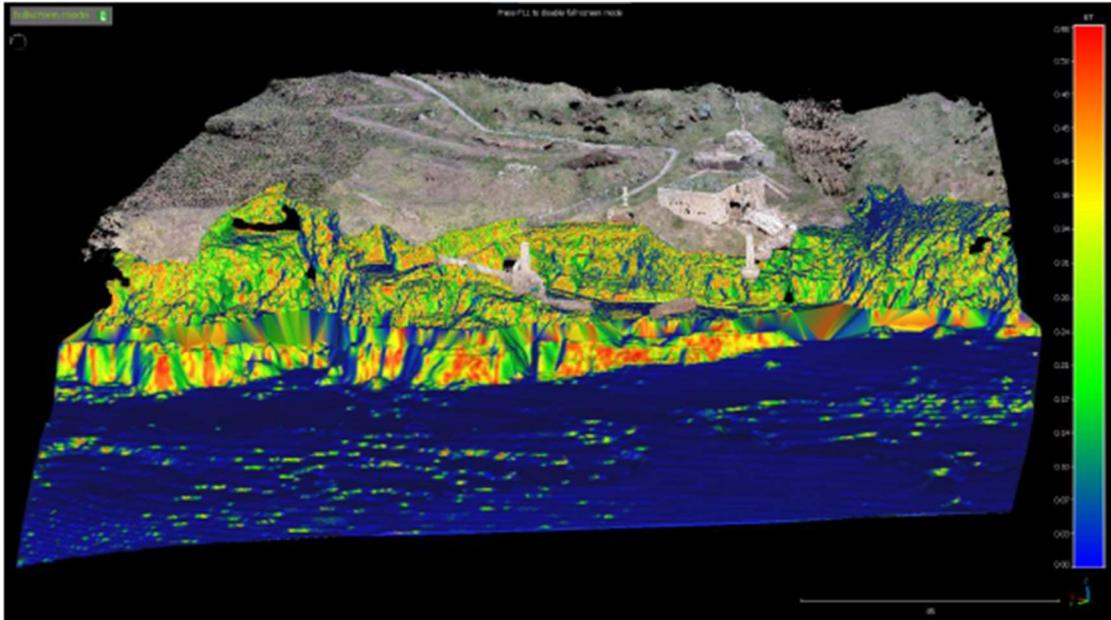


Fig.64 – Mappa dell'indice di pericolosità cinematica per il meccanismo di ribaltamento diretto (approdo Marinella)

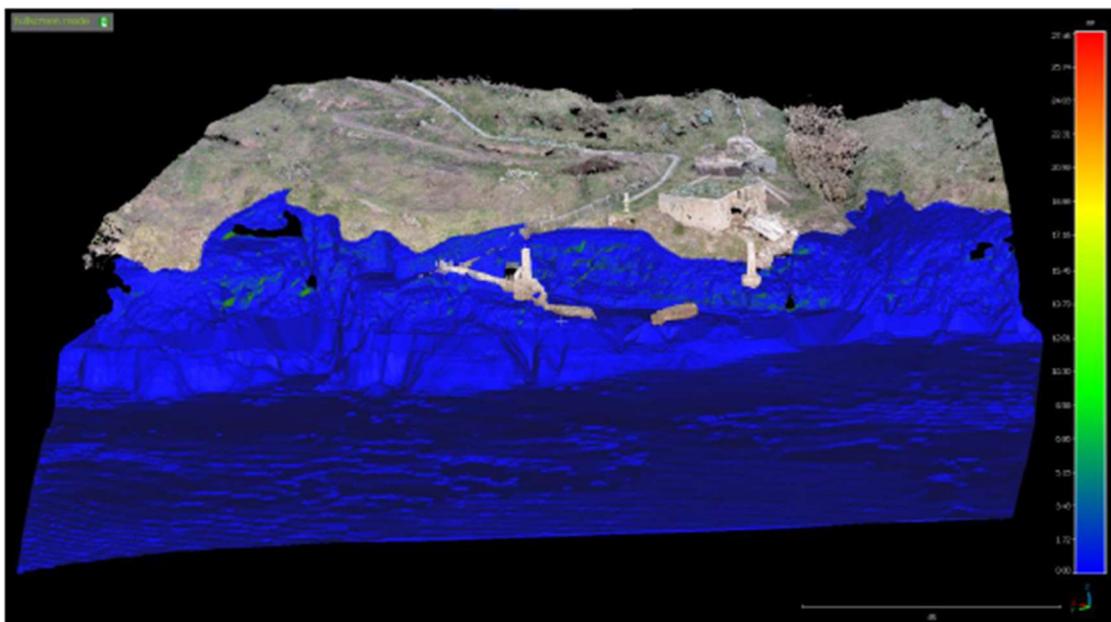


Fig.65– Mappa dell'indice di pericolosità cinematica per il meccanismo di caduta libera (approdo Marinella)

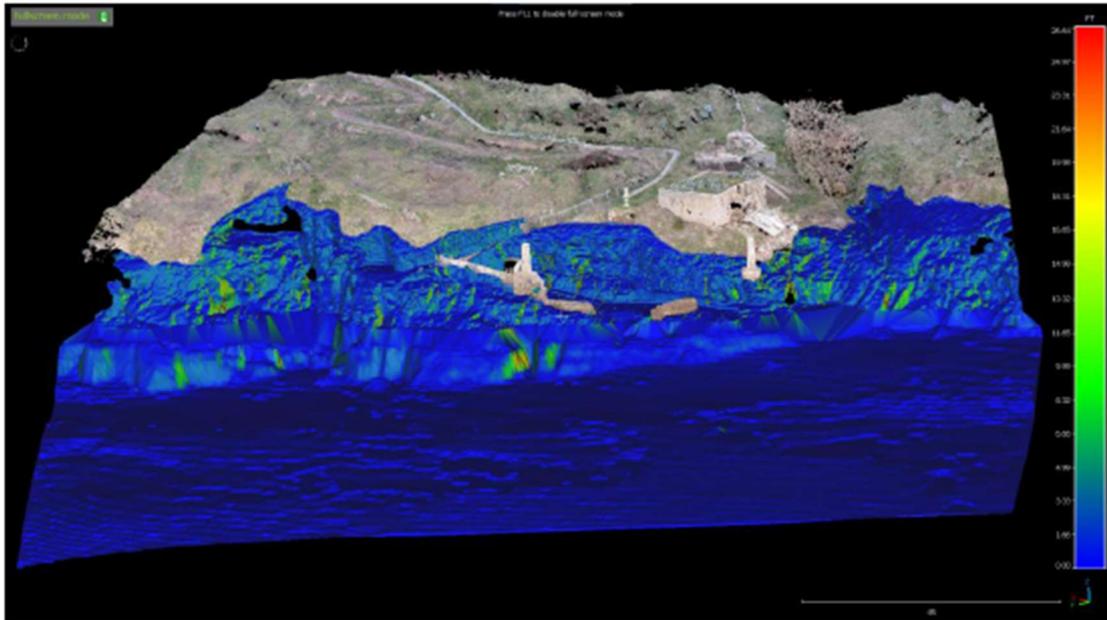


Fig.66 – Mappa dell'indice di pericolosità cinematica per il meccanismo di ribaltamento flessurale (approdo Marinella)

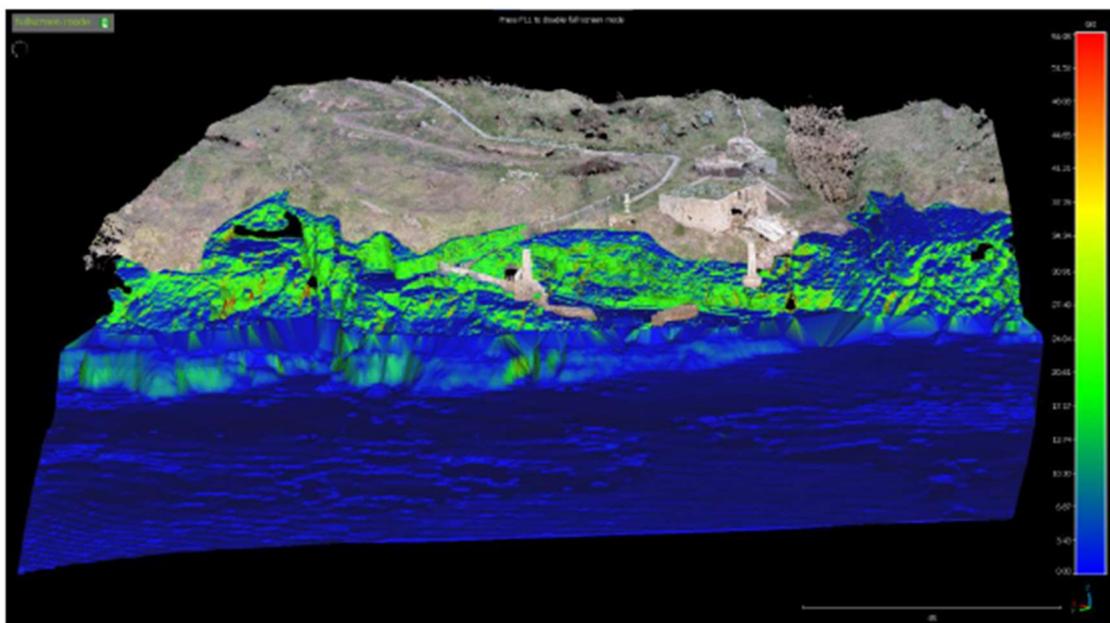


Fig.67 – Mappa dell'indice di pericolosità cinematica globale per i meccanismi esaminati (approdo Marinella)

Nell'elaborato "2017E037INV-02-D-GE-IND002" è possibile osservare nel dettaglio gli indici di pericolosità per sub-aree.

## 11.6 Pericolosità geomorfologiche e sintesi dei dissesti presso lo scalo Marinella

Oltre alla pericolosità conclamata dei crolli in roccia, che resta il principale dissesto potenziale, si sottolinea che la parte a monte della falesia dell'approdo Marinella è caratterizzata da una coltre di alterazione con spessore medio di qualche decimetro. L'osservazione di tale coltre è stata possibile, nella fase di indagine integrativa, grazie ad un incendio che ha messo a nudo gli affioramenti precedentemente coperti dalla vegetazione. La coltre regolitica/colluviale è oggetto di erosione idrica nelle aree più acclivi e quindi prossime alla falesia. Per quanto riguarda le piroclastiti sovrastanti i membri 1 e 3 della formazione lavica Santo Stefano, si può affermare che la giacitura della formazione (Villa Giulia) si presenta radiale ed in corrispondenza dell'approdo a traversopoggio; comunque, non si riscontrano elementi riconducibili a franosità attiva o quiescente. In sintesi, i principali cinematismi potenzialmente attivabili in corrispondenza dell'approdo sono:

caduta libera, con valori massimi dell'indice di pericolosità di 27.5%

lo scivolamento planare e il ribaltamento di flessura, con valori massimi di 26.6%

lo scivolamento di cunei valore medio 15.8%

il ribaltamento di blocchi 0,5% (praticamente assente in quest'area)

Il meccanismo di caduta libera come meccanismo predominante trova riscontro nelle morfologie spesso aggettanti di questo tratto di falesia.

Ai fini progettuali si consiglia di valutare i valori dell'indice di pericolosità cinematica globale (GKI) per i meccanismi esaminati che in corrispondenza della falesia dell'approdo Marinella con valori massimi di 54,9%.

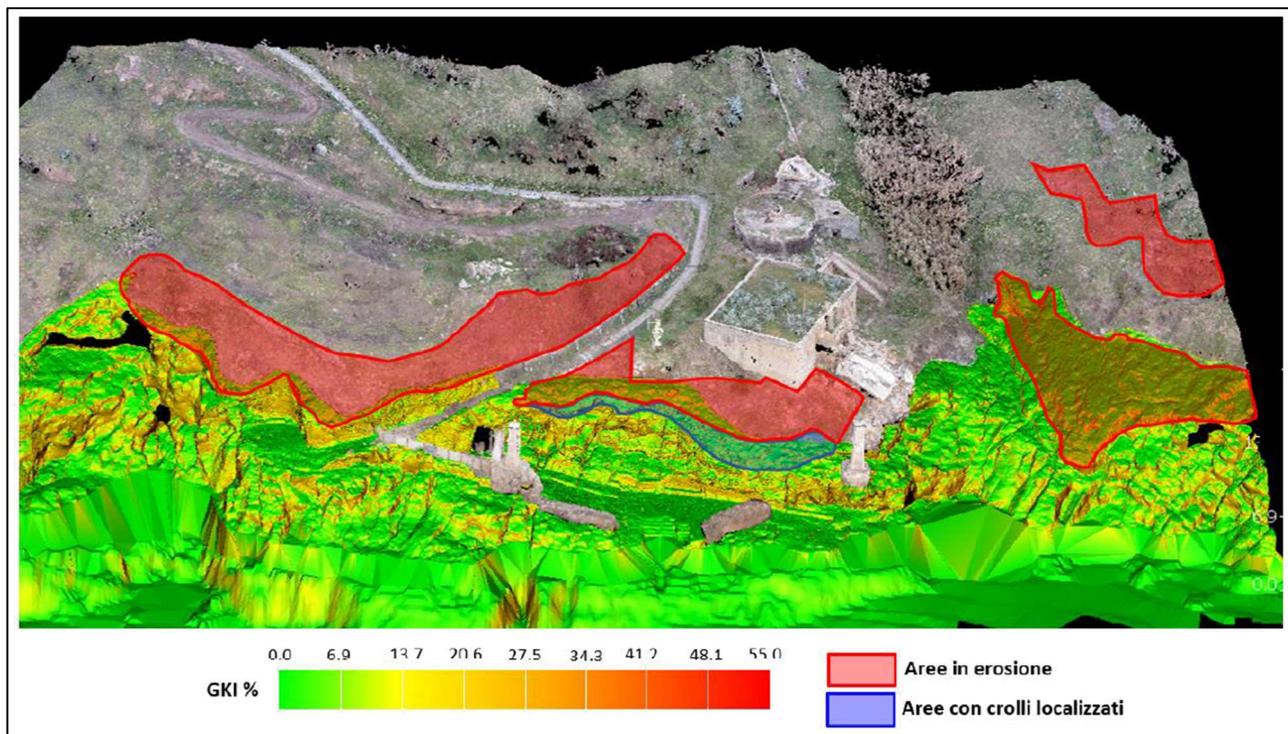


Fig.68 -Mappa di sintesi delle analisi geomorfologica e cinematica dello Scalo Marinella.

### 11.7 Rilievo geomeccanico tradizionale e da remoto della cavità antropica nei pressi dello scalo 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 70).

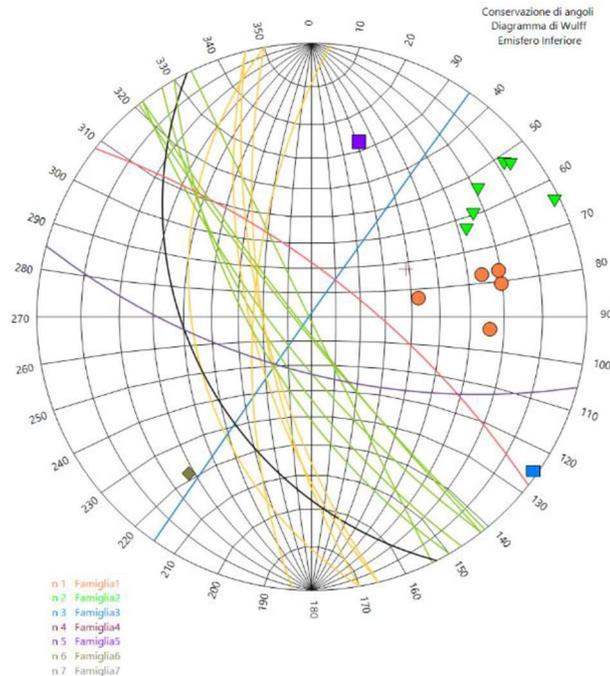


Figura 69 - Diagramma di Wulff con le tracce ciclografiche e i nodi delle discontinuità misurate alla stazione GS4.

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 69 e nella scheda di rilevamento 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 alla medesima tendenza. 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 ( $243^{\circ}$  e  $260^{\circ}$  rispettivamente), ma presentano inclinazioni minori intorno a  $40^{\circ}$  (analogamente a quanto osservato anche alle altre stazioni).

In Figura 70, Figura 71, Figura 72, Figura 73, Figura 74 e Figura 75 vengono rappresentati i risultati delle elaborazioni grafiche relative all'analisi cinematica quantitativa dell'ammasso della galleria ubicata nei pressi dell'approdo Marinella.

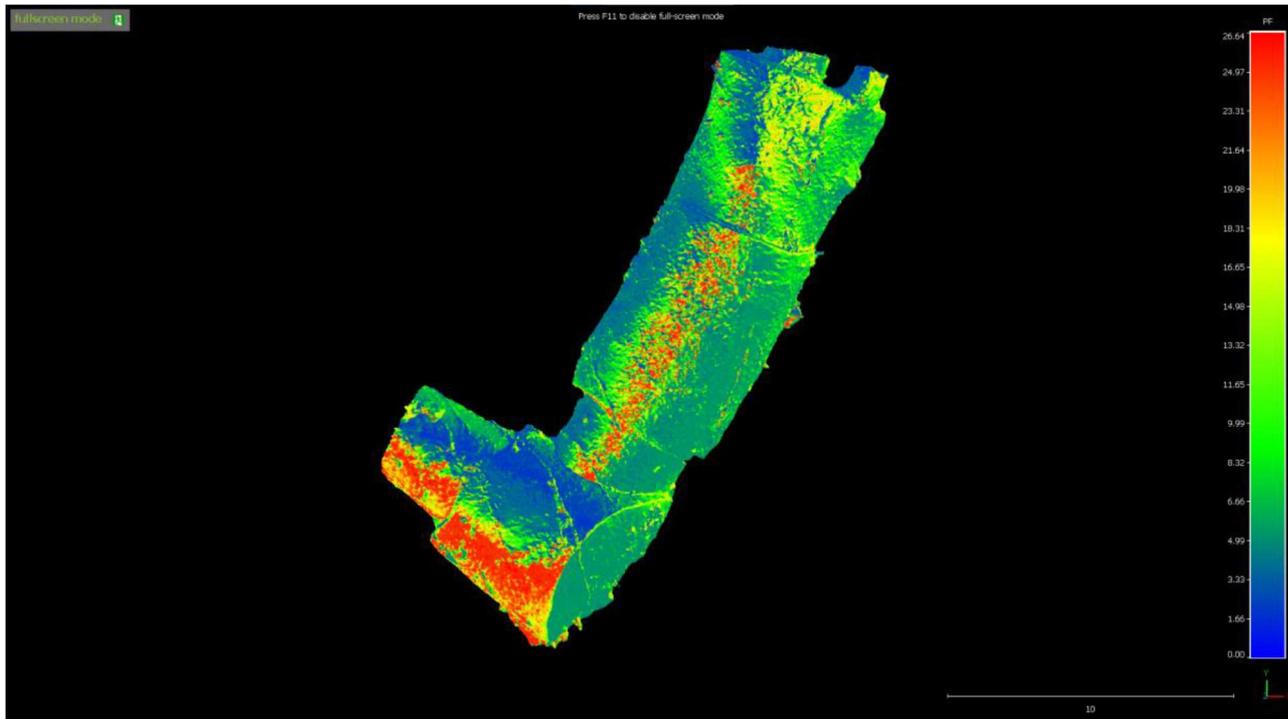


Figura 70 - Mappa dell'indice di pericolosità cinematica per il meccanismo di scivolamento planare (galleria approdo Marinella).

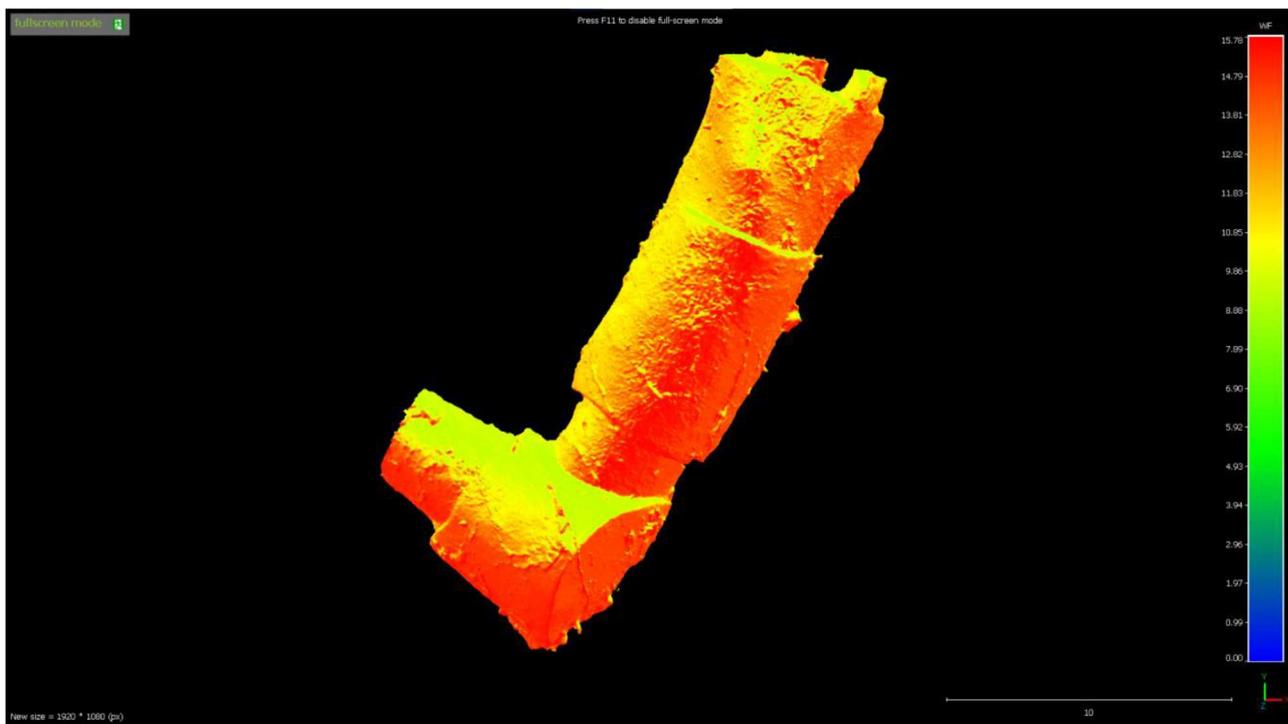


Figura 71 - Mappa dell'indice di pericolosità cinematica per il meccanismo di scivolamento cunei (galleria approdo Marinella)

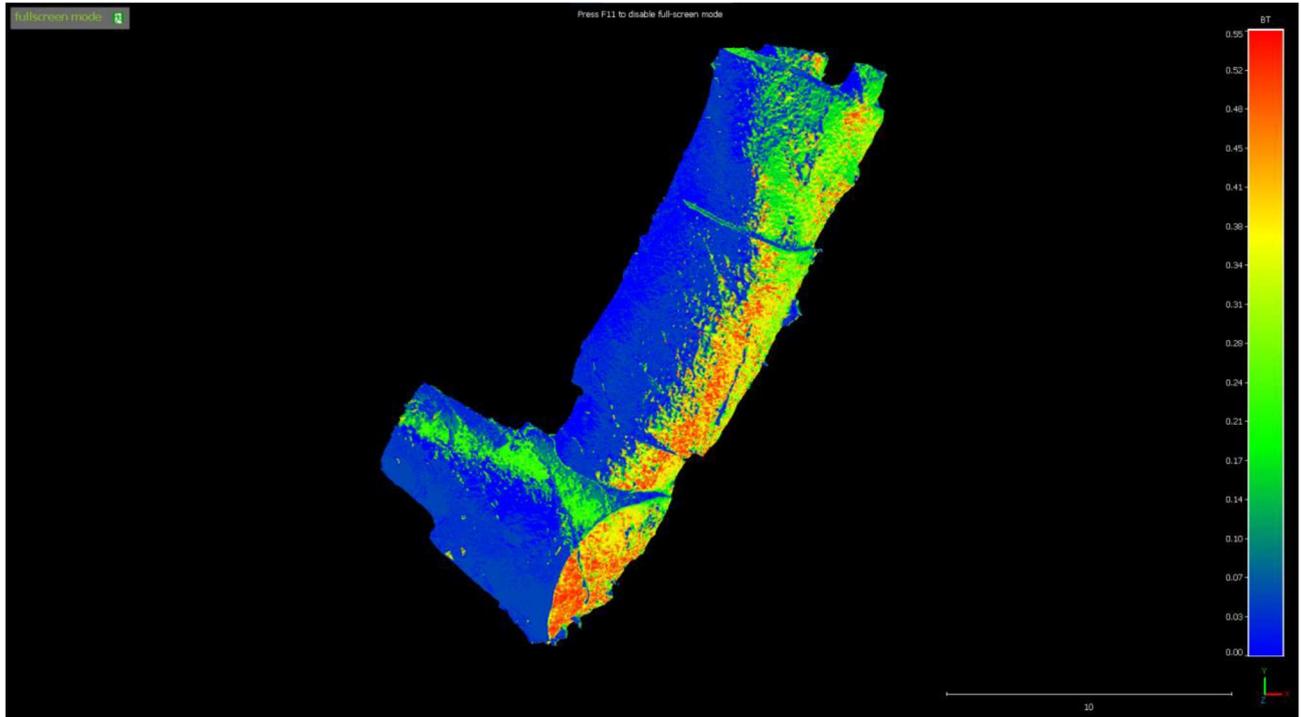


Figura 72 - Mappa dell'indice di pericolosità cinematica per i meccanismi di ribaltamento diretto (galleria approdo Marinella).

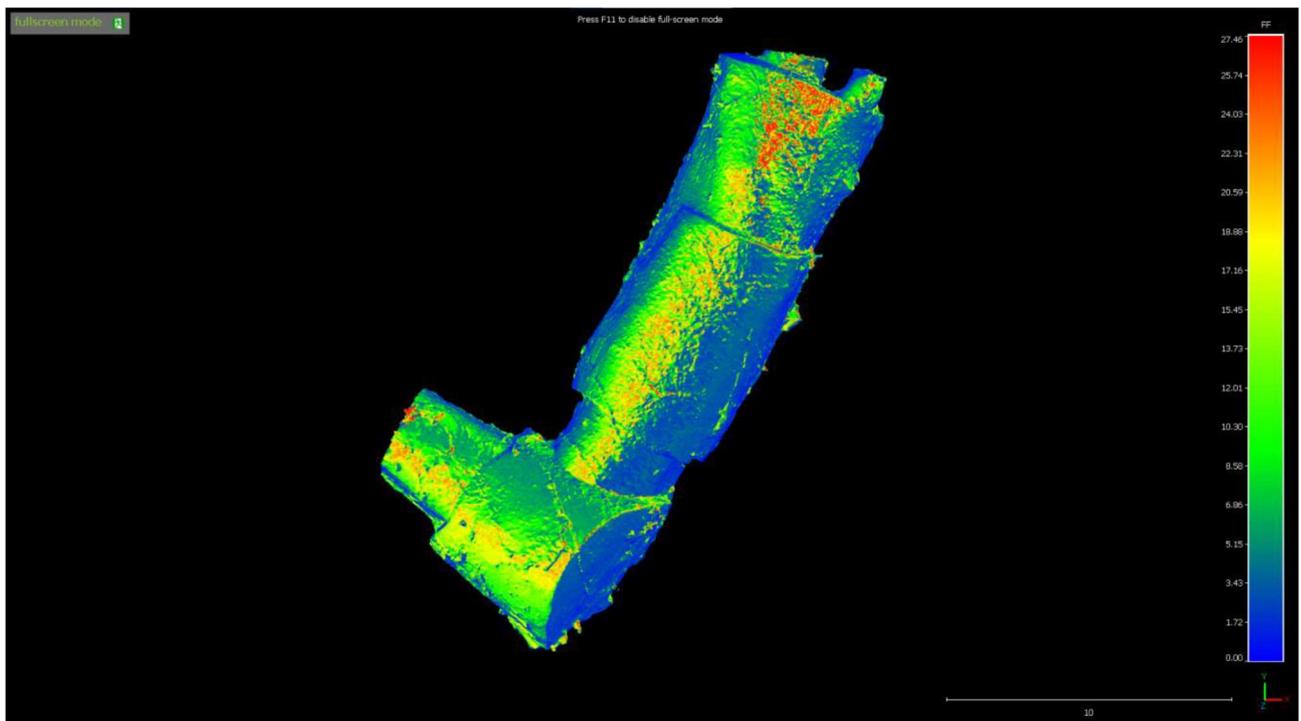


Figura 73 - Mappa dell'indice di pericolosità cinematica per il meccanismo di caduta libera (galleria approdo Marinella).

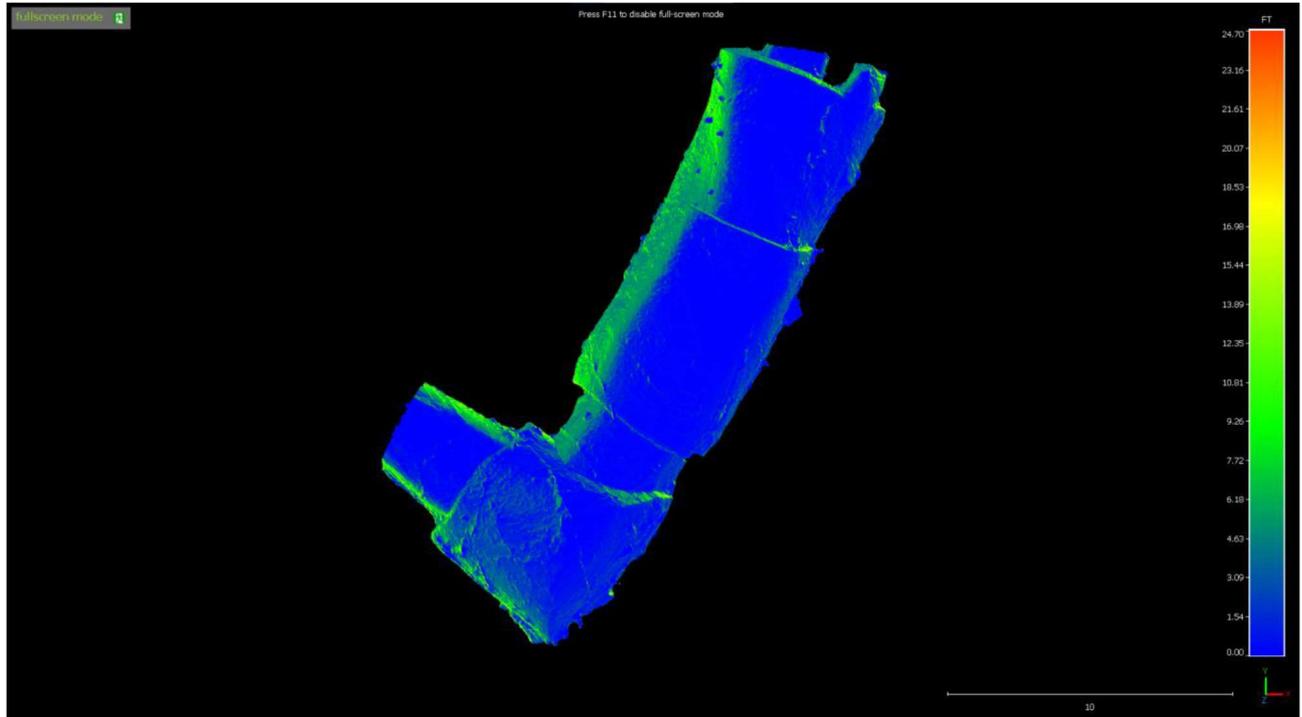


Figura 74 - Mappa dell'indice di pericolosità cinematica per il meccanismo di ribaltamento di flessura (galleria approdo Marinella).

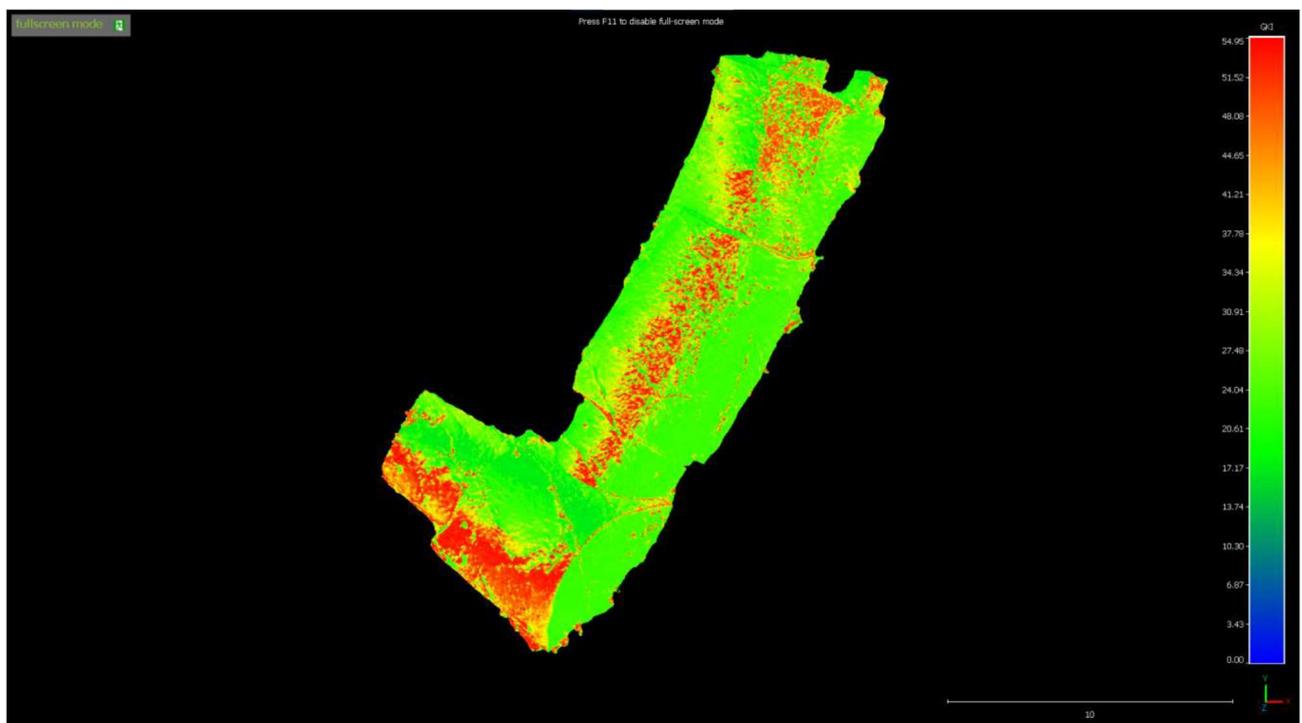


Figura 75 - Mappa dell'indice di pericolosità cinematica globale per i meccanismi di dissesto esaminati (galleria approdo Marinella).

Dalle figure precedenti e dai dati della Tabella sotto riportata si 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%.

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

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

#### 11.8 Rilievo geomeccanico tradizionale scalo n.4

Presso lo scalo n.4 è stata eseguita una linea di scansione denominata GM1 ed ubicata come mostrato in fig.76

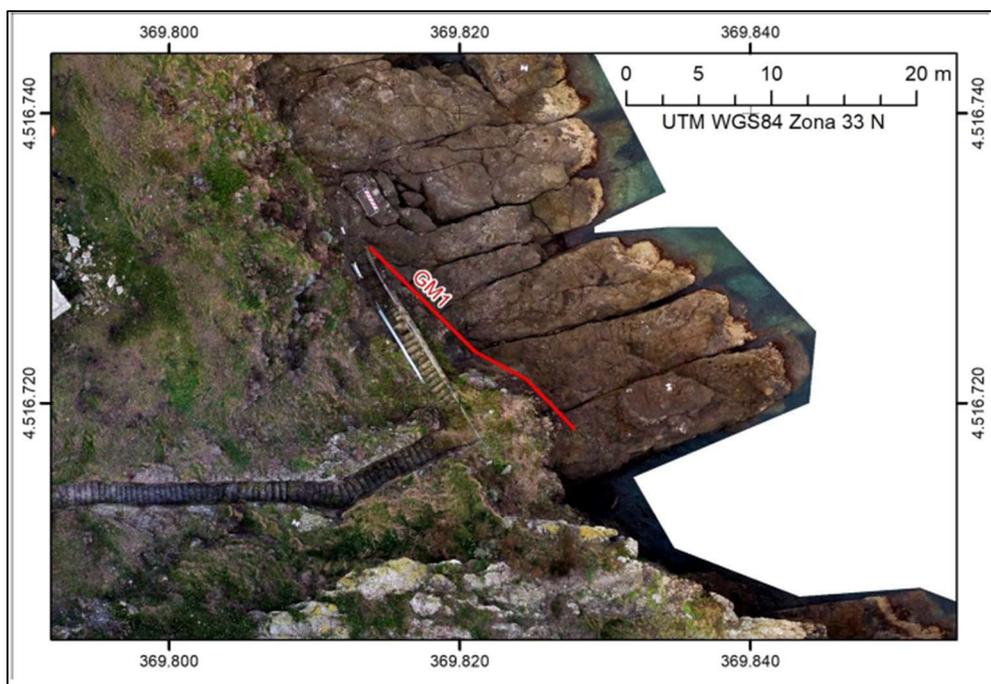


Fig 76 - Ubicazione linea di scansione rilievo geomeccanico classico GM1

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.

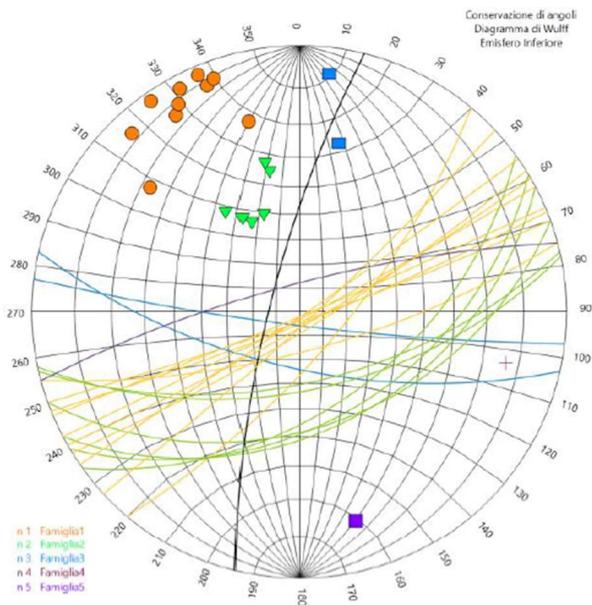


Fig. 77 – diagramma di Wulff con ciclografiche ed i poli delle discontinuità misurate alla stazione GM1

### 11.9 Famiglie rilevate e sintesi RMR

Come si può osservare in Figura 77, la famiglia più rappresentata, denominata Famiglia 1 (10 7occorrenze), 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  $157^{\circ}$  ma con inclinazione inferiore, mediamente intorno a  $50^{\circ}$ . 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.

## 11.10 Rilievo geomeccanico da remoto scalo n.4

### 11.10.1 Pericolosità geomorfologiche e sintesi dei dissesti presso lo scalo n.4

Dalle figure seguenti e dai valori della Tabella sotto riportata 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%.

	PF (%)	WF (%)	BT (%)	FF (%)	FT (%)	GKI (%)
<b>max</b>	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

Valori massimi, minimi e deviazione standard degli indici di instabilità cinematica per lo Scalo n.4

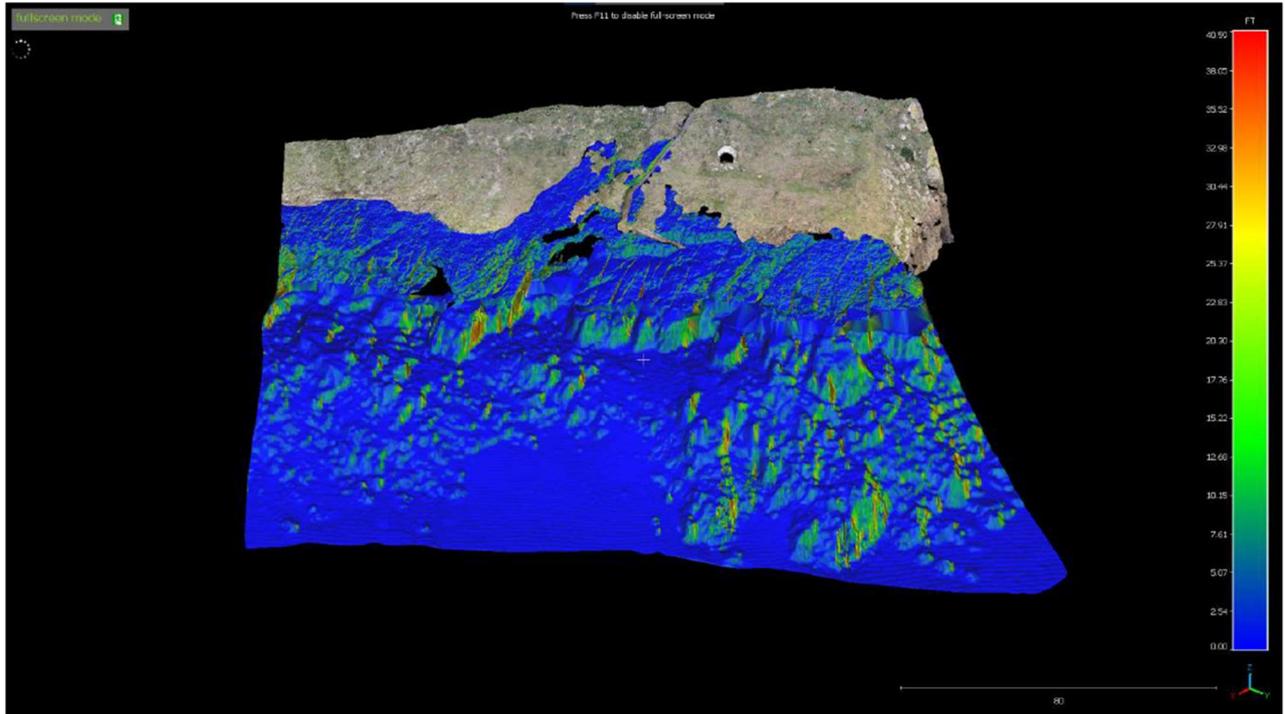


Fig. 78 – Mappa dell'indice di pericolosità cinematica per il meccanismo di ribaltamento di flessura (Scalo 4)

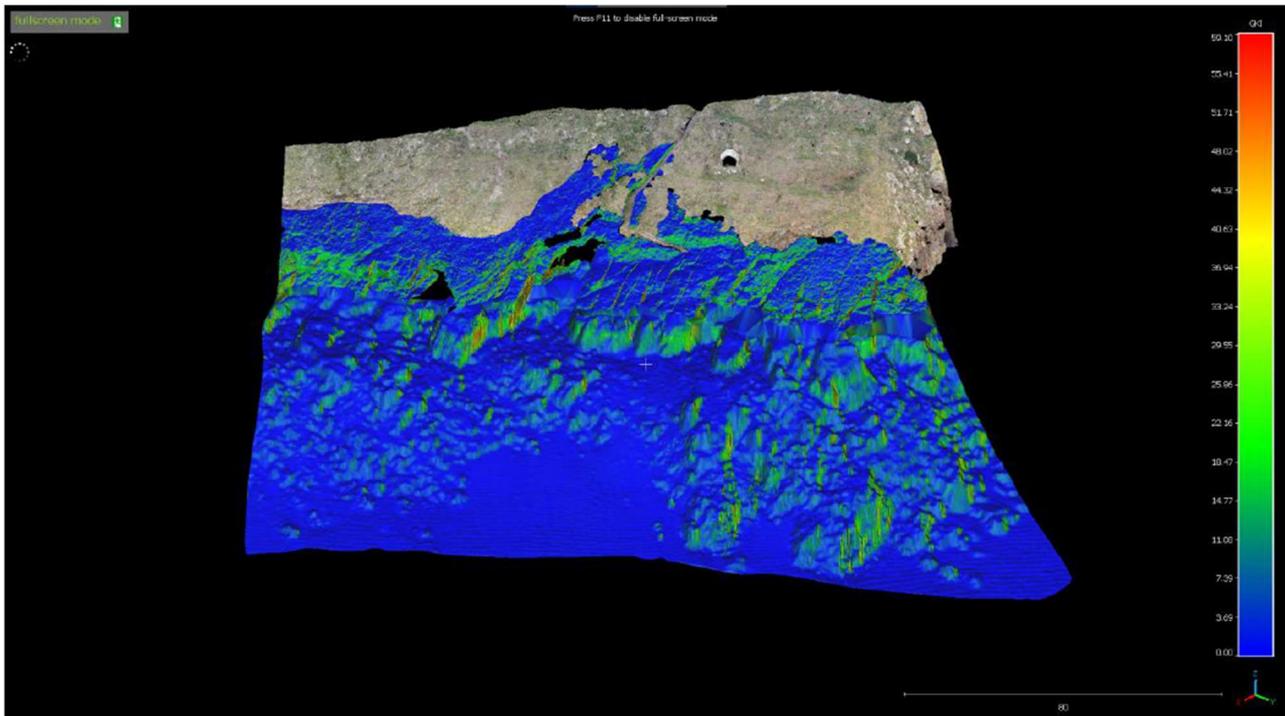


Fig. 79 – Mappa dell'indice di pericolosità cinematica globale per i meccanismi di dissesto esaminati (Scalo 4)

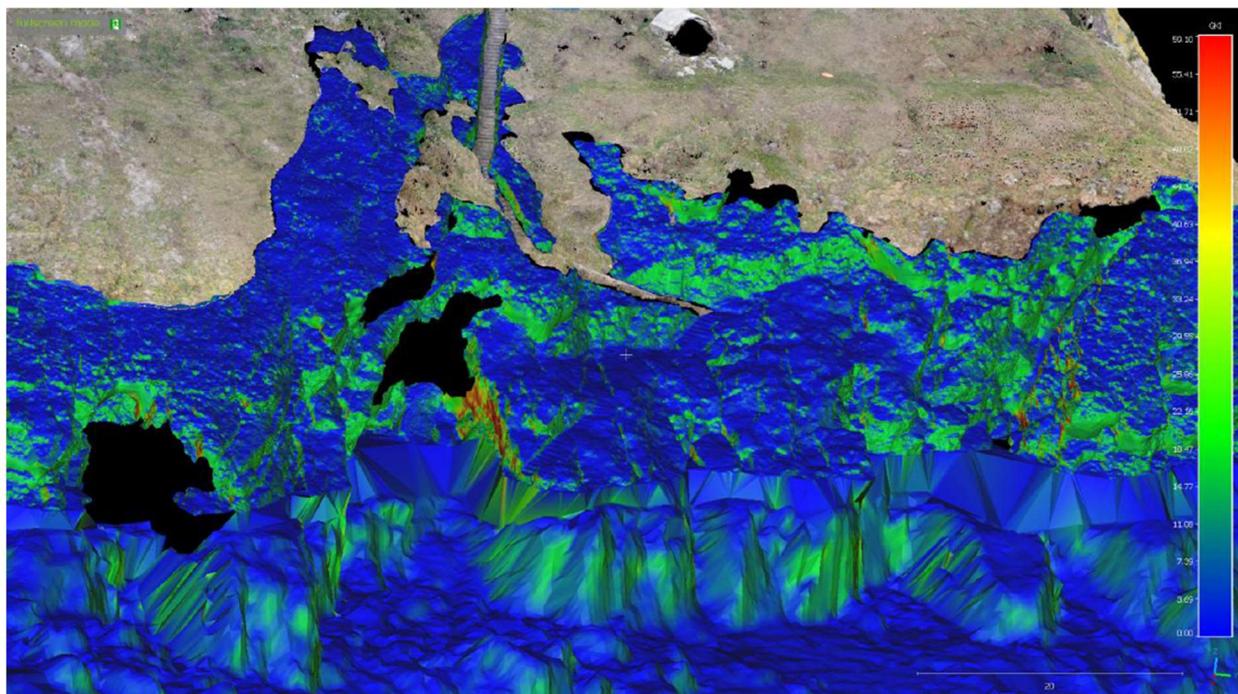


Fig. 80 – Dettaglio dell'approdo dello scalo 4 della mappa dell'indice di pericolosità cinematica globale per i meccanismi di dissesto esaminati

Come per lo scalo Marinella, anche lo scalo n.4 presenta delle potenziali instabilità secondarie dovute ad aree caratterizzate dalla presenza di materiale regolitico-colluviale soprattutto in corrispondenza dei cigli delle falesie. Tali aree sono segnalate come aree in erosione idrica diffusa e sono molto mitigate nella parte alta del versante dai terrazzamenti antropici presenti. Il principale dissesto potenziale resta il crollo di elementi lapidei soprattutto nelle aree in aggetto per i cinematismi descritti nei paragrafi precedenti.

#### Nuova nomenclatura dei possibili cinematismi

Le indagini integrative eseguite nell'aprile del 2023 hanno introdotto 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.

## 12 Rilievo geostrutturale prima campagna

I rilievi integrativi sono stati confrontati con la prima campagna di indagini per verificare il riconoscimento delle principali fratture rinvenute in affioramento. Al di là di un comprensibile scostamento dei risultati dovuto alla soggettività di ogni singola misura acquisita tramite la classica bussola da geologo, i due rilievi sono da considerarsi concordanti. Inoltre, sono stati utilizzati i risultati delle prove eseguite nella prima fase di indagini tramite martello di schmidt per la definizione dei valori di resistenza a compressione monoassiale dei joints. Per una migliore comprensione si rimanda all'elaborato "2017E037INV-02-D-GE-IND001".

## 13 Sintesi delle verifiche di stabilità del pendio

La presente disamina riguarda le verifiche di stabilità globale del pendio naturale presso lo scalo n.4 dell'Isola di Santo Stefano Ventotene effettuate *ex post* l'intervento in somma urgenza per la mitigazione del pericolo crolli e poi con gli interventi integrativi ritenuti necessari; presso lo scalo Marinella le verifiche sono state eseguite ante e post operam in considerazione degli interventi progettati in questa fase.

Occorre premettere che le verifiche di stabilità globali effettuate con il metodo classico, che prevede la generazione di tutte le possibili superfici circolari lungo le quali è possibile il verificarsi di instabilità e la successiva verifica del fattore di sicurezza per ogni superficie generata con il metodo dei concetti noto in letteratura secondo vari autori (Janbu, Morgenstain & Price, Spencer, etc.), per la maggior parte dei software disponibili in commercio vengono effettuate seguendo il criterio di rottura di Mohr-Coulomb che ben rappresenta il comportamento meccanico dei terreni e non del rocce. Visto che nel caso in questione i pendii sono costituiti da rocce laviche, è stato necessario l'utilizzo un software che considerasse anche il criterio di rottura non lineare di Hoek et al. 2002. Si è quindi proceduto ad effettuare le analisi con il **software SSAP2010 (Slope Stability Analysis Program) versione 5.2 2023 del Prof. Lorenzo Borselli – Facoltà di Ingegneria, dipartimento di Geologia dell'Università Autonoma di San Luis Potosì – Messico.**

In SSAP2010 è stato introdotto il criterio di rottura pubblicato da Hoek et al. (2002) per la caratterizzazione della resistenza al taglio degli ammassi rocciosi fratturati. Questo criterio di rottura estende quello tradizionalmente utilizzato per i terreni sciolti (Mohr- Coulomb) e permette di utilizzare il metodo di verifica della stabilità mediante l'equilibrio limite anche in presenza di ammassi rocciosi fratturati, dove è necessario una metodologia che permetta di definire la

resistenza al taglio dell'ammasso in termini dei parametri necessari per effettuare una verifica di stabilità dei pendii. La metodologia di Hoek che si è evoluta in oltre 25 anni di studi di meccanica e ingegneria delle rocce (Hoek & Bray, 1997; Marinos & Hoek, 2001, Hoek et al.; 2002) permette attraverso una caratterizzazione delle qualità meccaniche e strutturali dell'ammasso un percorso non ambiguo che porta alla valutazione dei parametri necessari per effettuare una verifica di stabilità dei pendii.

*Il campo di applicazione della metodologia è limitato ai pendii in roccia dove non sono presenti instabilità e distacchi di natura strutturale (cunei o poliedri di roccia, topplig/ribaltamenti, e caduta di massi). Tuttavia, il metodo presenta una capacità di generalizzazione molto ampia, potendo spaziare dagli ammassi rocciosi in rocce consistenti, alle rocce deboli fino alle rocce tenere e agli ammassi in formazioni in facies di flysch (Marinos & Hoek; 2001, Marinos, 2017). Per tali ragioni i risultati delle verifiche sono da ritenersi qualitativi e non quantitativi, visti i cinematicismi attesi e messi in luce dalle indagini.*

Anche se le indagini integrative hanno confermato che i dissesti in atto e potenziali sulle falesie sono dovuti a distacchi di natura strutturale (fratture che generano caduta libera di cunei, ribaltamenti, etc.), si è proceduto alle analisi di stabilità secondo il metodo sopra descritto grazie, inoltre, alla possibilità di inserire nel software la caratterizzazione geomeccanica con l'integrazione al criterio GSI di Hoek et al. (2002) per resistenza al taglio di discontinuità specifiche con il criterio JRC, Barton & Bandis (1990). Sia il valore GSI (Geological Strength Index) Cai et al. (2007) per il metodo Hoek et al. 2002 sia i parametri JRC per il metodo Barton & Bandis 1990 sono stati ricavati dai rilievi ed indagini integrative e dai rilievi ed indagini di prima fase. In più, il generatore di superfici del software consente l'individuazione di superfici di rottura non-circolari superando così i metodi classici.

### 13.1 Generalità Verifica di stabilità scalo n.4

Le verifiche sono state effettuate su n.3 sezioni presso lo scalo n.4 dell'Isola di Santo Stefano-Ventotene di cui n.2 disposte monte valle e n.1 disposta trasversalmente al pendio. Le sezioni includono le aree perimetrate a rischio frana A del PAI ed in particolare i poligoni TSAS4 e TSAS6 Per tutte le verifiche sono stati impostati i seguenti parametri:

Metodo di calcolo Borselli 2016: nuovo metodo di calcolo sviluppato come una evoluzione e generalizzazione del metodo di calcolo di *Chen-Morgestern* (1983), che a sua volta fu una

evoluzione e generalizzazione di quello ben noto di *Morgestern –Price* (1965), secondo Duncan et al. (2014)

Metodo di ricerca delle superfici *Sniff Random Search* (Borselli 1997, 2021): consente di generare superfici di forma libera e quindi valorizzare il passaggio tra strati che evidenziano debolezze geomeccaniche

Condizioni Pseudostatiche secondo NTC2018 con utilizzo dei coefficienti sismici orizzontale  $K_h$  e verticale  $K_v$

Opzione – effetto tension crack consente la ricerca di eventuali giunti di trazione in testa al pendio in terreni con presenza di coesione drenata e non drenata nonché in ammassi rocciosi fratturati  
Nota bene: *le quote delle sezioni sono relative e non espresse s.l.m. in quanto il software non riconosce quote negative; gli oggetti in roccia sono stati simulati dal punto di vista geotecnico come una "lente" con caratteristiche geotecniche prossime allo zero in quanto il software riconosce solo quote dell'ascissa crescenti.*

*In questa sede si presenteranno i risultati delle verifiche in continuità con quanto già rappresentato nell'ambito dell'intervento di somma urgenza; quindi, l'ante operam, in questa fase, sarà descritto con le opere già realizzate presso lo scalo n.4; l'unico post operam che verrà nuovamente verificato è relativo alla sezione A-A' dove si è dovuta risolvere una criticità in corrispondenza di una piccola porzione del pendio con  $FS < 1$ .*

### 13.2 Verifica di stabilità scalo n.4 – Sezione A-A'

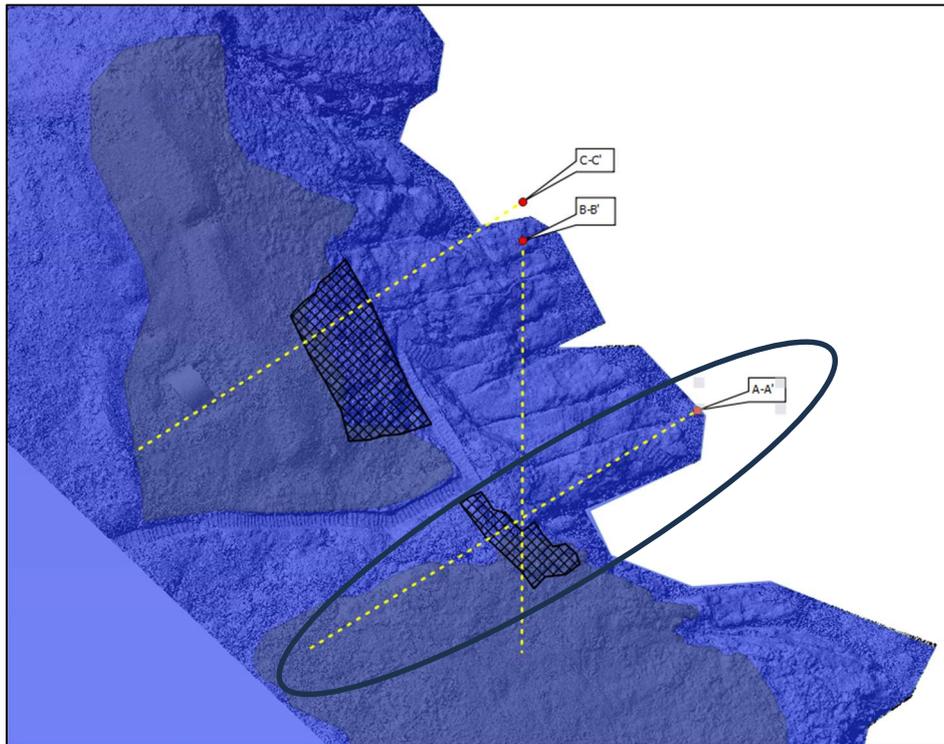


Fig.81 - Tracce delle sezioni per la verifica di stabilità globale del pendio – in evidenza la sezione A-A'

#### **ANTE OPERAM (A-A') - ANTE INTERVENTI IN SOMMA URGENZA**

L'analisi eseguita con i parametri sopra riportati, per la sezione A-A', ha fornito un fattore di sicurezza minimo  $F_s=0,31$ ; tale superficie è riferibile ad una porzione di falesia sottostante l'area dove si è già intervenuti per la somma urgenza; sono presenti nella stessa area altre superfici analoghe alla prima in termini geometrici con  $F_s < 1$ ; le altre superfici calcolate hanno un  $F_s \geq 1,15$  considerato  $F_s$  da progetto (target da non considerare trattandosi di verifiche ex post).

Di seguito si mostra il risultato della verifica di stabilità globale A-A' elaborato con il metodo qFEM di Borselli, una mappa a colori di un campo scalare del fattore FS locale generato con algoritmo quasi Gauss integration e analisi geostatistica non parametrica, basato su sistemi FEM di Schofield & p. Worth(1968) e Griffith et al. (1999) con indicazione della superficie con  $F_s$  minimo:

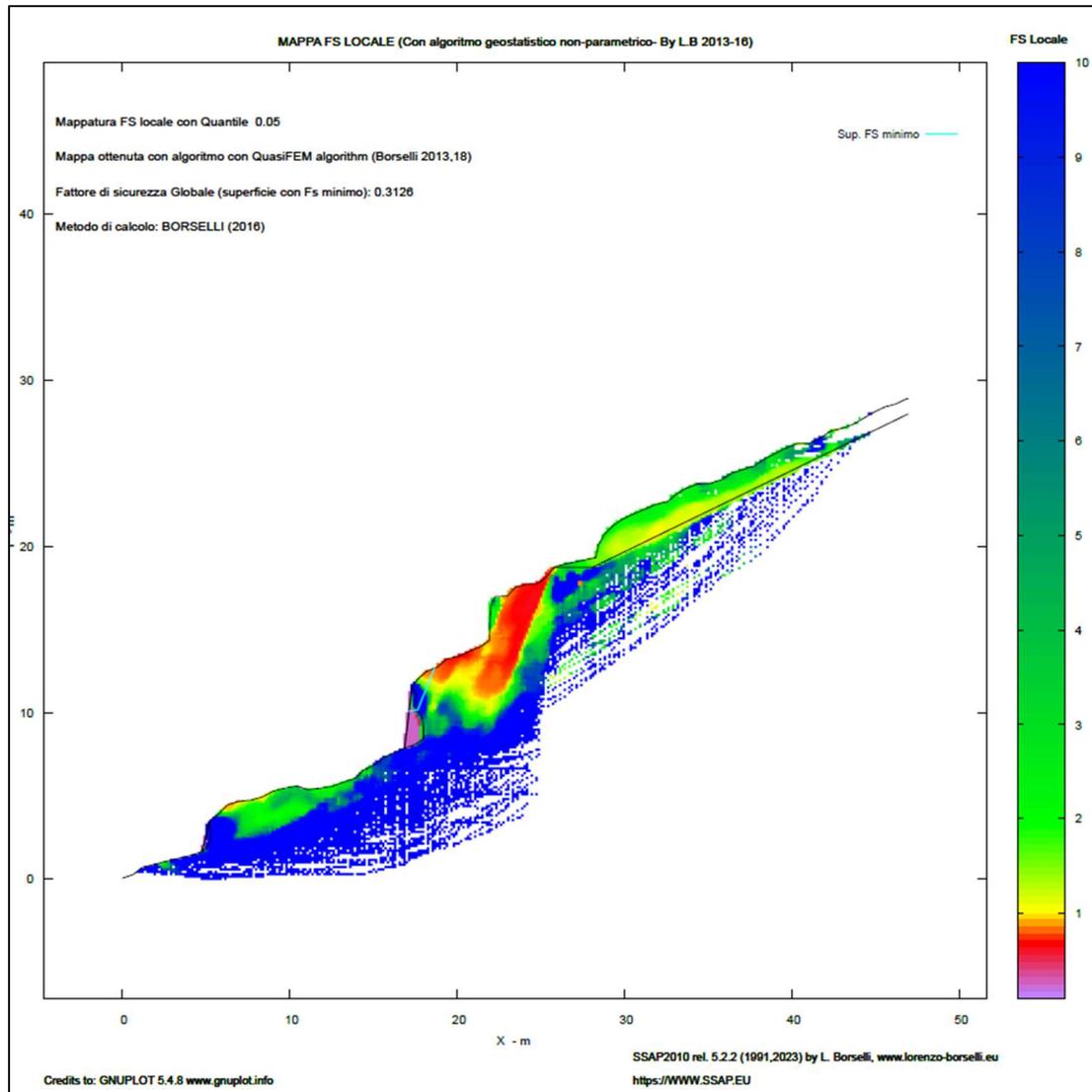


Fig.82 - Mappa a colori del Fs locale ante operam – sezione A-A'

Per completare le informazioni, di seguito, il risultato della verifica di stabilità della sezione A-A' che mostra le 10 superfici con fattore minimo (concentrate nell'area a valle dell'intervento in somma urgenza); nella immagine seguente sono anche mostrati i parametri di input e di ricerca:

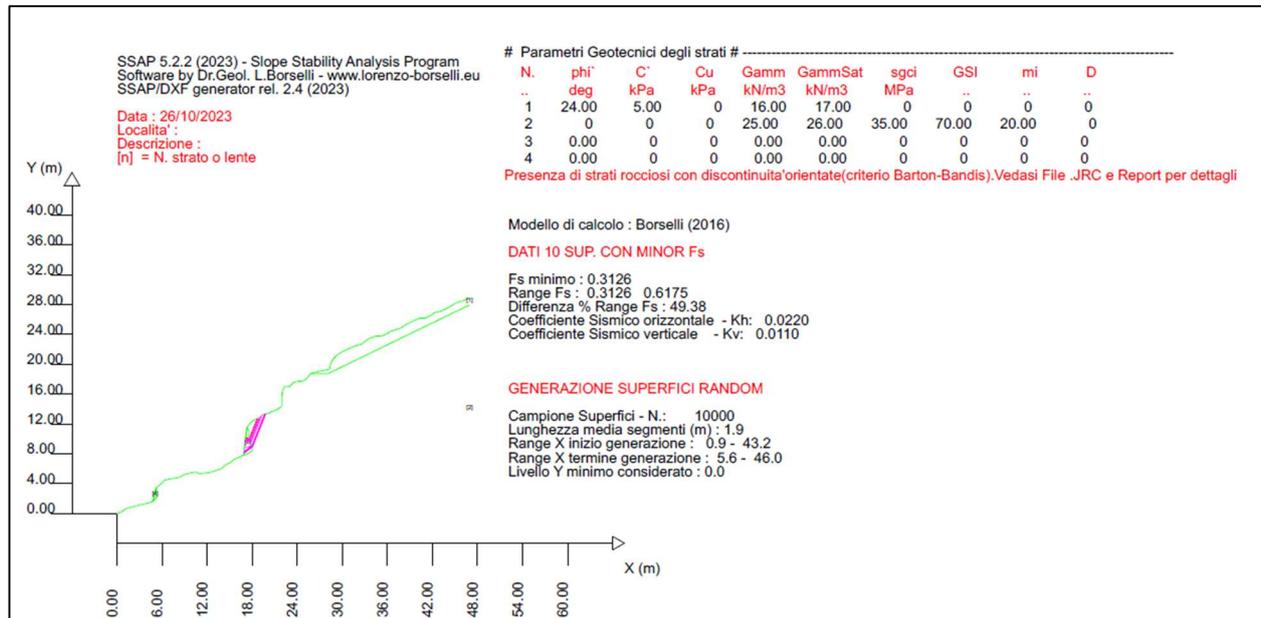
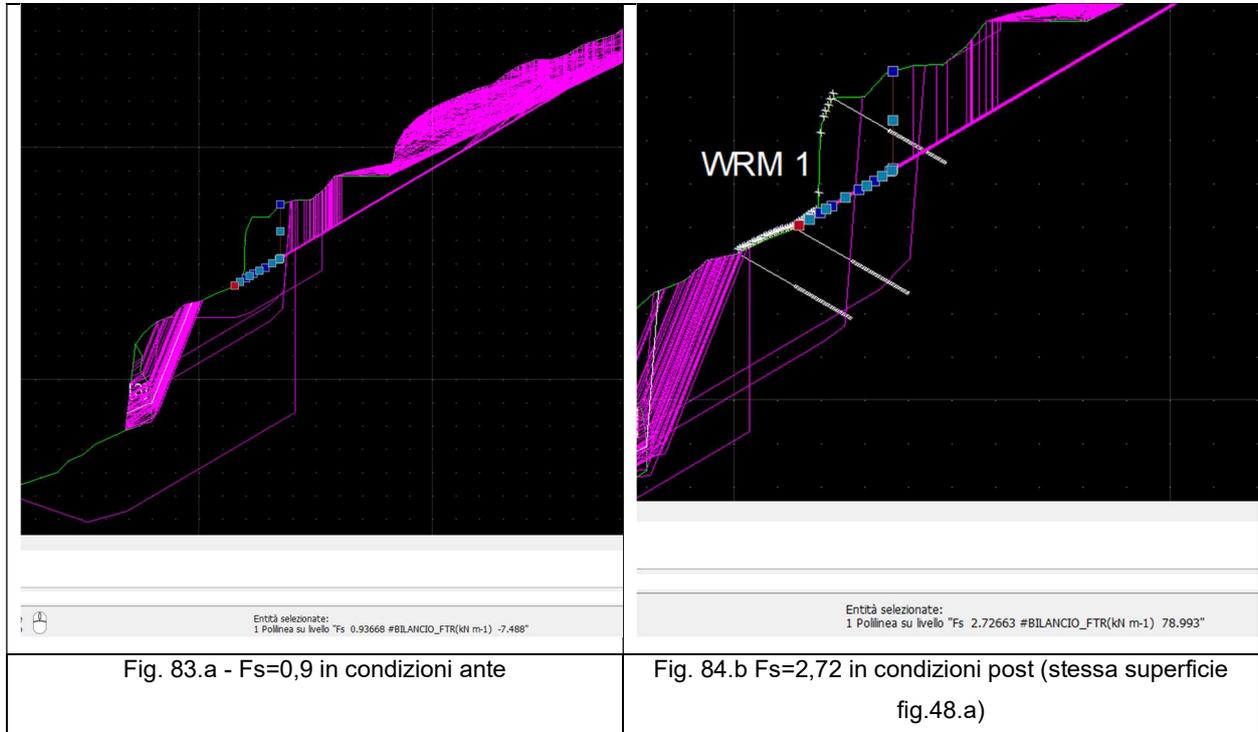


Fig. 83 – Esiti verifica di stabilità globale del pendio ante operam con evidenza delle n.10 superfici più critiche e parametri di input–sezione A-A'

## POST OPERAM (A-A') – POST INTEVENTI IN SOMMA URGENZA

L'analisi post operam è stata eseguita, per la sezione A-A', considerando la messa in opera di rete paramassi e barre di chiodature, così come realizzate e rappresentate negli elaborati progettuali. Il risultato ha fornito fattori migliorativi del Fs in corrispondenza delle opere eseguite mentre permangono le criticità nelle aree immediatamente a valle con Fs minimo prossimo a 0,30. **È necessario sottolineare che gli interventi sono volti a mitigare fenomenologie di dissesto locali come più volte descritto nei paragrafi precedenti.**

Di seguito un confronto dell'ante e post in corrispondenza di una delle superfici in zona intervento:



Si noti l'aumento del  $F_s$  da 0,9 a 2,7 in corrispondenza dell'intervento in somma urgenza.

Di seguito si mostra il risultato della verifica di stabilità globale A-A' post operam con indicazione del fattore FS locale minimo:

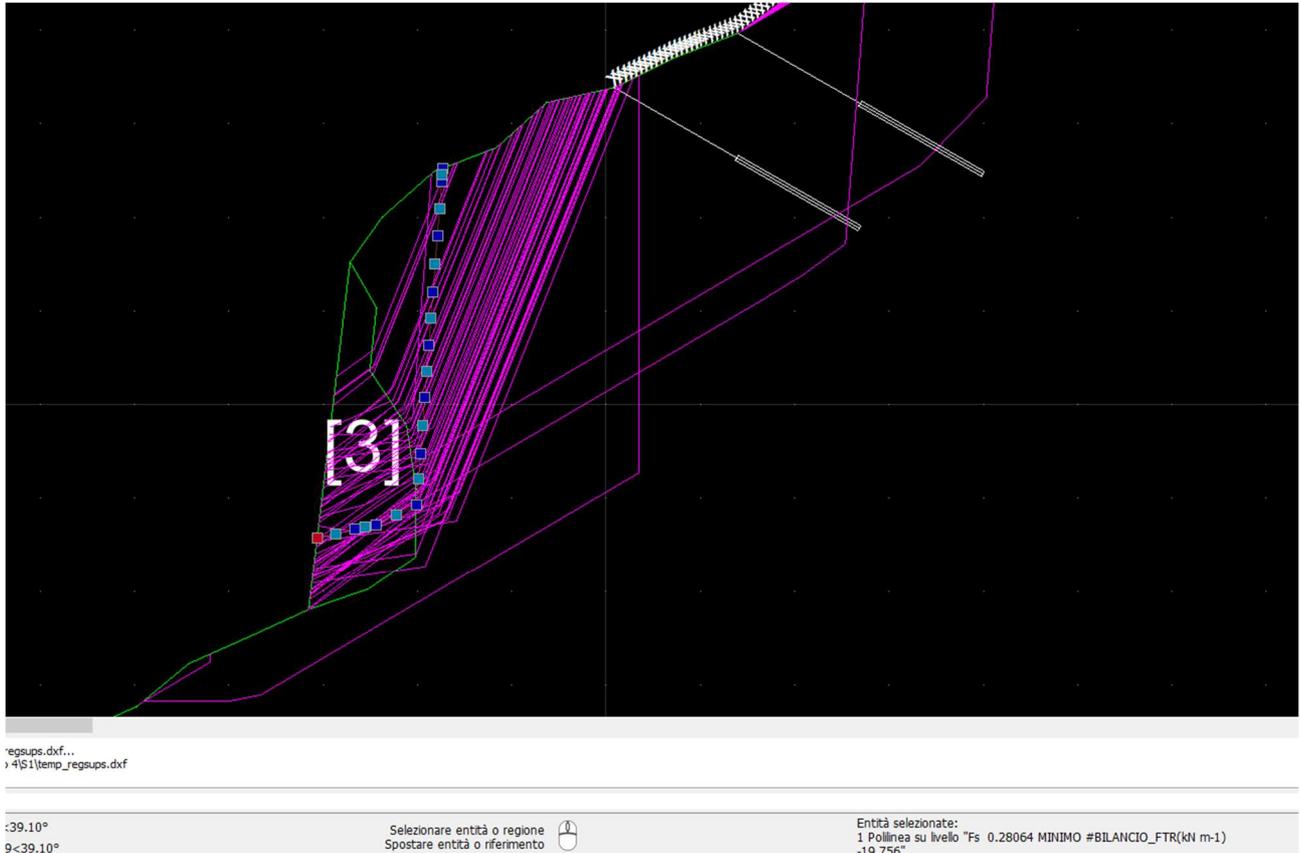


Fig.84 - Fs minimo – sezione A-A' post operam – si noti che la superficie appartiene ad aree di non intervento della somma urgenza

**Come anticipato, a valle dell'intervento in somma urgenza permangono superfici con fattore di sicurezza critici (nell'immagine sopra riportata è evidenziata la superficie con Fs minimo pari a 0,30. Tali superfici hanno una profondità di circa 1,5 m dal p.c.**

Per completare le informazioni, di seguito, il risultato della verifica di stabilità post operam della sezione A-A' che mostra le 10 superfici con fattore minimo; per ogni ulteriore informazione si rimanda al report sintetico delle verifiche in allegato (Allegato A); le caratteristiche tecniche della rete e dei chiodi sono sintetizzate in tabella:

#### TABELLA TIRANTI/ANCORAGGI

Beta(°)	: Inclinazione ancoraggio - Angolo con orizzontale(Gradi) 30.00
L(m)	: Lunghezza (m): 3.00
T(kN/m)	: Tensione di progetto 200.00
Lc(%)	: % lunghezza cementata 50.00

#### TABELLA WIREMESH (RETI IN ADERENZA ANCORATE)

Tr(kN/m)	: Resistenza limite a trazione rete 100.00
----------	--

alpha(-) : Coefficiente di mobilitazione resistenza a trazione 0.10

epsilonR(-) : Coefficiente di deformazione limite a trazione 0.040

FsT(-) : Fs di progetto resistenza allo sfilamento dei rinforzi 1.00

nella immagine seguente sono anche mostrati i parametri di input e di ricerca,

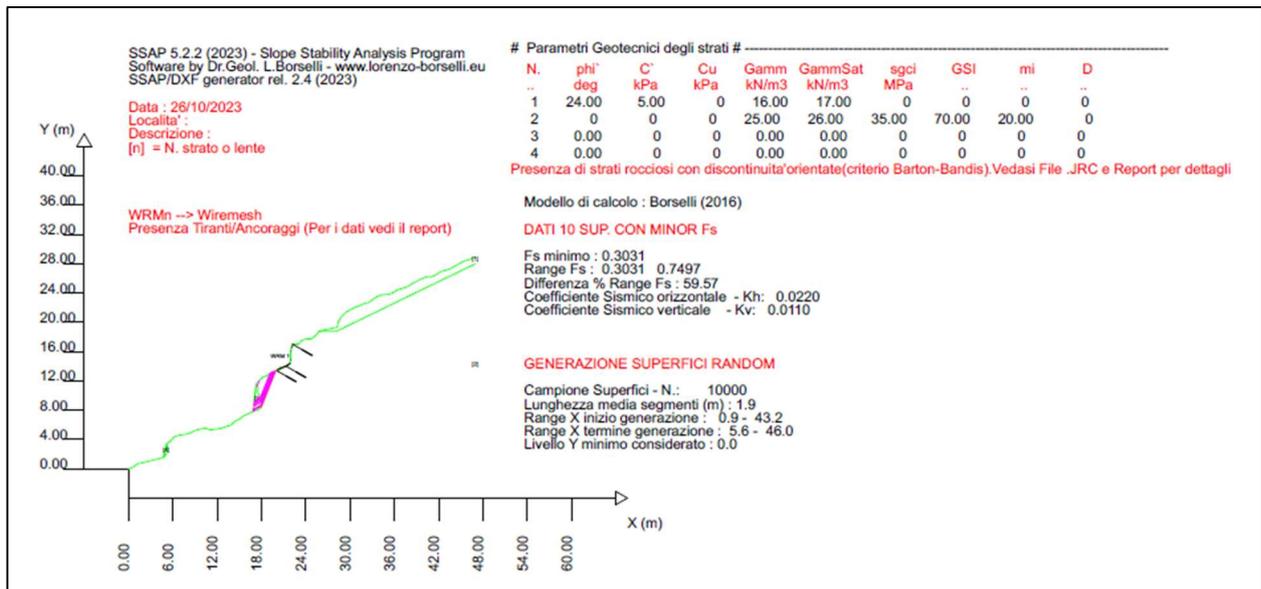


Fig. 85 – Esiti verifica di stabilità globale del pendio post operam con evidenza delle n.10 superfici più critiche e parametri di input–sezione A-A'

**N.B. Per rappresentare gli aggetti in roccia la convenzione del software SSAP necessita l'inserimento di "lenti d'aria" con caratteristiche geotecniche pari a zero. Nella sezione A-A' tali lenti corrispondono agli strati 3 e 4 .**

### POST OPERAM (A-A') – POST INTEVENTI INTEGRATIVI

L'intervento integrativo nella zona con criticità residua prevede l'esecuzione di barre di chiodatura della lunghezza di 4,5 m. Tale intervento, come mostrato di seguito consente di portare il Fs da 0,3 a valori di 2,65 circa nell'area più critica.

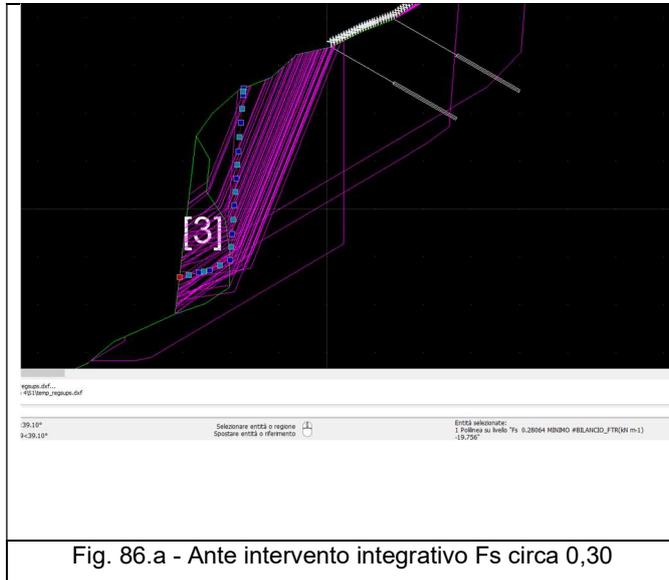


Fig. 86.a - Ante intervento integrativo Fs circa 0,30

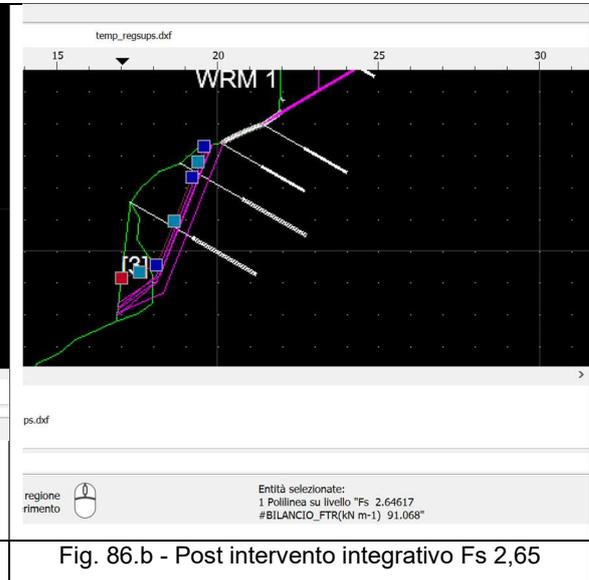


Fig. 86.b - Post intervento integrativo Fs 2,65

La mappa FEM mostra come la superficie individuata con Fs minimo risulta essere pari a 1,165 riferita alla coltre superficiale di alterazione pertanto trascurabile sia per spessori che per fattore di sicurezza fissato in  $Fs \geq 1,15$  da progetto:

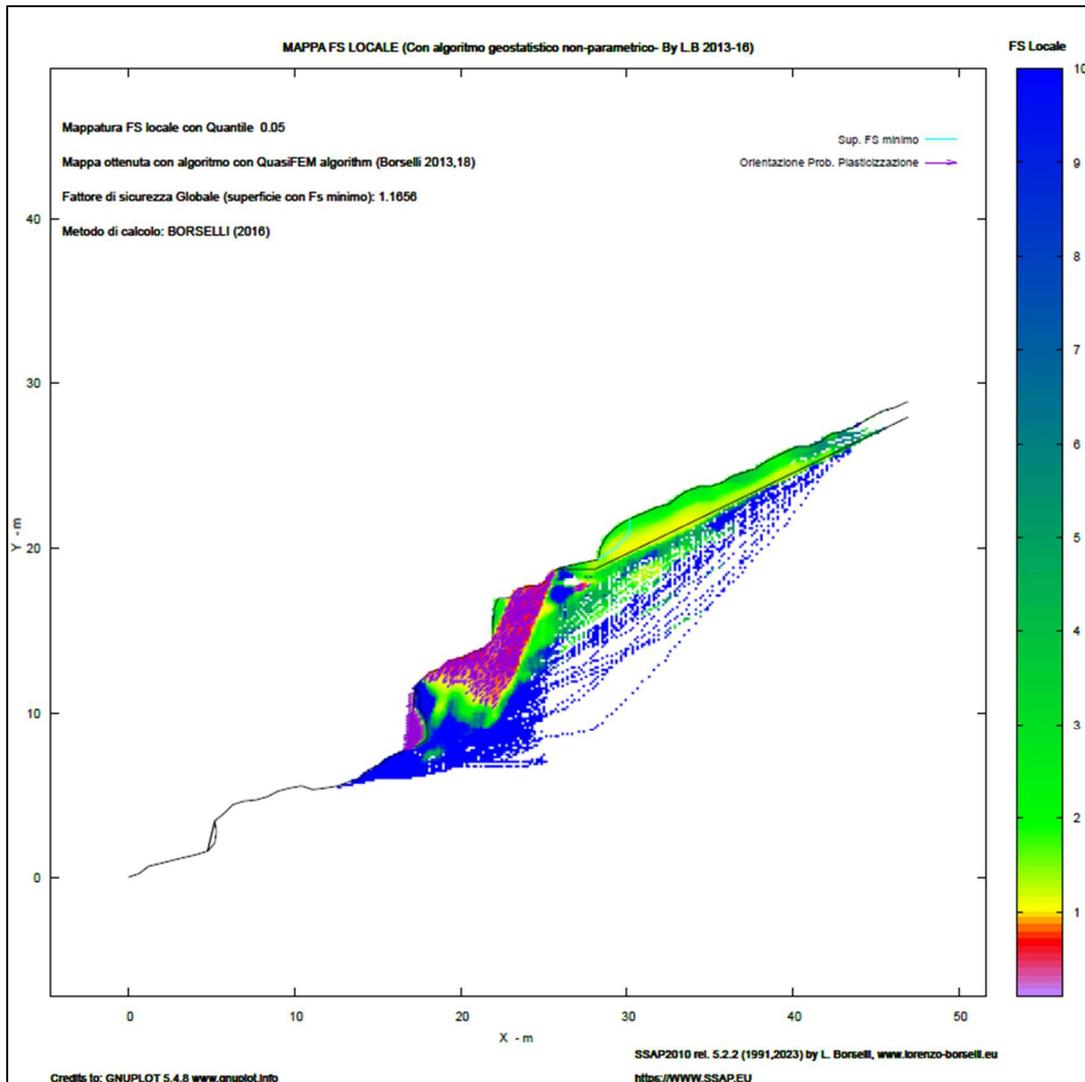


Fig.87 - Mappa a colori del Fs locale post interventi integrativi – sezione A-A'

#### TABELLA TIRANTI/ANCORAGGI

Beta(°) : Inclinazione ancoraggio - Angolo con orizzontale(Gradi) 30.00

L(m) : Lunghezza (m): 3.00 e 4.50 (integrativi rispetto agli interventi di somma urgenza)

T(kN/m) : Tensione di progetto 200.00

Lc(%) : % lunghezza cementata 50.00

#### TABELLA WIREMESH (RETI IN ADERENZA ANCORATE)

Tr(kN/m) : Resistenza limite a trazione rete 100.00

alpha(-) : Coefficiente di mobilitazione resistenza a trazione 0.10

epsilonR(-) : Coefficiente di deformazione limite a trazione 0.040

FsT(-) : Fs di progetto resistenza allo sfilamento dei rinforzi 1.00

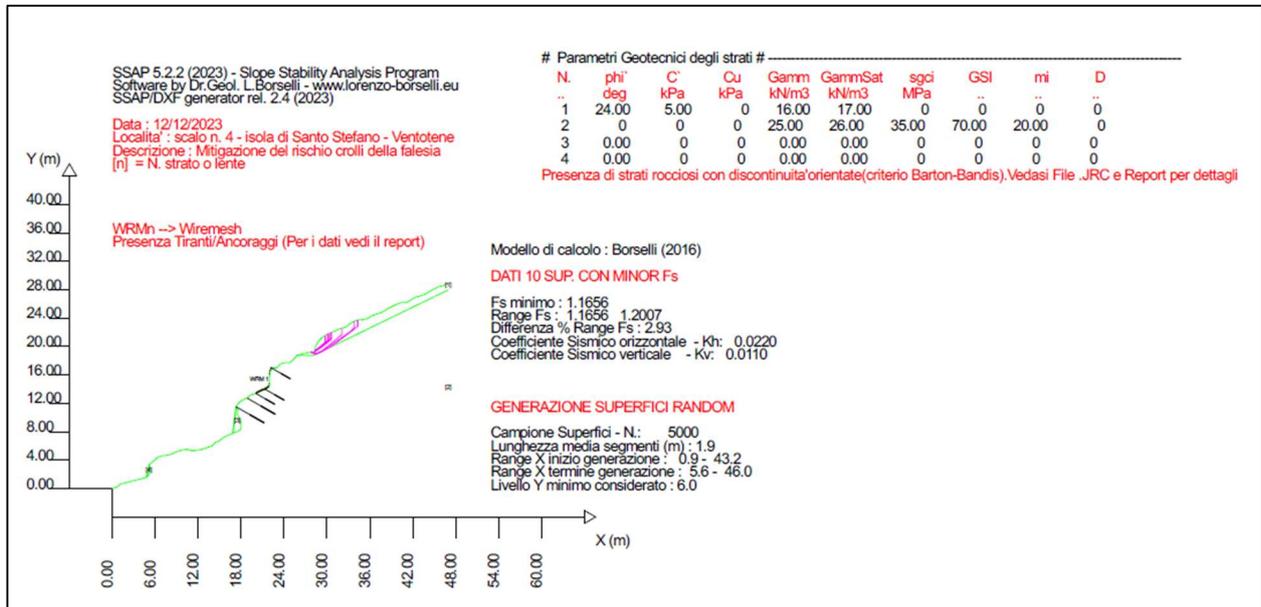


Fig. 88 Verifica post operam sezione A-A' scalo n.4, n.10 superfici con Fs minimo

### 13.3 Verifica di stabilità scalo n.4- Sezione B-B'

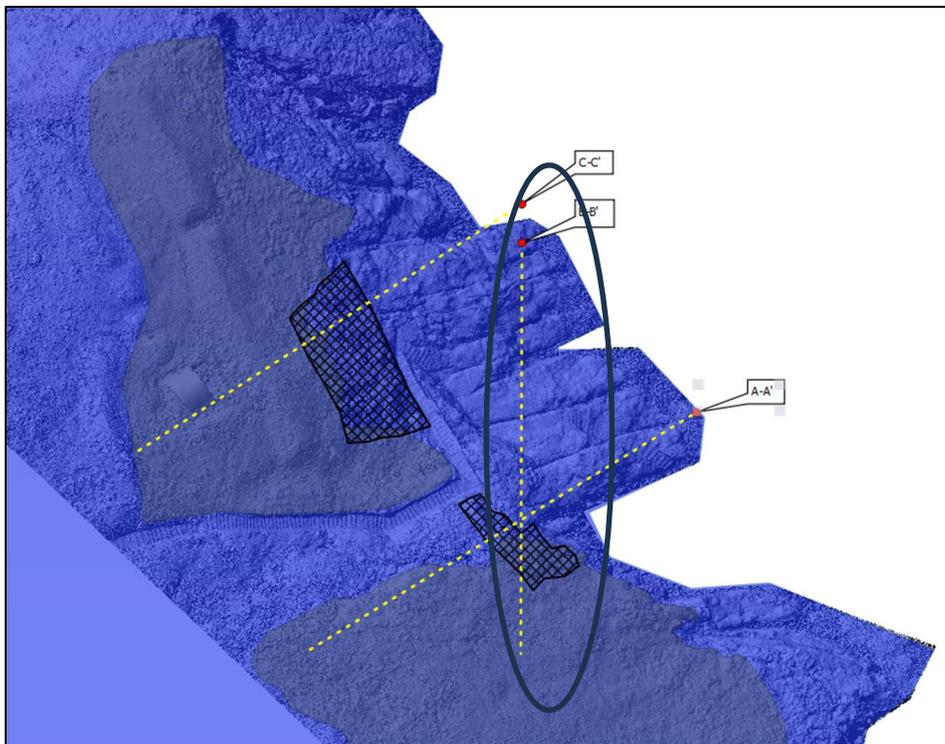


Fig.89 - Tracce delle sezioni per la verifica di stabilità globale del pendio – in evidenza la sezione B-B'

### ANTE OPERAM (B-B')

L'analisi eseguita con i parametri sopra riportati, per la sezione B-B', ha fornito un fattore di sicurezza minimo  $Fs=1,07$ .

Di seguito si mostra il risultato della verifica di stabilità globale B-B' elaborato con il metodo qFEM di Borselli:

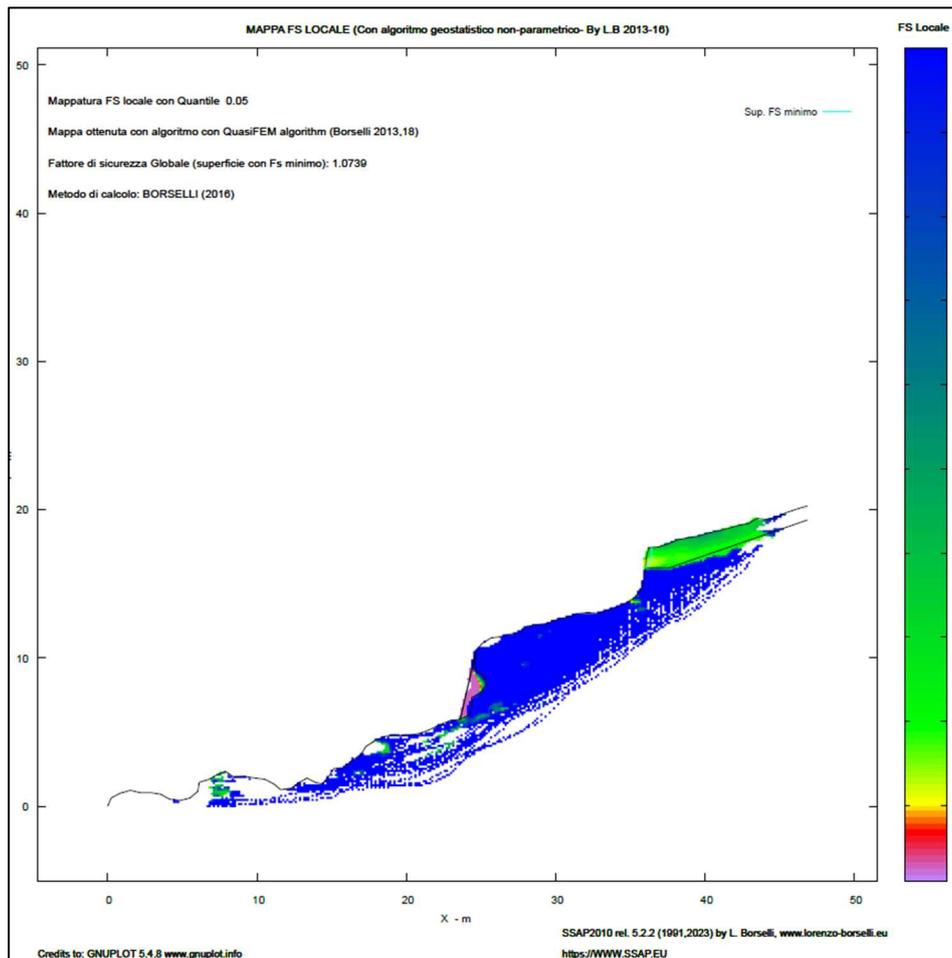


Fig.90 - Mappa Fs locale con individuazione della superficie con Fs minimo – sezione B-B'

Per completare le informazioni, di seguito, il risultato della verifica di stabilità della sezione B-B' che mostra le 10 superfici con fattore minimo; nell'immagine seguente sono anche mostrati i parametri di input e di ricerca (si noti come le superficie interessino uno spessore esiguo in prossimità del ciglio superiore della sezione ed in presenza di coltri regolitiche):

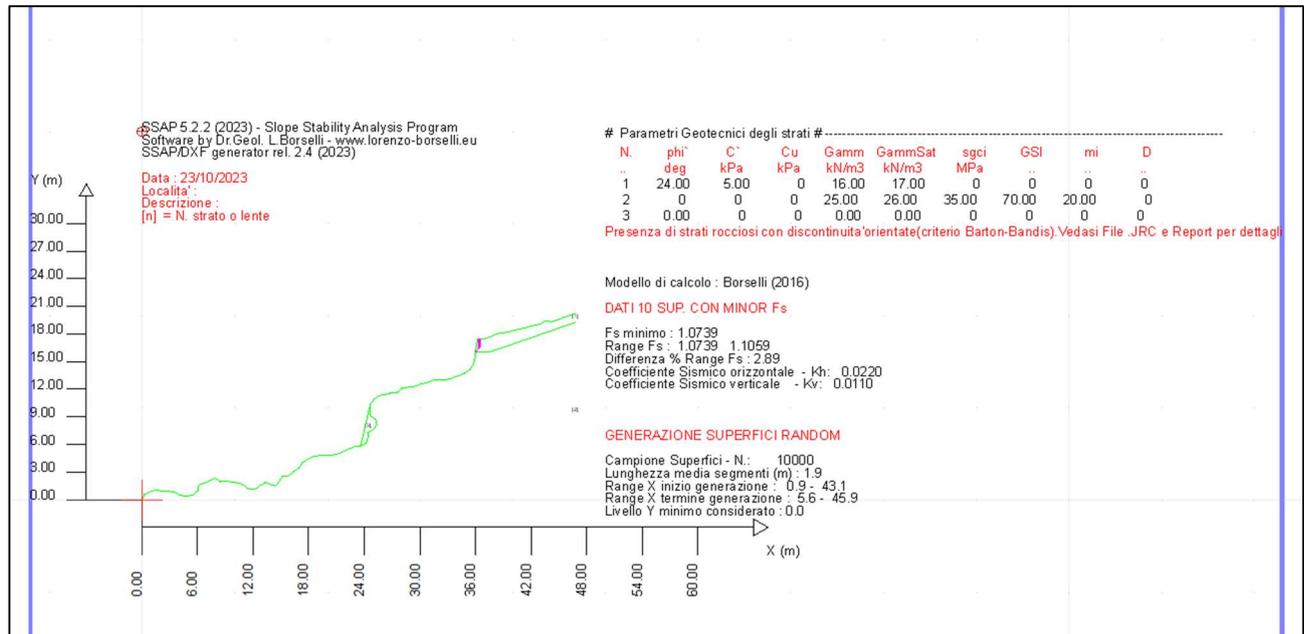


Fig. 91 – Esiti verifica di stabilità globale del pendio ante operam con evidenza delle n.10 superfici più critiche e parametri di input–sezione B-B’

### POST OPERAM (B-B’)

L’analisi post operam è stata eseguita, anche per la sezione B-B’, considerando la messa in opera di rete paramassi e barre di chiodature così come realizzate in somma urgenza. Il risultato ha fornito un fattore di sicurezza minimo  $F_s=1,44$  e quindi al di sopra di  $F_s \geq 1,15$  considerato come obiettivo del progetto nonché migliorativa rispetto a  $F_s=1,07$  dell’ante operam. **È necessario sottolineare che gli interventi sono volti a mitigare fenomenologie di dissesto locali come più volte descritte nei paragrafi precedenti.**

Di seguito si mostra il risultato della verifica di stabilità globale B-B’ post operam elaborato con il metodo qFEM di Borselli, una mappa a colori di un campo scalare del fattore FS locale generato con algoritmo quasi Gauss integration e analisi geostatistica non parametrica, basato su sistemi FEM di Schofield & p. Worth(1968) e Griffith et al. (1999):

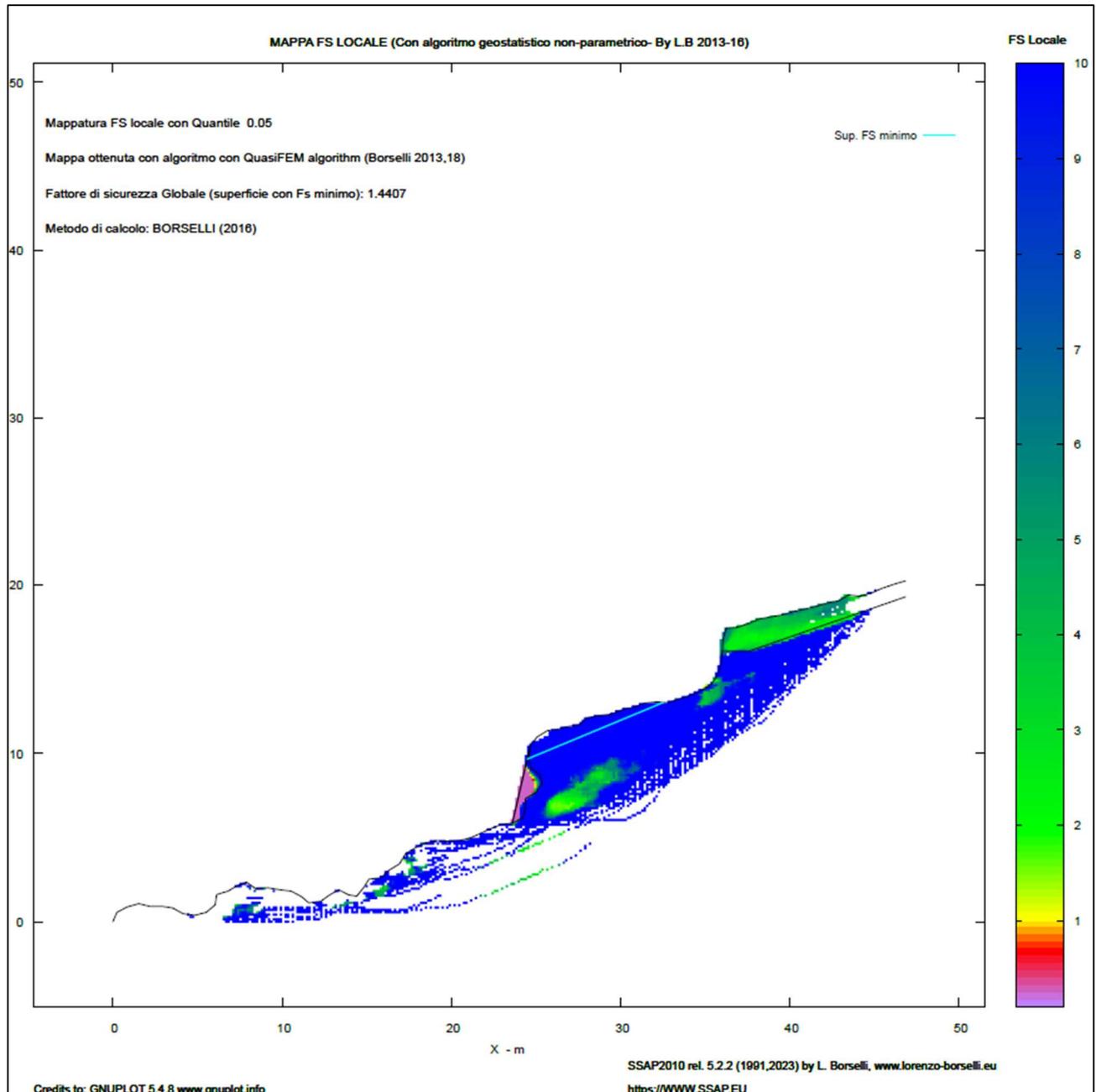


Fig.92 - Mappa Fs locale con individuazione delle superficie con Fs minimo – sezione B-B' post operam

Per completare le informazioni, di seguito, il risultato della verifica di stabilità post operam della sezione B-B' che mostra le 10 superfici con fattore minimo (tutte con  $Fs \geq 1,44$ ); per ogni ulteriore informazione si rimanda al report sintetico delle verifiche (codice elaborato 2017E037INV-02-D-GE-RPT001); le caratteristiche tecniche della rete e dei chiodi sono sintetizzate in tabella:

### TABELLA TIRANTI/ANCORAGGI

Beta(°) : Inclinazione ancoraggio - Angolo con orizzontale(Gradi) 30.00

L(m) : Lunghezza (m): 3.00 e 4.50

T(kN/m) : Tensione di progetto 200.00

Lc(%) : % lunghezza cementata 50.00

### TABELLA WIREMESH (RETI IN ADERENZA ANCORATE)

Tr(kN/m) : Resistenza limite a trazione rete 100.00

alpha(-) : Coefficiente di mobilitazione resistenza a trazione 0.10

epsilonR(-) : Coefficiente di deformazione limite a trazione 0.040

FsT(-) : Fs di progetto resistenza allo sfilamento dei rinforzi 1.00

nella immagine seguente sono anche mostrati i parametri di input e di ricerca,

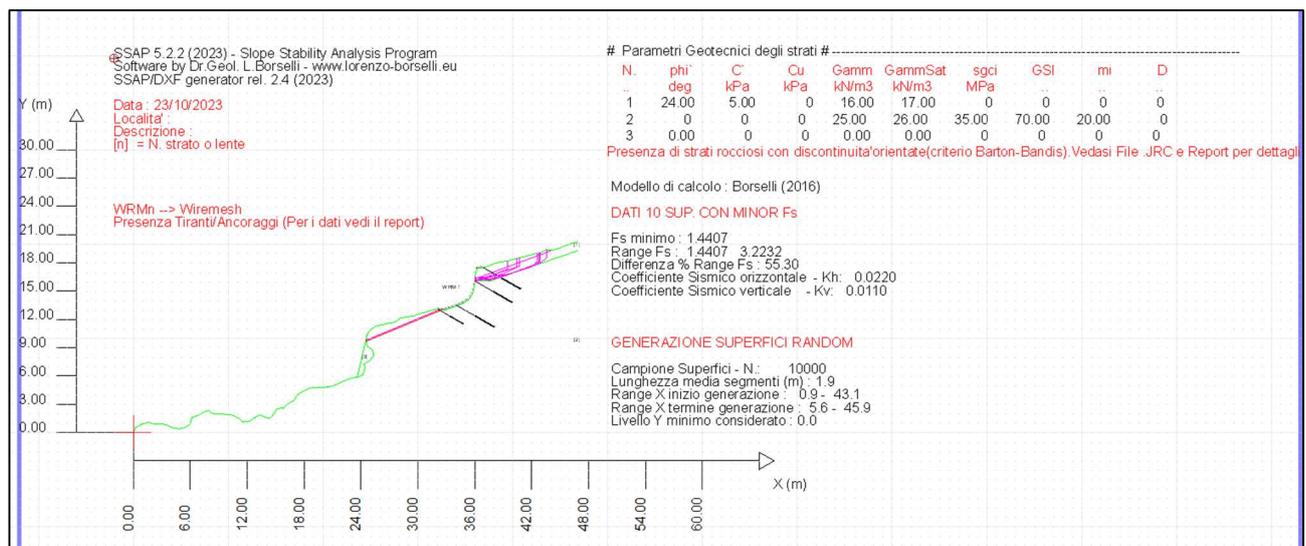


Fig. 93 – Esiti verifica di stabilità globale del pendio post operam con evidenza delle n.10 superfici più critiche e parametri di input–sezione B-B’

### 13.4 Verifica di stabilità scalo n.4 – Sezione C-C'

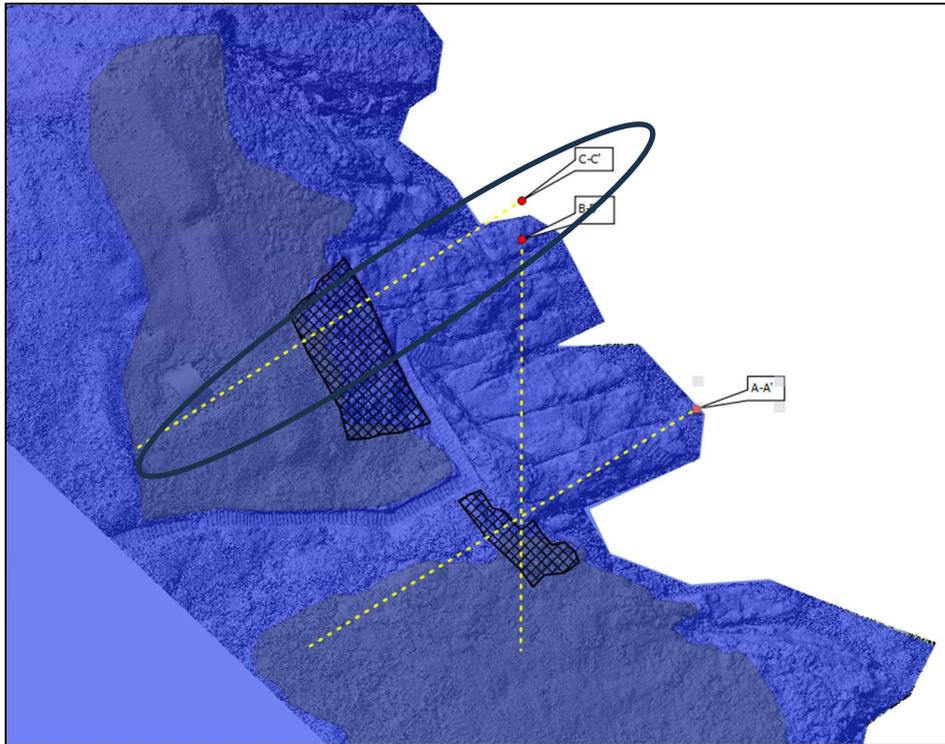


Fig.94 - Tracce delle sezioni per la verifica di stabilità globale del pendio – in evidenza la sezione C-C'

#### **ANTE OPERAM (C-C')**

L'analisi eseguita con i parametri sopra riportati, per la sezione B-B', ha fornito un fattore di sicurezza minimo  $F_s=1,37$  pertanto superiore a  $F_s \geq 1,15$  considerato  $F_s$  da progetto (target da raggiungere).

Di seguito si mostra il risultato della verifica di stabilità globale B-B' elaborato con il metodo qFEM di Borselli:

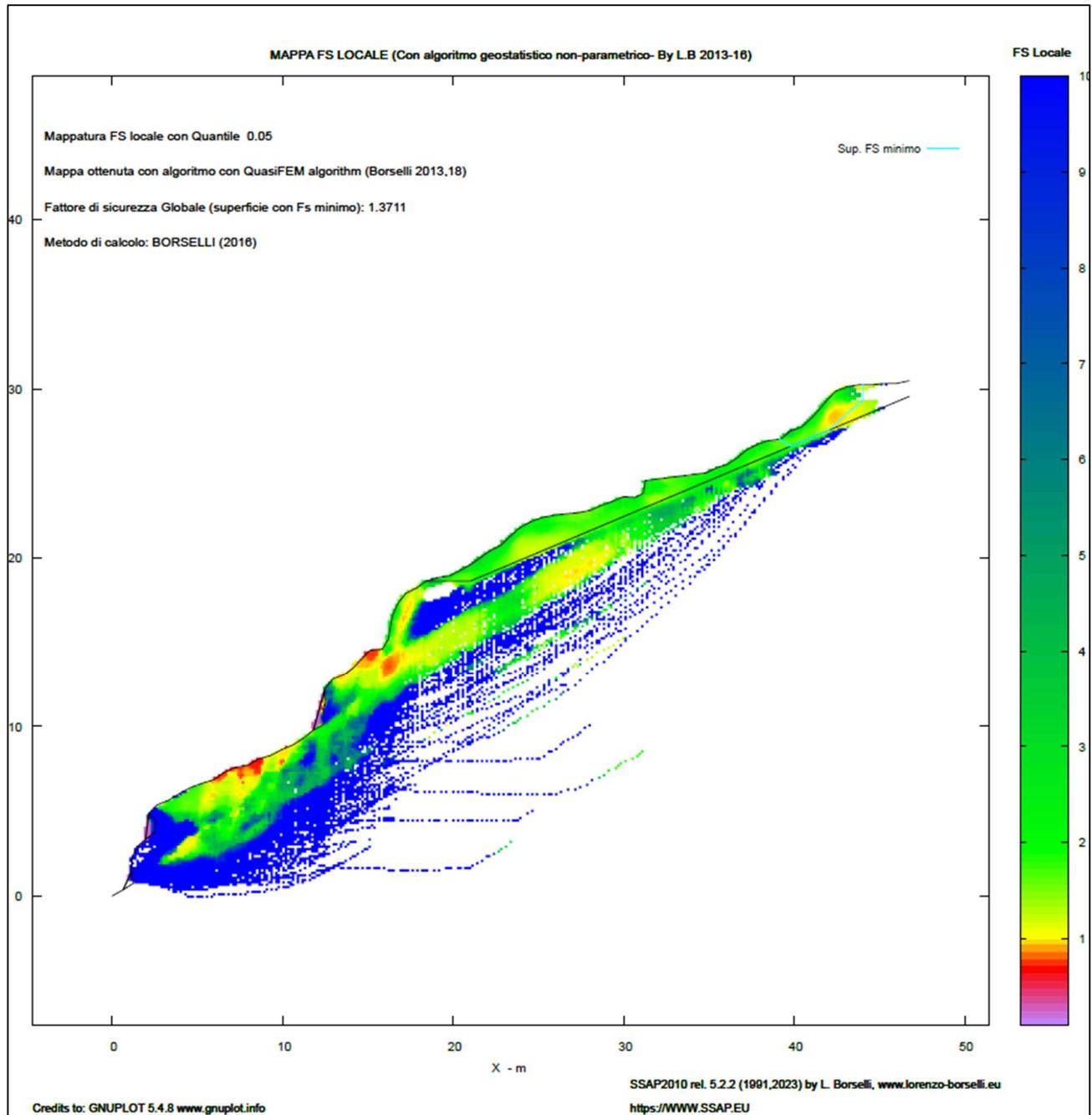


Fig. 95 - Mappa Fs locale con individuazione delle superficie con Fs minimo – sezione C-C' ante operam

Per completare le informazioni, di seguito, il risultato della verifica di stabilità della sezione C-C' che mostra le 10 superfici con fattore minimo (tutte con  $F_s \geq 1,15$ ); nell'immagine seguente sono anche mostrati i parametri di input e di ricerca:

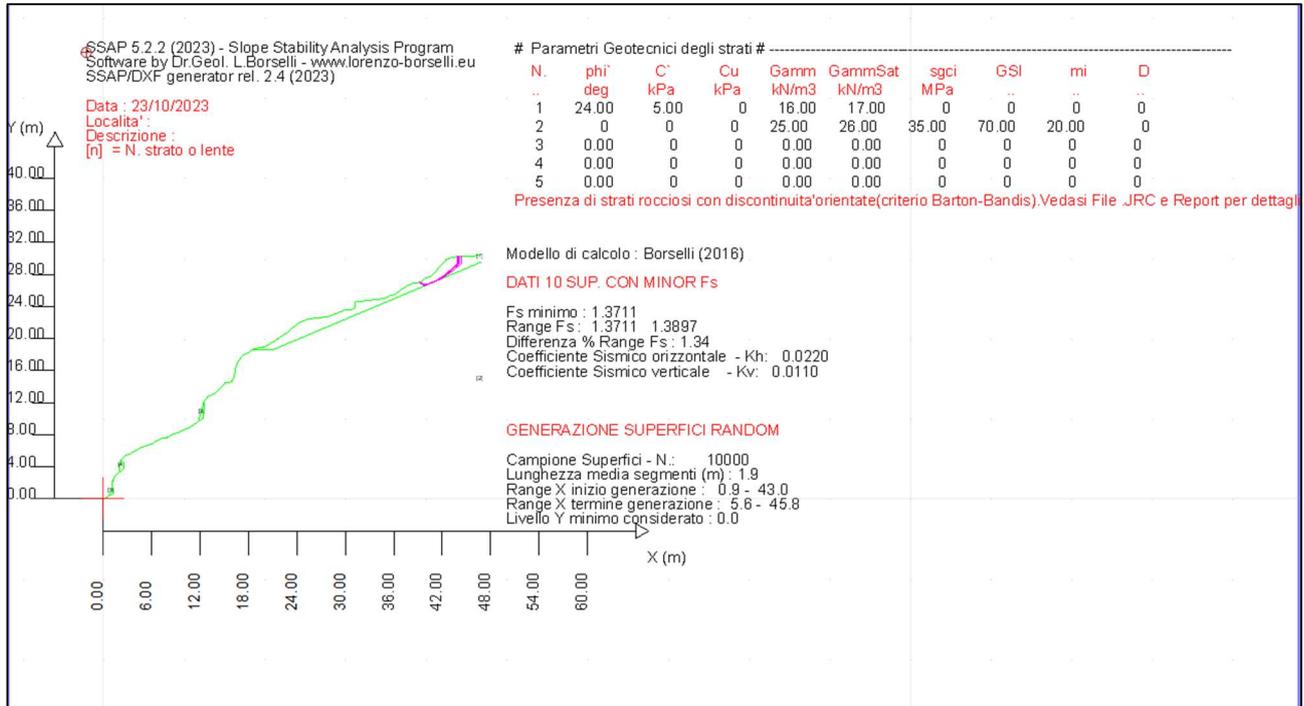


Fig. 96 – Esiti verifica di stabilità globale del pendio ante operam con evidenza delle n.10 superfici più critiche e parametri di input–sezione C-C’

Nell'immagine precedente si può notare che le superfici con Fs minimo, comunque con Fs superiori al target di progetto  $Fs=1,15$ , non riguardano le aree di intervento. Visti gli esiti delle verifiche, in corrispondenza della sezione B-B', non si ritengono necessari interventi integrativi rispetto a quelli già realizzati.

### POST OPERAM (C-C')

L'analisi post operam è stata eseguita, anche per la sezione C-C', considerando la messa in opera di rete paramassi e barre di chiodature così come previste da progetto. Il risultato ha fornito un fattore di sicurezza minimo  $Fs=1,37$  in funzione anche delle aree al di fuori dell'intervento in somma urgenza. Si può notare come nelle zone d'intervento della somma urgenza, pur essendo verificate con Fs molto alti si è comunque raggiunto un Fs superiori (vedi esempio immagine seguente da  $Fs=3.9$  a  $Fs=4.9$ )

**È necessario sottolineare che gli interventi sono volti a mitigare fenomenologie di dissesto locali come più volte descritte nei paragrafi precedenti.**

Di seguito si mostra il risultato della verifica di stabilità globale C-C' post operam elaborato con il metodo qFEM di Borselli, una mappa a colori di un campo scalare del fattore FS locale generato

con algoritmo quasi Gauss integration e analisi geostatistica non parametrica, basato su sistemi FEM di Schofield & p. Worth(1968) e Griffith et al. (1999):

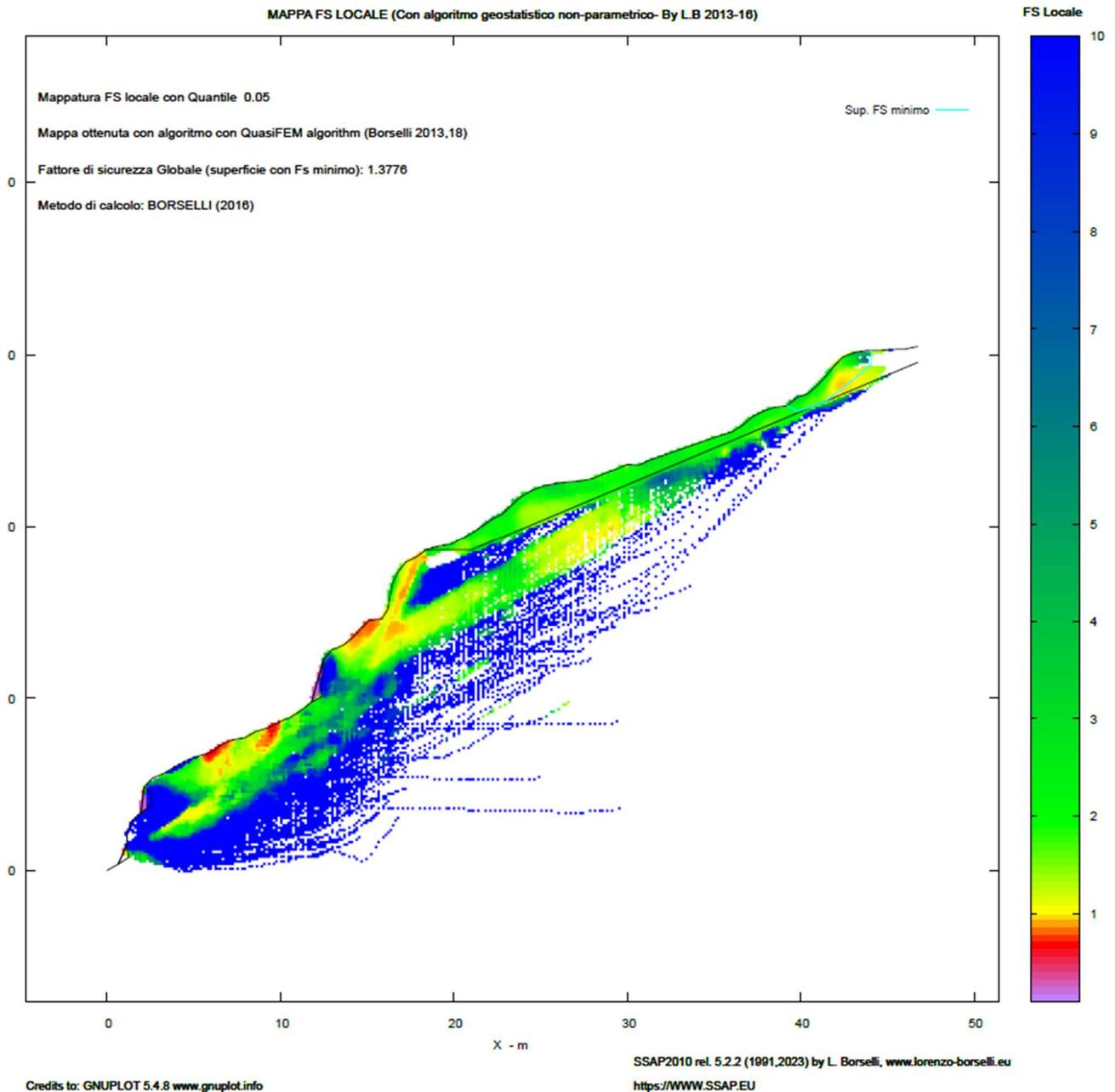


Fig. 97 - Mappa Fs locale con individuazione delle superficie con Fs minimo – sezione C-C' post operam

Di seguito un confronto dell'ante e post in corrispondenza di una delle superfici in zona intervento:

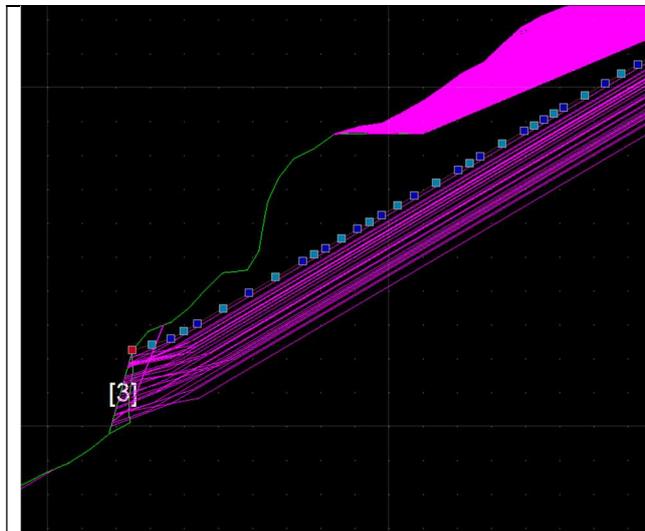


Fig.98.a -  $F_s=3.9$  ante

Entità selezionate:  
1 Polilinea su livello "Fs 3.97458 #BILANCIO\_FTR(MI m-1) 1321.668"

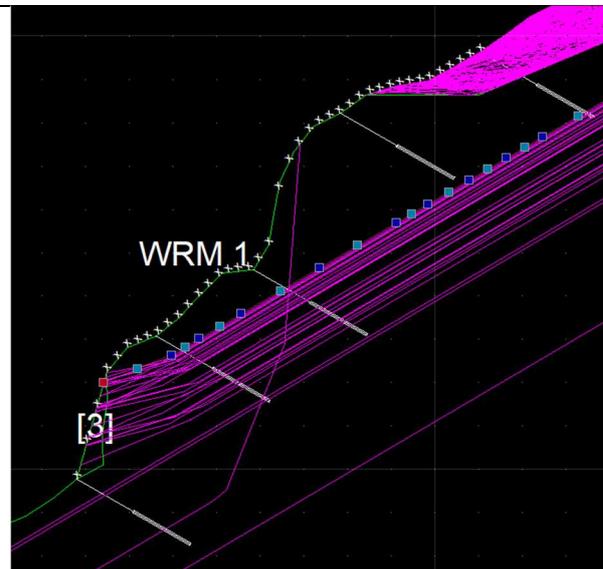


Fig.99.b-  $F_s=4.9$  post (stessa superficie della figura 60.a)

Entità selezionate:  
1 Polilinea su livello "Fs 4.94318 #BILANCIO\_FTR(MI m-1) 1918.730"

Per completare le informazioni, di seguito, il risultato della verifica di stabilità post operam della sezione C-C' che mostra le 10 superfici con fattore minimo (tutte con  $F_s \geq 1,37$ ); per ogni ulteriore informazione si rimanda al report sintetico delle verifiche (codice elaborato 2017E037INV-02-D-GE-RPT001); le caratteristiche tecniche della rete e dei chiodi sono sintetizzate in tabella:

#### TABELLA TIRANTI/ANCORAGGI

Beta(°) : Inclinazione ancoraggio - Angolo con orizzontale(Gradi) 30.00

L(m) : Lunghezza (m): 3.00

T(kN/m) : Tensione di progetto 200.00

Lc(%) : % lunghezza cementata 50.00

#### TABELLA WIREMESH (RETI IN ADERENZA ANCORATE)

Tr(kN/m) : Resistenza limite a trazione rete 100.00

alpha(-) : Coefficiente di mobilitazione resistenza a trazione 0.10

epsilonR(-) : Coefficiente di deformazione limite a trazione 0.040

FsT(-) :  $F_s$  di progetto resistenza allo sfilamento dei rinforzi 1.00

nella immagine seguente sono anche mostrati i parametri di input e di ricerca,

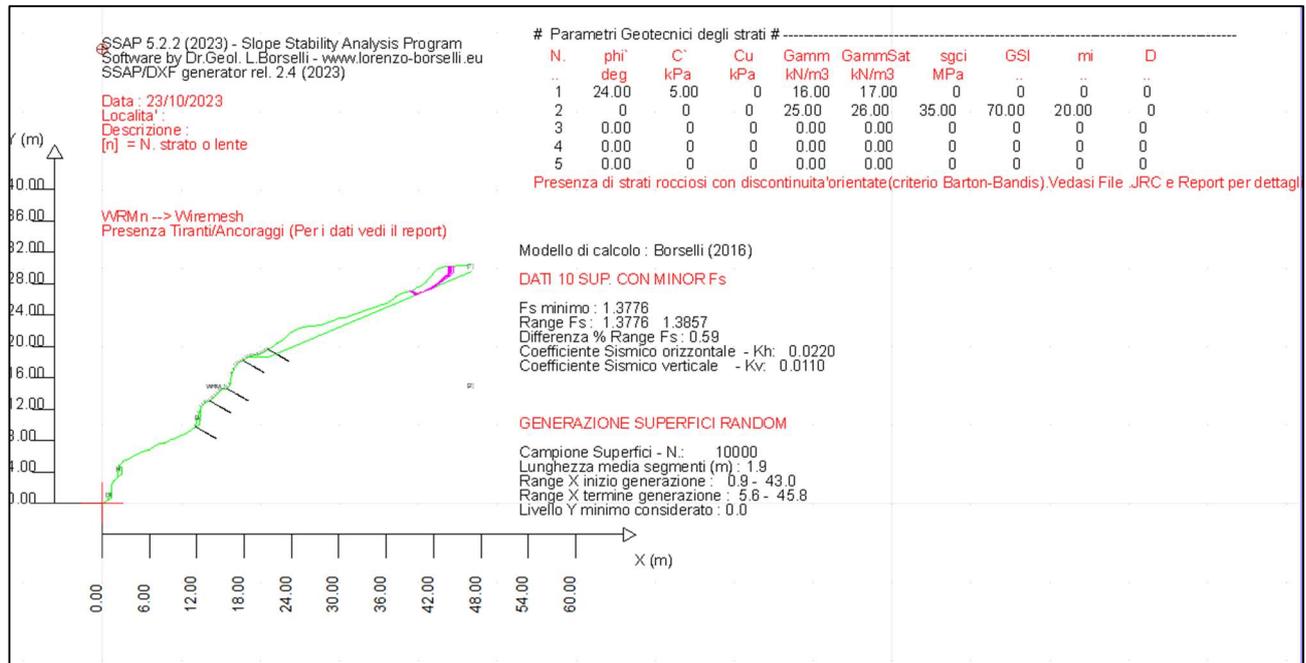


Fig. 100 – Esiti verifica di stabilità globale del pendio post operam con evidenza delle n.10 superfici più critiche e parametri di input–sezione C-C’

Si noti come le superfici critiche della sezione C-C’ ante e post riguardano aree al di fuori dell’intervento in somma urgenza e comunque fanno registrare fattori di sicurezza Fs che indicano stabilità della sezione analizzata. Visti gli esiti delle verifiche, in corrispondenza della sezione C-C’, non si ritengono necessari interventi integrativi rispetto a quelli già realizzati.

### 13.5 Generalità Verifica di stabilità scalo Marinella

Le verifiche sono state effettuate su n.4 sezioni presso lo scalo Marinella di cui n.3 disposte monte valle e n.1 disposta trasversalmente al pendio. Le sezioni includono le aree perimetrare a rischio frana A del PAI ed in particolare i poligoni TSAS1 e TSAS46; inoltre, per ottemperare alla richiesta dell’A.B.D.A.C. di valutare la cavità antropica presente presso lo scalo, è stata inclusa nelle sezioni C-C’ e D-D’ l’impronta in sezione della cavità ottenuta grazie al rilievo laser scanner terrestre (per approfondimenti si rimanda alle indagini integrative).

Per tutte le verifiche sono stati impostati i seguenti parametri:

Metodo di calcolo Borselli 2016: nuovo metodo di calcolo sviluppato come una evoluzione e generalizzazione del metodo di calcolo di *Chen-Morgestern* (1983), che a sua volta fu una

evoluzione e generalizzazione di quello ben noto di *Morgestern –Price* (1965), secondo Duncan et al. (2014)

Metodo di ricerca delle superfici *Sniff Random Search* (Borselli 1997, 2021): consente di generare superfici di forma libera e quindi valorizzare il passaggio tra strati che evidenziano debolezze geomeccaniche

Condizioni Pseudostatiche secondo NTC2018 con utilizzo dei coefficienti sismici orizzontale  $K_h$  e verticale  $K_v$

Opzione – effetto tension crack consente la ricerca di eventuali giunti di trazione in testa al pendio in terreni con presenza di coesione drenata e non drenata nonché in ammassi rocciosi fratturati  
Nota bene: *le quote delle sezioni sono relative e non espresse s.l.m. in quanto il software non riconosce quote negative; gli aggetti in roccia sono stati simulati dal punto di vista geotecnico come una "lente" con caratteristiche geotecniche prossime allo zero in quanto il software riconosce solo quote dell'ascissa crescenti.*

### 13.6 Verifica di stabilità scalo Marinella – Sezione A-A'

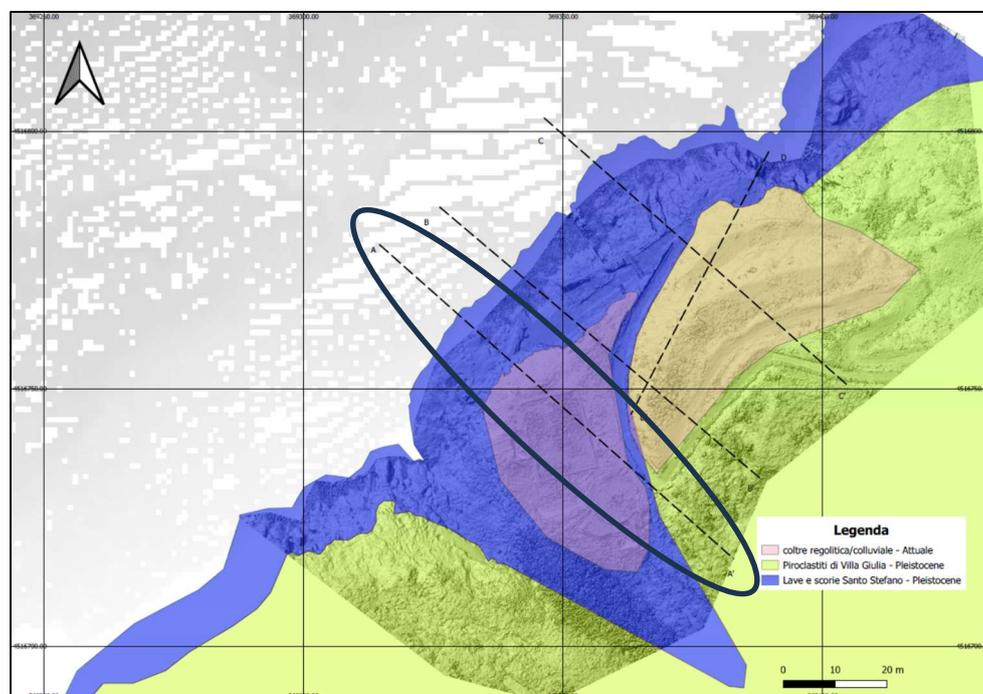


Fig. 101 - Tracce delle sezioni per la verifica di stabilità globale del pendio – in evidenza la sezione A-A'

## ANTE OPERAM (A-A')

L'analisi eseguita con i parametri sopra riportati, per la sezione A-A', ha fornito un fattore di sicurezza minimo  $F_s=1,2$ , quindi in linea con l'obiettivo progettuale  $F_s \geq 1,15$ , considerato  $F_s$  da progetto (target da raggiungere).

Di seguito si mostra il risultato della verifica di stabilità globale A-A' elaborato con il metodo qFEM di Borselli, una mappa a colori di un campo scalare del fattore FS locale generato con algoritmo quasi Gauss integration e analisi geostatistica non parametrica, basato su sistemi FEM di Schofield & p. Worth(1968) e Griffith et al. (1999):

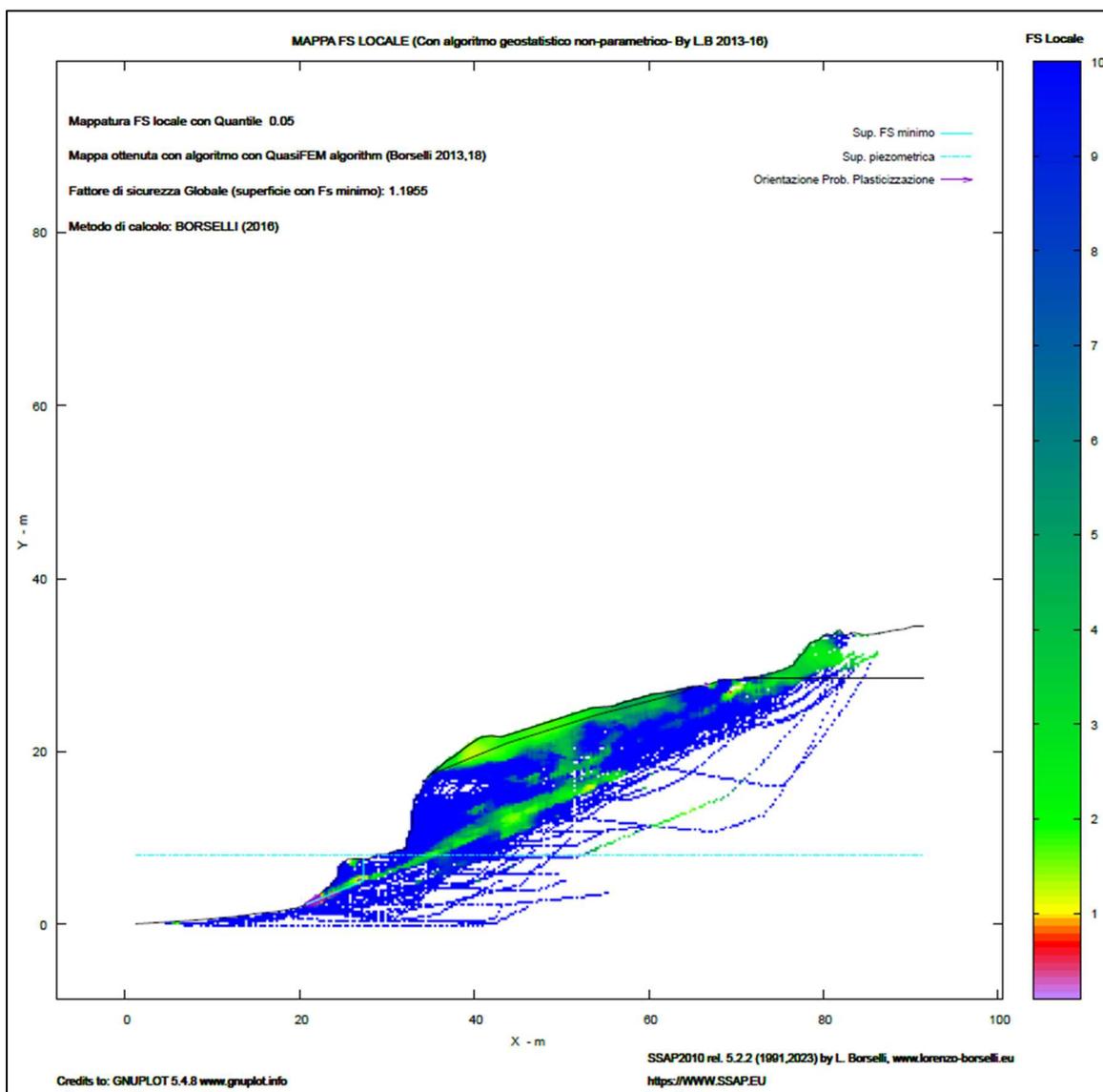


Fig. 102 - Mappa Fs locale con individuazione della superficie con Fs minimo – sezione A-A'

Di seguito si mostra inoltre la mappa a colori delle pressioni neutre generate dal livello medio

mare e dalla falda; la quota del l.m.m. è stata considerata come livello freatico all'interno dell'ammasso roccioso:

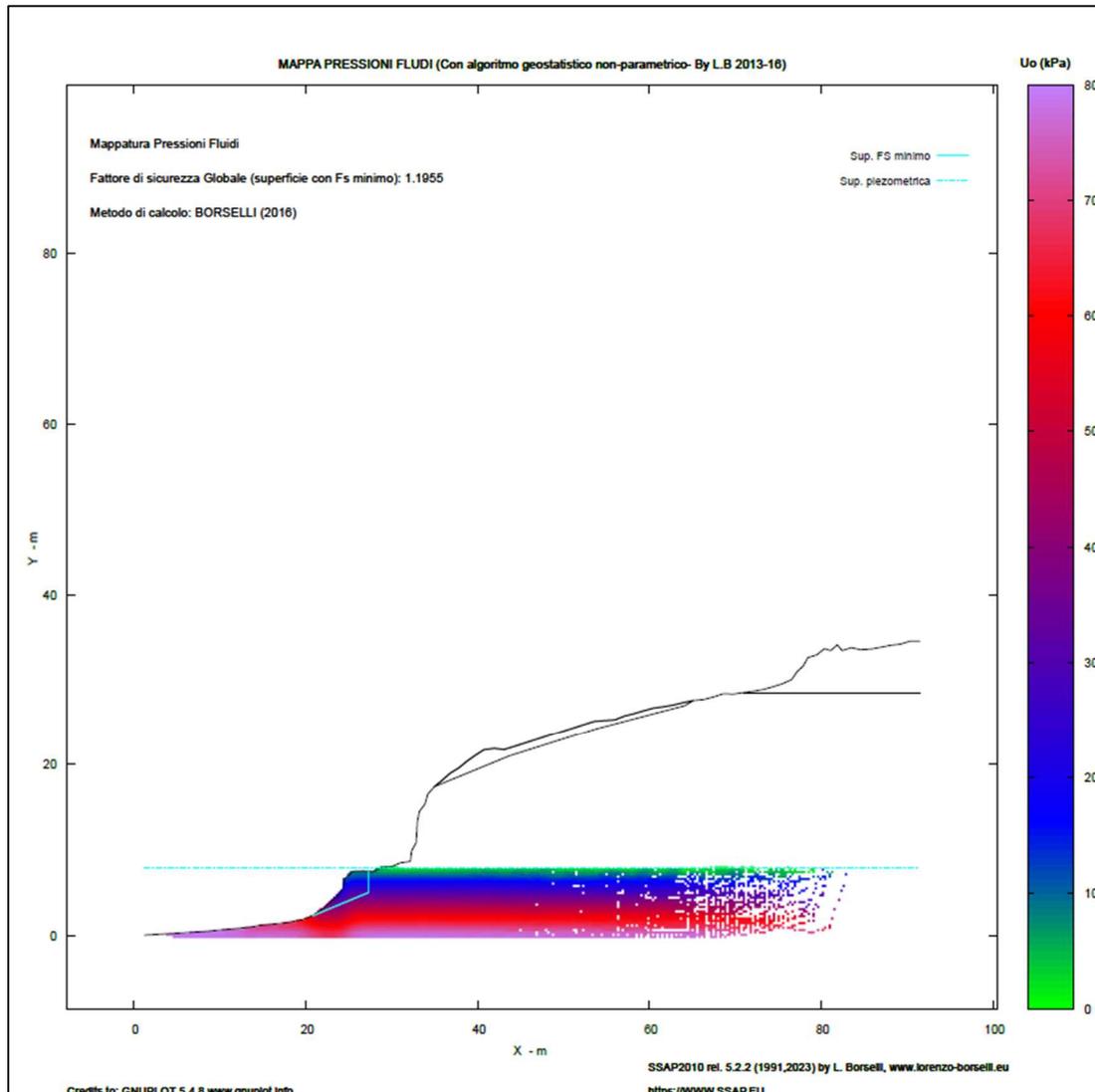


Fig. 103 - Mappa a colori delle pressioni neutre – sezione A-A'

Per completare le informazioni, di seguito, il risultato della verifica di stabilità della sezione A-A' che mostra le 10 superfici con fattore minimo (tutte superiori a  $F_s \geq 1,15$  a parte quella minima); nella immagine seguente sono anche mostrati i parametri di input e di ricerca:

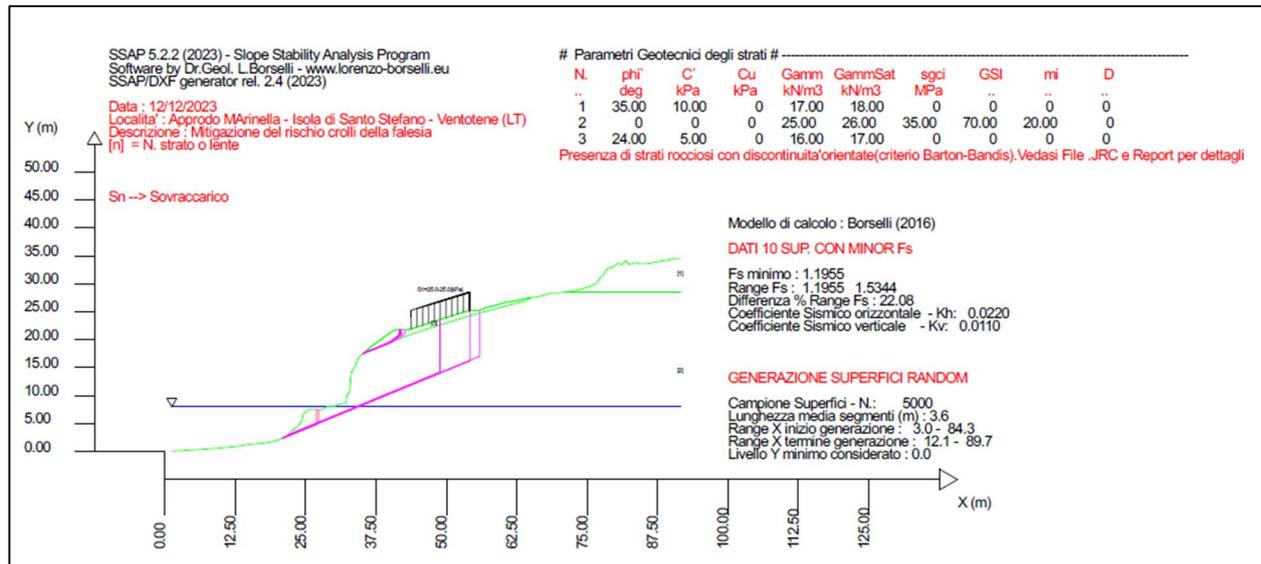


Fig. 104 – Esiti veridica di stabilità ante operam, in evidenza le n.10 suoperfici con Fs minore – sezione A-A'

## POST OPERAM (A-A')

L'analisi post operam è stata eseguita, per la sezione A-A', considerando la messa in opera di rete paramassi e barre di chiodature così come previste da progetto. Il risultato ha fornito, un fattore di sicurezza minimo  $F_s=1,86$  e quindi al di sopra di  $F_s \geq 1,15$  considerato come obiettivo del progetto. **È necessario sottolineare che gli interventi sono volti a mitigare fenomenologie di dissesto locali come più volte descritte nei paragrafi precedenti.**

Di seguito si mostra il risultato della verifica di stabilità globale A-A' post operam elaborato con il metodo qFEM di Borselli, una mappa a colori di un campo scalare del fattore FS locale generato con algoritmo quasi Gauss integration e analisi geostatistica non parametrica, basato su sistemi FEM di Schofield & p. Worth(1968) e Griffith et al. (1999):

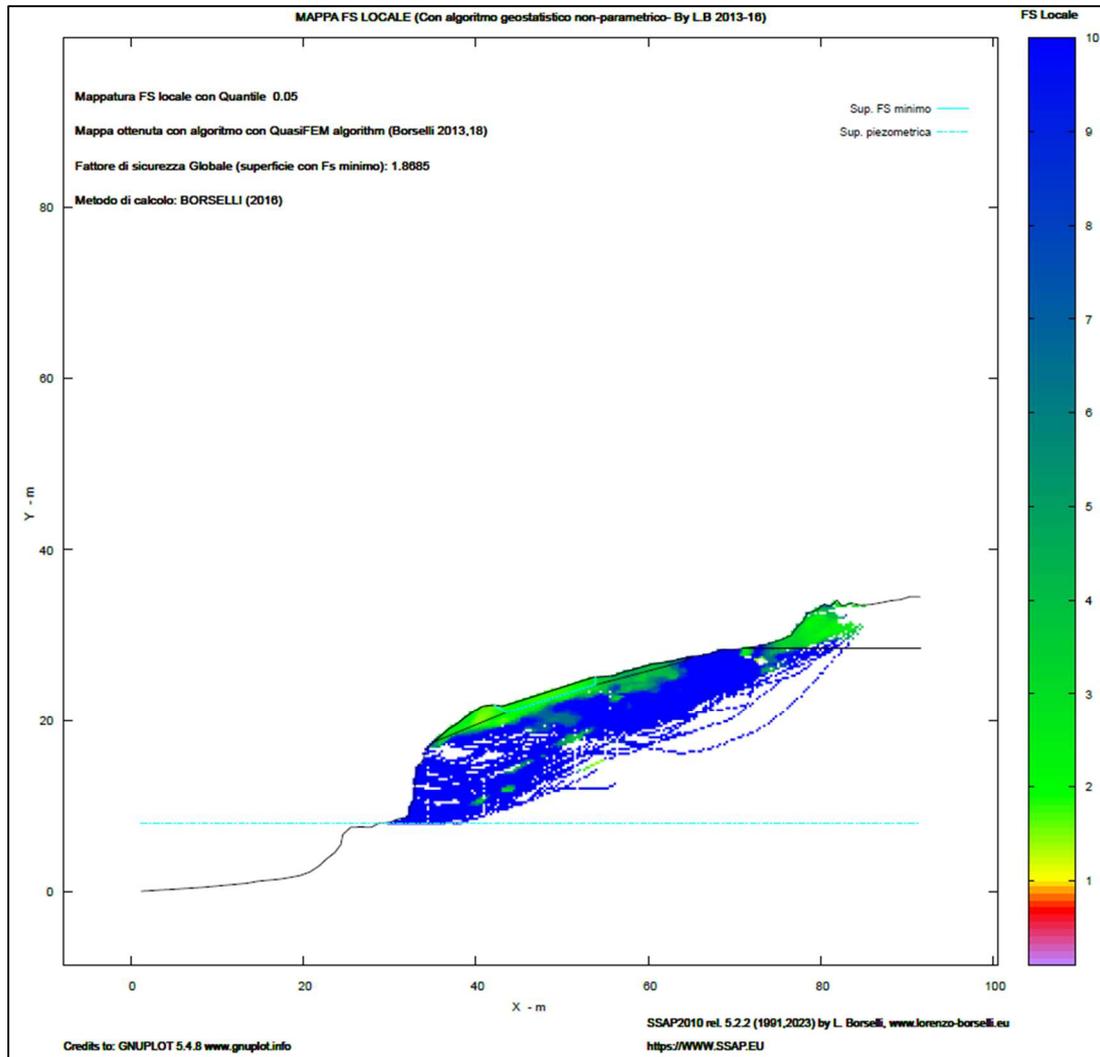


Fig. 105 - Mappa Fs locale con individuazione della superficie con Fs minimo – sezione A-A' post operam

Per completare le informazioni, di seguito, il risultato della verifica di stabilità post operam della sezione A-A' che mostra le 10 superfici con fattore minimo (tutte con  $F_s \geq 1,86$ ); per ogni ulteriore informazione si rimanda al report sintetico delle verifiche (2017E037INV-02-D-GE-RPT001); le caratteristiche tecniche della rete e dei chiodi sono sintetizzate in tabella:

#### TABELLA TIRANTI/ANCORAGGI

Beta(°) : Inclinazione ancoraggio - Angolo con orizzontale(Gradi) 10.00  
 L(m) : Lunghezza (m): 6.00  
 T(kN/m) : Tensione di progetto 200.00  
 Lc(%) : % lunghezza cementata 50.00

#### TABELLA WIREMESH (RETI IN ADERENZA ANCORATE)

- Tr(kN/m) : Resistenza limite a trazione rete 100.00  
 alpha(-) : Coefficiente di mobilitazione resistenza a trazione 0.10  
 epsilonR(-) : Coefficiente di deformazione limite a trazione 0.040  
 FsT(-) : Fs di progetto resistenza allo sfilamento dei rinforzi 1.00

Nell'immagine seguente sono anche mostrati i parametri di input e di ricerca:

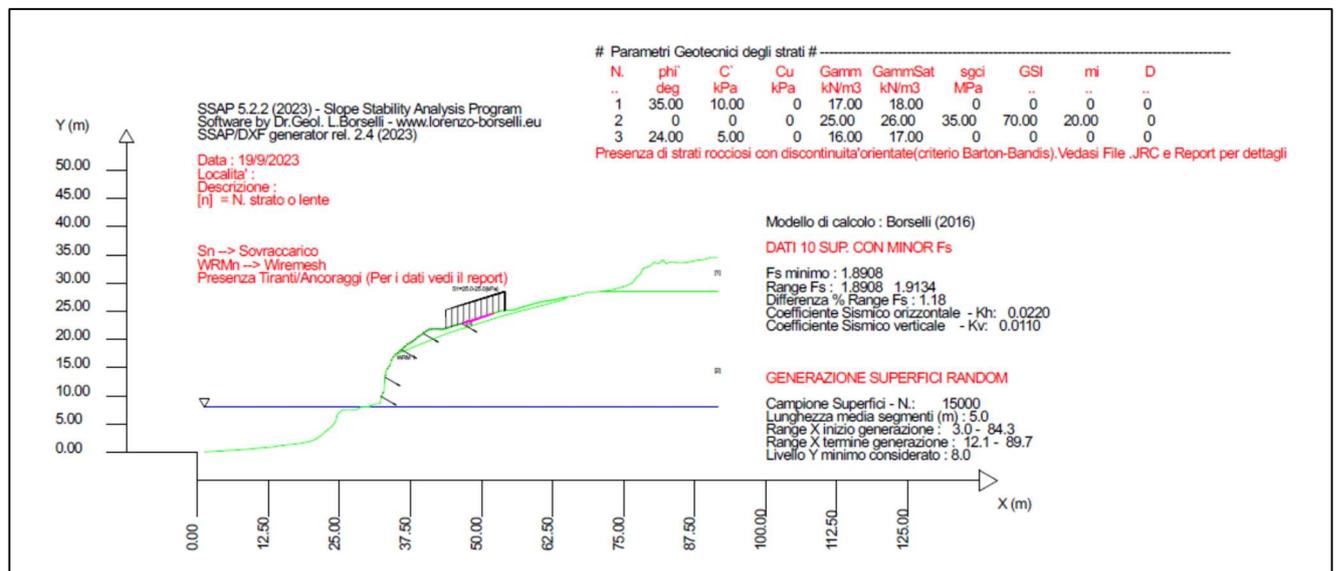


Fig. 106 - Esiti verifica di stabilita' post operam, in evidenza le n.10 superfici con Fs minore - sezione A-A'

### 13.7 Verifica di stabilità scalo Marinella – Sezione B-B'

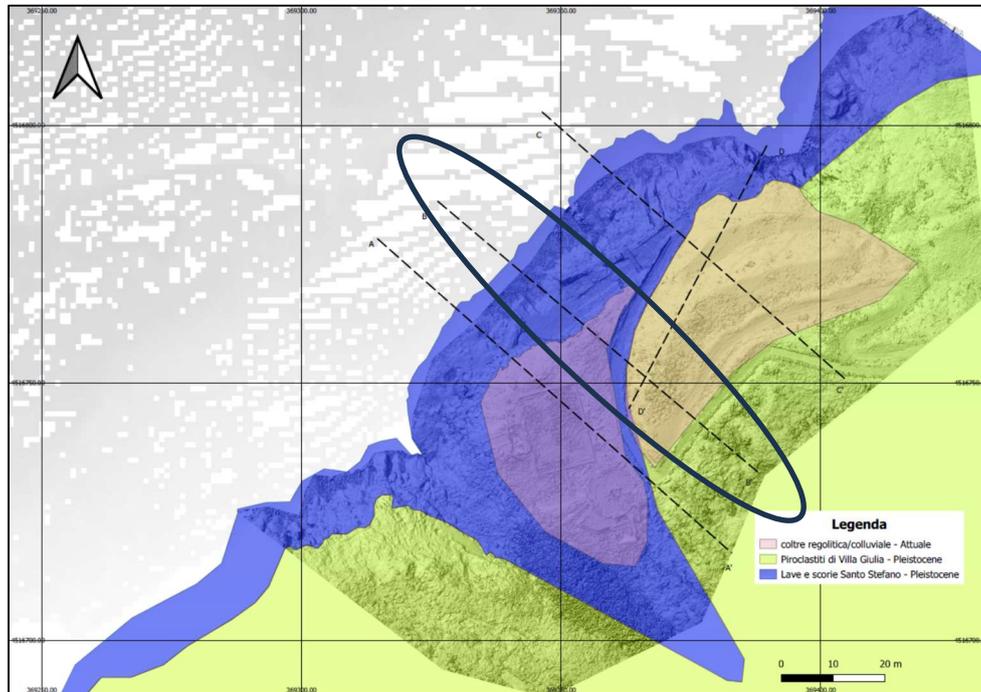


Fig. 107 - Tracce delle sezioni per la verifica di stabilità globale del pendio – in evidenza la sezione B-B'

#### ANTE OPERAM (B-B')

L'analisi eseguita con i parametri sopra riportati, per la sezione B-B', ha fornito un fattore di sicurezza minimo  $F_s=1,21$  pertanto superiore a  $F_s \geq 1,15$  considerato  $F_s$  da progetto (target da raggiungere).

Di seguito si mostra il risultato della verifica di stabilità globale B-B' elaborato con il metodo qFEM di Borselli:

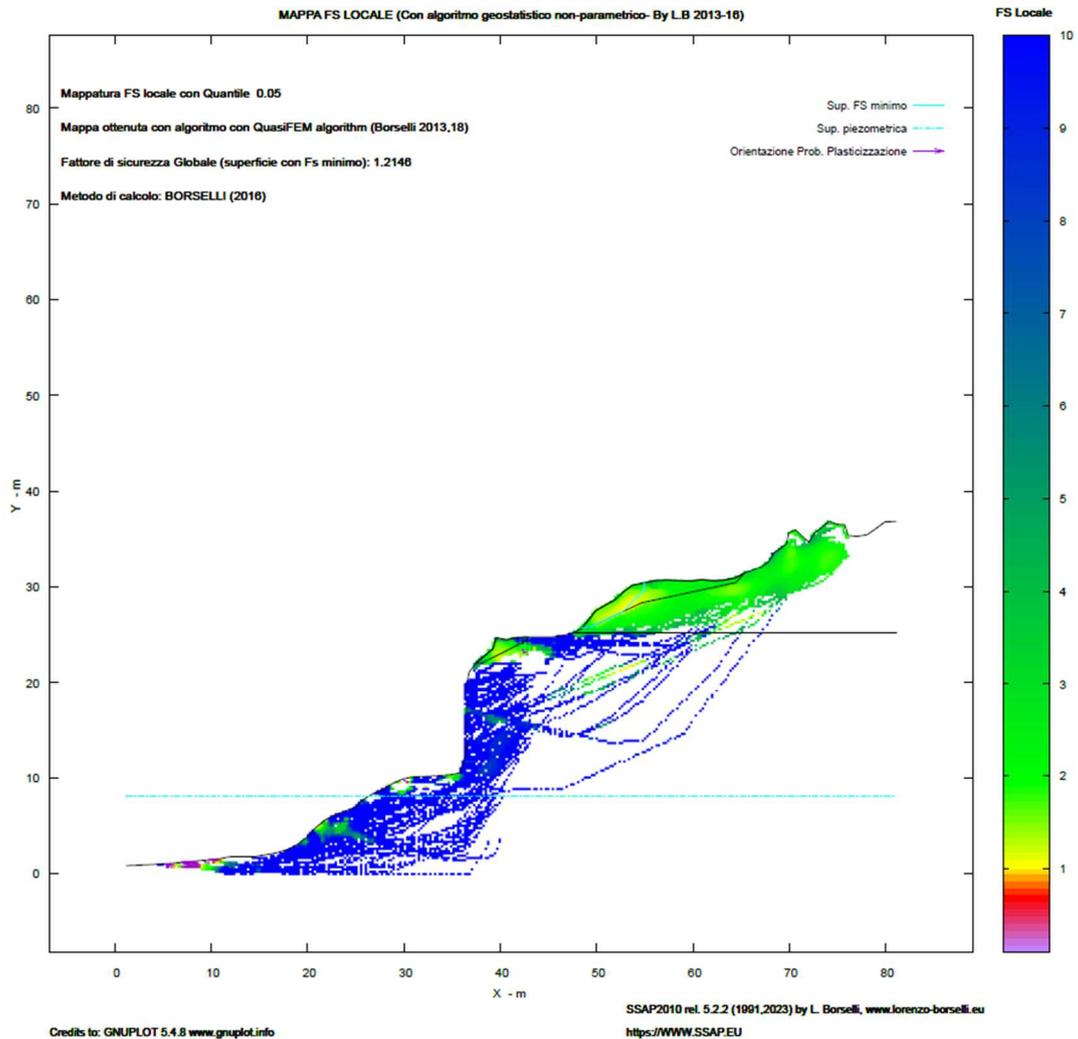


Fig. 108 - Mappa Fs locale con individuazione della superficie con Fs minimo – sezione B-B'

Di seguito si mostra inoltre la mappa a colori delle pressioni neutre generate dal livello medio mare; e dalla falda; la quota del l.m.m. è stata considerata come livello freatico all'interno dell'ammasso roccioso:

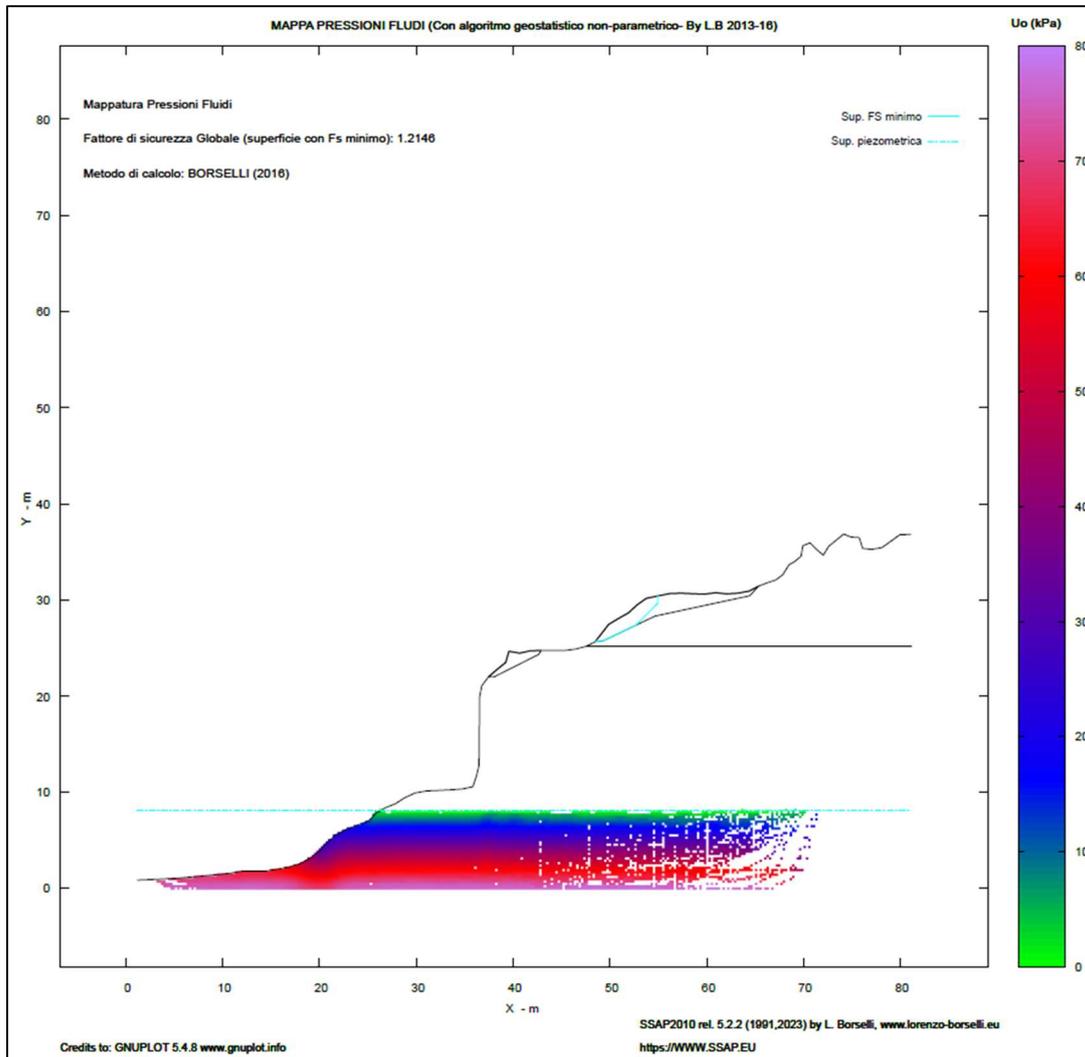


Fig. 109 - Mappa a colori delle pressioni neutre – sezione B-B'

Per completare le informazioni, di seguito, il risultato della verifica di stabilità della sezione B-B' che mostra le 10 superfici con fattore minimo (tutte con  $F_s \geq 1,15$ ); nell'immagine seguente sono anche mostrati i parametri di input e di ricerca:

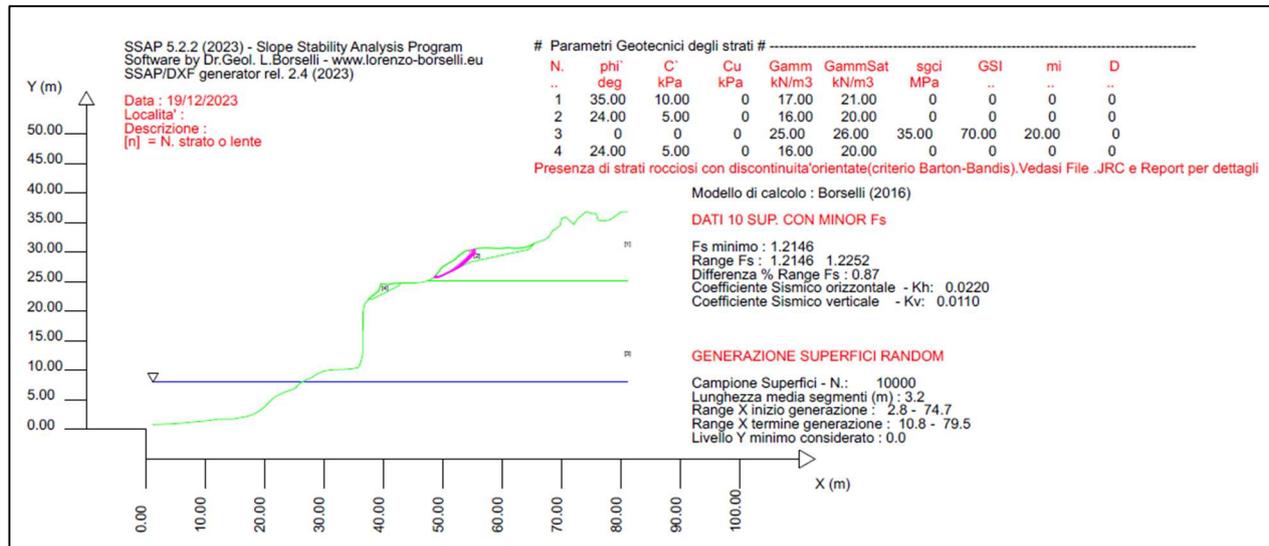


Fig.110 - Esiti verifica di stabilità ante operam, in evidenza le n.10 superfici con Fs minore – sezione B-B'

## POST OPERAM (B-B')

L'analisi post operam è stata eseguita, anche per la sezione B-B', considerando la messa in opera di rete paramassi e barre di chiodature così come previste da progetto. Il risultato ha fornito un fattore di sicurezza minimo  $F_s=1,21$  e superiore a  $F_s \geq 1,15$  considerato come obiettivo del progetto. **È necessario sottolineare che gli interventi sono volti a mitigare fenomenologie di dissesto locali come più volte descritte nei paragrafi precedenti.** Inoltre, tali superfici sono limitate alla coltre regolitica di alterazione e non interessate dalle opere di mitigazione.

Di seguito si mostra il risultato della verifica di stabilità globale B-B' post operam elaborato con il metodo qFEM di Borselli, una mappa a colori di un campo scalare del fattore FS locale generato con algoritmo quasi Gauss integration e analisi geostatistica non parametrica, basato su sistemi FEM di Schofield & p. Worth(1968) e Griffith et al. (1999):

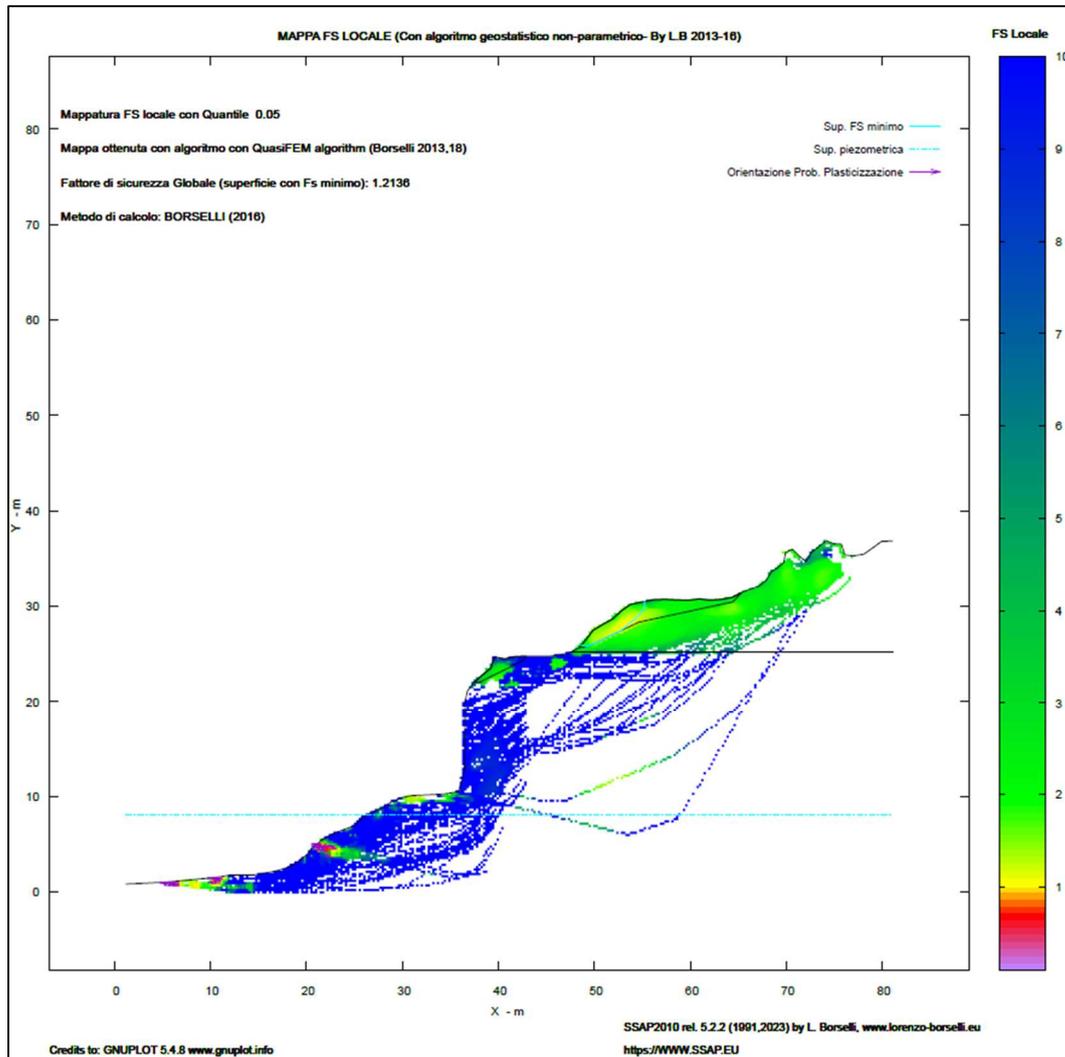


Fig. 111 - Mappa Fs locale con individuazione delle superficie con Fs minimo – sezione A-A' post operam

Per completare le informazioni, di seguito, il risultato della verifica di stabilità post operam della sezione B-B' che mostra le 10 superfici con fattore minimo (tutte con  $F_s \geq 1,15$ ); per ogni ulteriore informazione si rimanda al report sintetico delle verifiche in allegato (2017E037INV-02-D-GE-RPT001) le caratteristiche tecniche della rete e dei chiodi sono sintetizzate in tabella:

#### TABELLA TIRANTI/ANCORAGGI

Beta(°) : Inclinazione ancoraggio - Angolo con orizzontale(Gradi) 30.00

L(m) : Lunghezza (m): 6.00

T(kN/m) : Tensione di progetto 200.00

Lc(%) : % lunghezza cementata 50.00

#### TABELLA WIREMESH (RETI IN ADERENZA ANCORATE)

- Tr(kN/m) : Resistenza limite a trazione rete 100.00
- alpha(-) : Coefficiente di mobilitazione resistenza a trazione 0.10
- epsilonR(-) : Coefficiente di deformazione limite a trazione 0.040
- FsT(-) : Fs di progetto resistenza allo sfilamento dei rinforzi 1.00

Nell'immagine seguente sono anche mostrati i parametri di input e di ricerca:

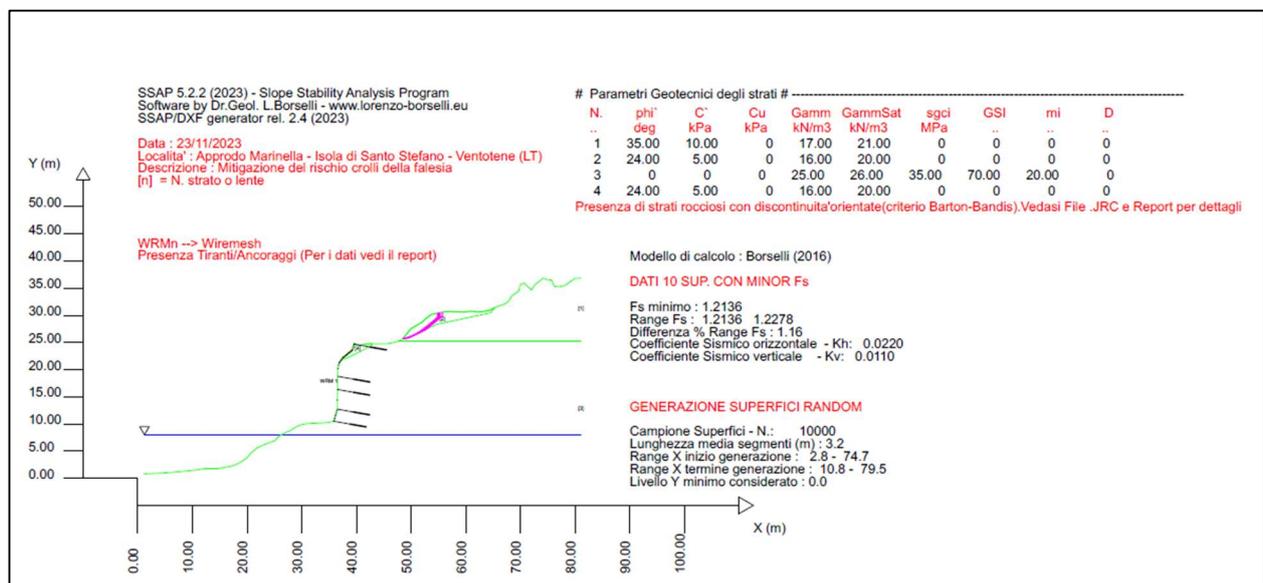


Fig. 112 - Esiti verifica di stabilità post operam, in evidenza le n.10 superfici con Fs minore – sezione B-B'

### 13.8 Verifica di stabilità scalo Marinella – Sezione C-C'

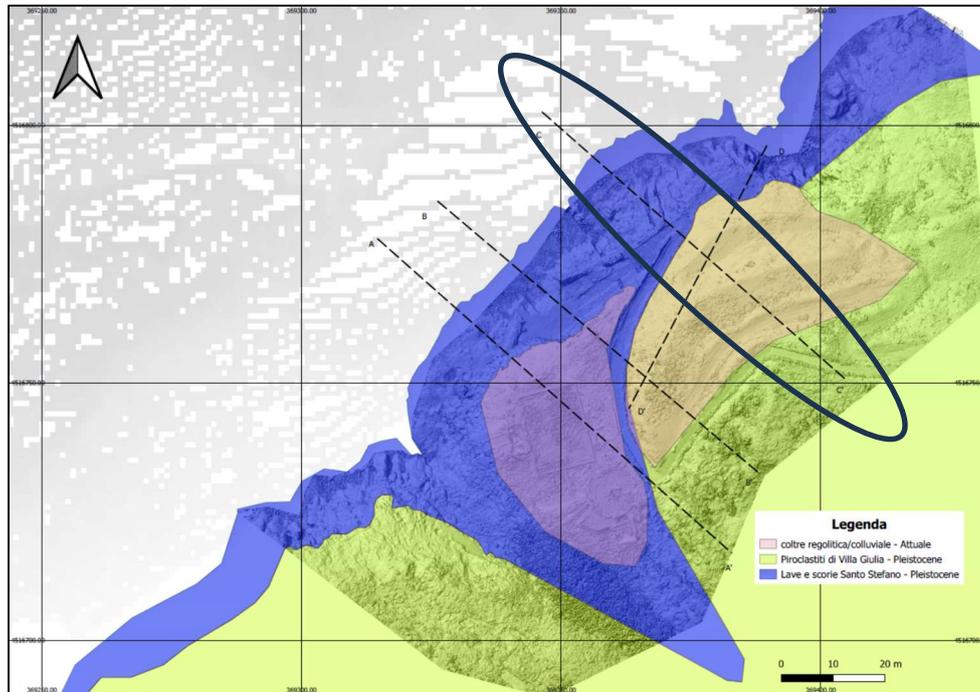


Fig. 113 - Tracce delle sezioni per la verifica di stabilità globale del pendio – in evidenza la sezione C-C'

#### ANTE OPERAM (C-C')

L'analisi eseguita con i parametri sopra riportati, per la sezione B-B', ha fornito un fattore di sicurezza minimo  $F_s=1,25$  pertanto superiore a  $F_s \geq 1,15$  considerato  $F_s$  da progetto (target da raggiungere).

Di seguito si mostra il risultato della verifica di stabilità globale B-B' elaborato con il metodo qFEM di Borselli:

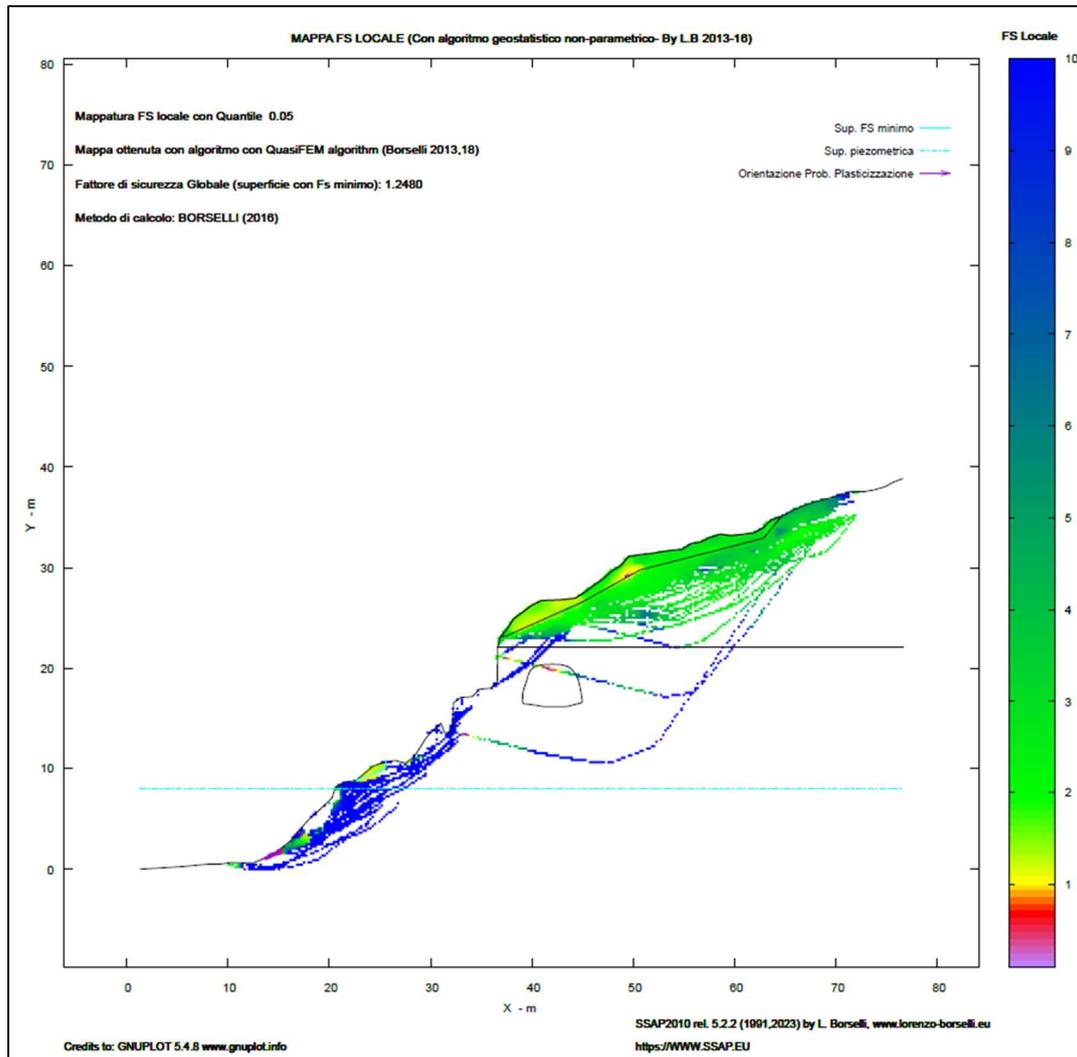


Fig. 114 - Mappa Fs locale con individuazione delle superficie con Fs minimo – sezione C-C' ante operam

Di seguito si mostra inoltre la mappa a colori delle pressioni neutre generate dal livello medio mare; e dalla falda; la quota del l.m.m. è stata considerata come livello freatico all'interno dell'ammasso roccioso:

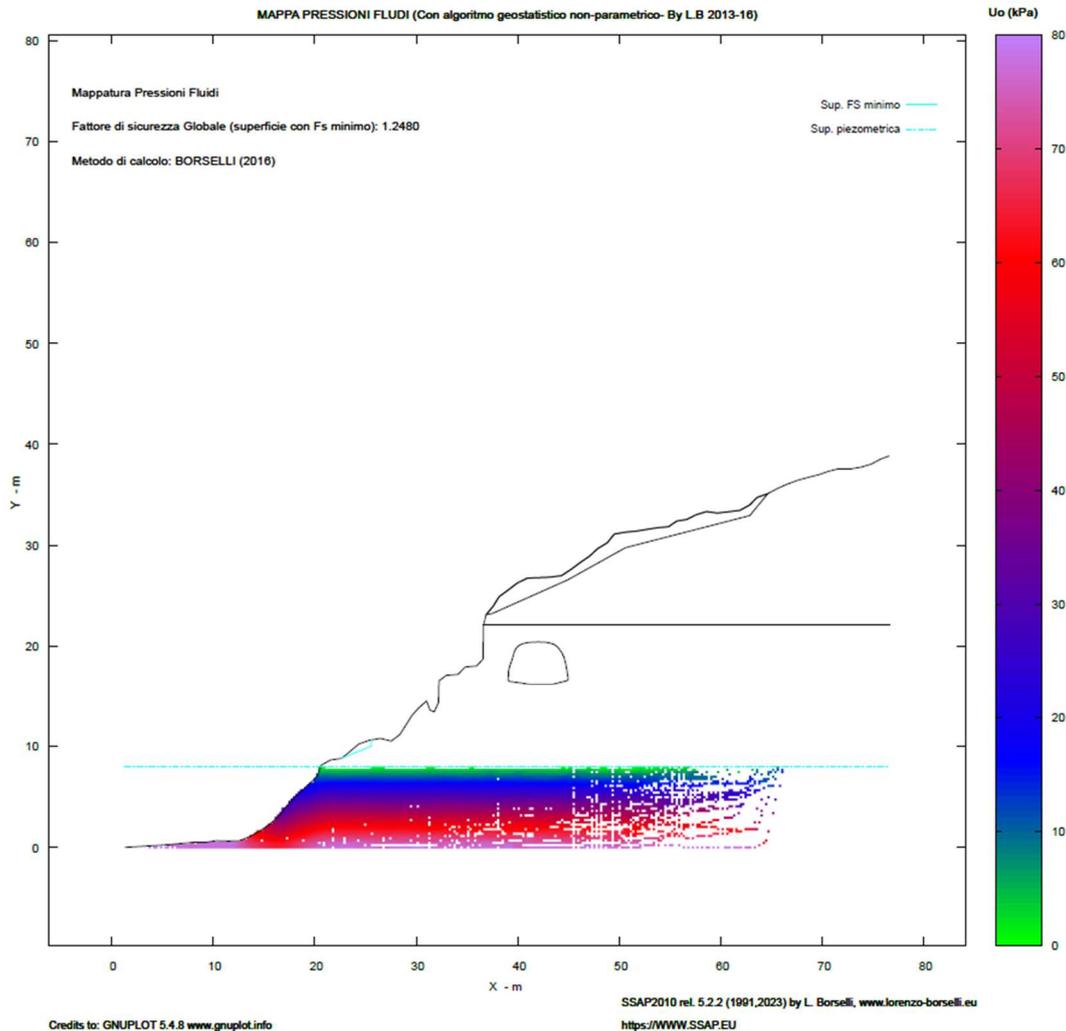


Fig. 115 - Mappa a colori delle pressioni neutre – sezione C-C'

Per completare le informazioni, di seguito, il risultato della verifica di stabilità della sezione C-C' che mostra le 10 superfici con fattore minimo (tutte con  $F_s \geq 1,15$ ); nell'immagine seguente sono anche mostrati i parametri di input e di ricerca:

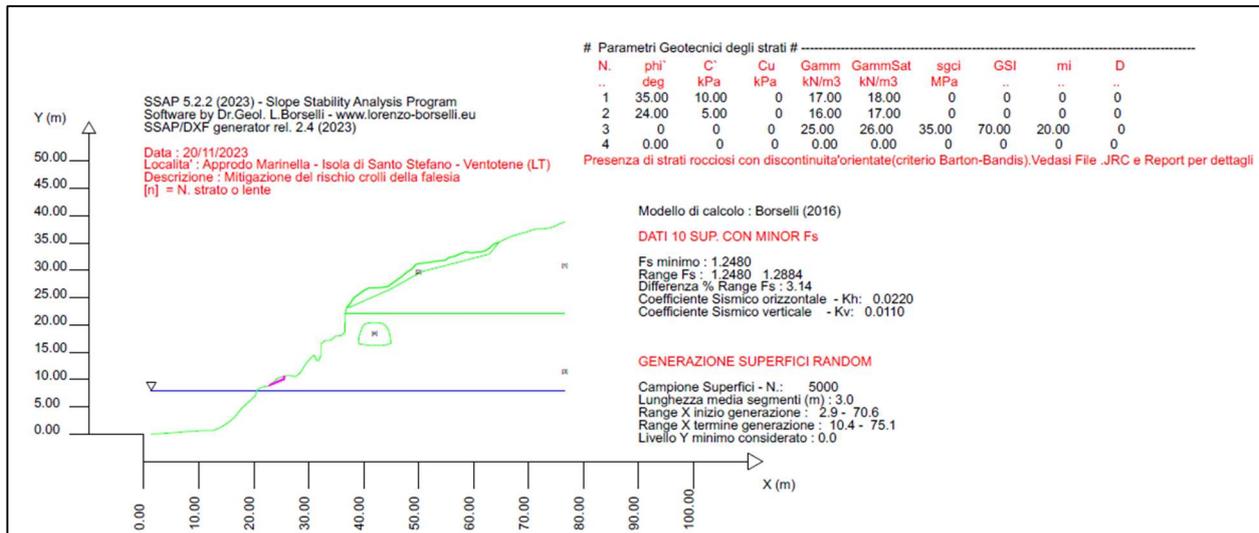


Fig. 116 - Esiti verifica di stabilità ante operam, in evidenza le n.10 superfici con Fs minore – sezione C-C'

Nell'immagine precedente si può notare l'inserimento della cavità antropica in sezione ottenuta dal rilievo laser scanner; come precedentemente detto, la cavità è stata inserita all'interno della sezione con l'opzione del software inserimento "lente" alla quale, come si evince in tabella (n. strato 4), sono stati attribuiti parametri geotecnici pari allo zero.

### POST OPERAM (C-C')

L'analisi post operam è stata eseguita, anche per la sezione C-C', considerando la messa in opera di rete paramassi e barre di chiodature così come previste da progetto. Il risultato ha fornito un fattore di sicurezza minimo  $Fs=1,25$  e quindi al di sopra di  $Fs \geq 1,15$  considerato come obiettivo del progetto. Si può notare come la superficie con  $Fs$  minimo si riferisce a potenziali superfici al di fuori dell'intervento progettuale. Dall'immagine elaborata con il metodo qFEM di seguito proposta, si nota inoltre che, come ovvio aspettarsi, in corrispondenza della cavità con caratteristiche geotecniche nulle vengono indicate delle aree di potenziale plasticizzazione; tuttavia, la verifica di stabilità globale non indica superfici con  $Fs$  critico.

**È necessario sottolineare che gli interventi sono volti a mitigare fenomenologie di dissesto locali come più volte descritte nei paragrafi precedenti.**

Di seguito si mostra il risultato della verifica di stabilità globale C-C' post operam elaborato con il metodo qFEM di Borselli, una mappa a colori di un campo scalare del fattore FS locale generato con algoritmo quasi Gauss integration e analisi geostatistica non parametrica, basato su sistemi FEM di Schofield & p. Worth(1968) e Griffith et al. (1999):

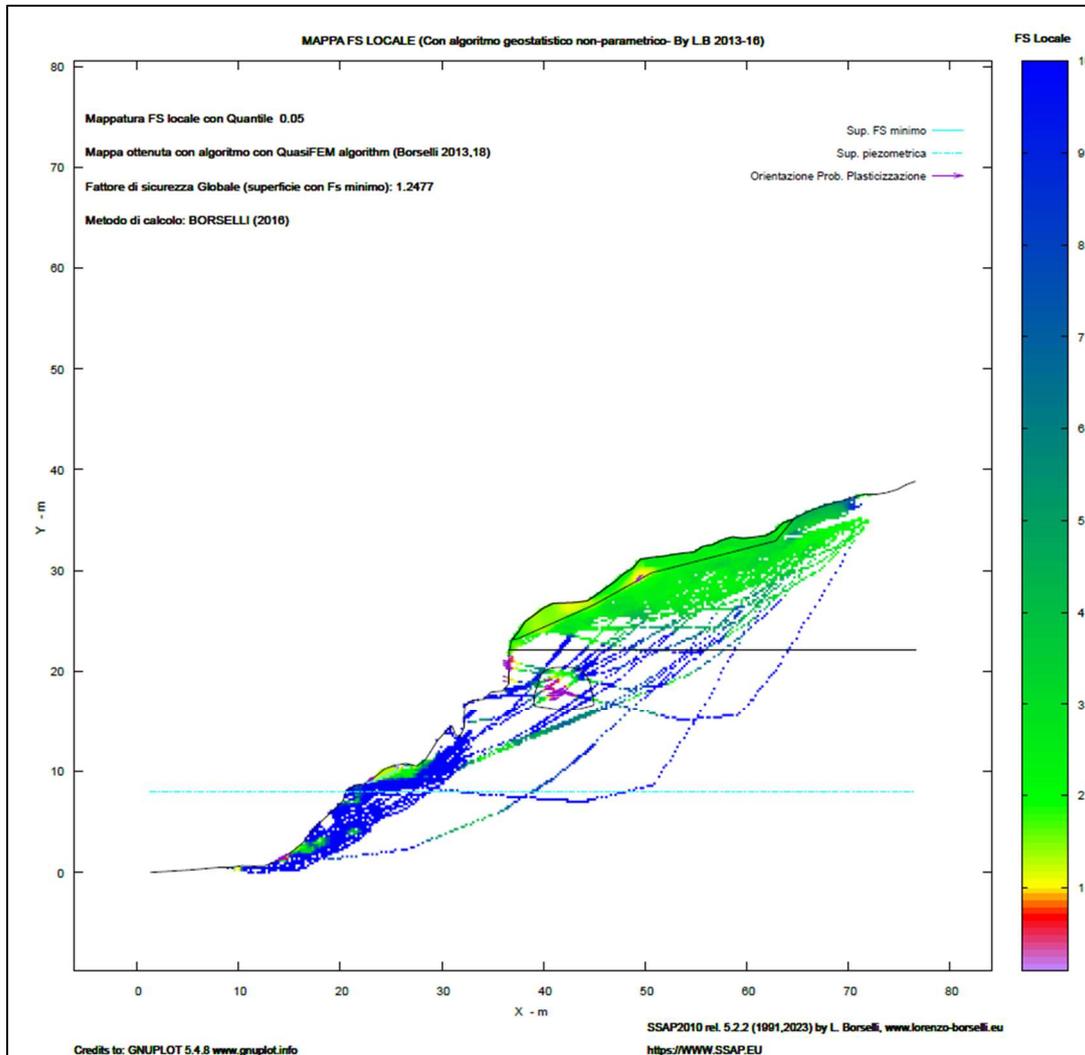


Fig- 117 - Mappa Fs locale con individuazione delle superficie con Fs minimo – sezione C-C' post operam

Per completare le informazioni, di seguito, il risultato della verifica di stabilità post operam della sezione B-B' che mostra le 10 superfici con fattore minimo (tutte con  $Fs \geq 1,25$ ); per ogni ulteriore informazione si rimanda al report sintetico delle verifiche in allegato (2017E037INV-02-D-GE-RPT001); le caratteristiche tecniche della rete e dei chiodi sono sintetizzate in tabella:

#### TABELLA TIRANTI/ANCORAGGI

Beta(°)	: Inclinazione ancoraggio - Angolo con orizzontale(Gradi) 10.00
L(m)	: Lunghezza (m): 3.00
T(kN/m)	: Tensione di progetto 200.00
Lc(%)	: % lunghezza cementata 50.00

**TABELLA WIREMESH (RETI IN ADERENZA ANCORATE)**

Tr(kN/m) : Resistenza limite a trazione rete 100.00

alpha(-) : Coefficiente di mobilizzazione resistenza a trazione 0.10

epsilonR(-) : Coefficiente di deformazione limite a trazione 0.040

FsT(-) : Fs di progetto resistenza allo sfilamento dei rinforzi 1.00

Nell'immagine seguente sono anche mostrati i parametri di input e di ricerca:

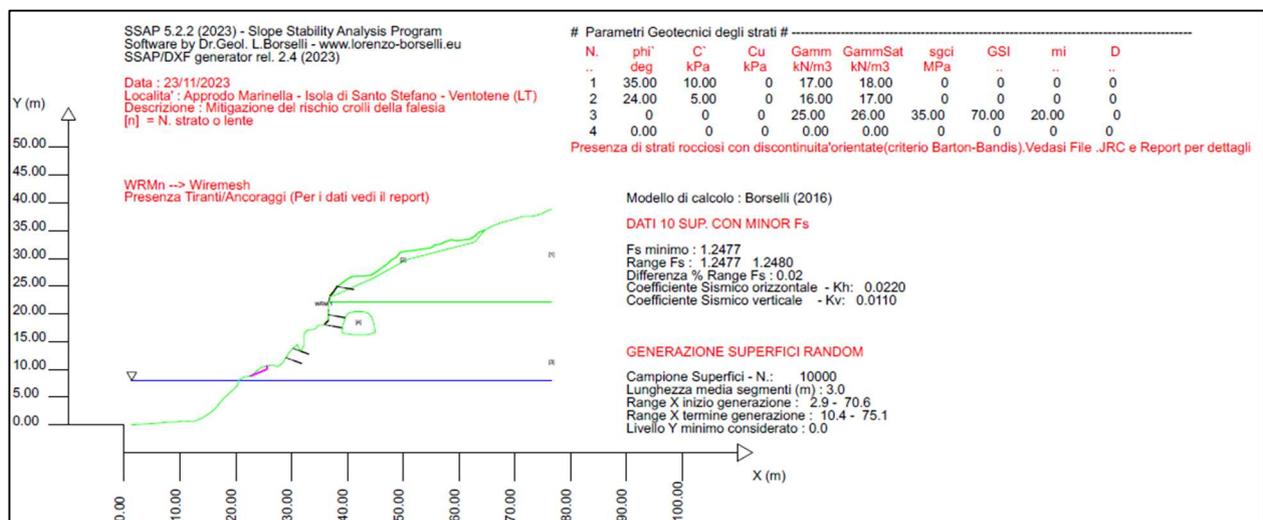


Fig. 118 - Esiti verifica di stabilità post operam, in evidenza le n.10 superfici con Fs minore – sezione C-C'

### 13.9 Verifica di stabilità scalo Marinella – Sezione D-D'

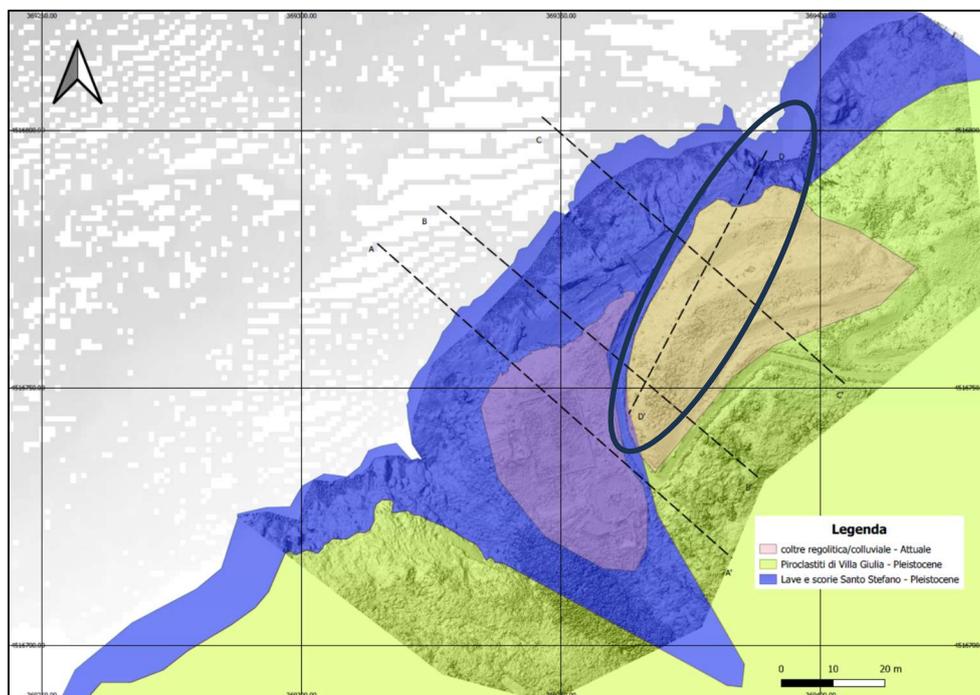


Fig. 119 - Tracce delle sezioni per la verifica di stabilità globale del pendio – in evidenza la sezione D-D'

#### ANTE OPERAM (D-D')

L'analisi eseguita con i parametri sopra riportati, per la sezione B-B', ha fornito un fattore di sicurezza minimo  $F_s=1,36$  pertanto superiore a  $F_s \geq 1,15$  considerato  $F_s$  da progetto (target da raggiungere).

Di seguito si mostra il risultato della verifica di stabilità globale B-B' elaborato con il metodo qFEM di Borselli:

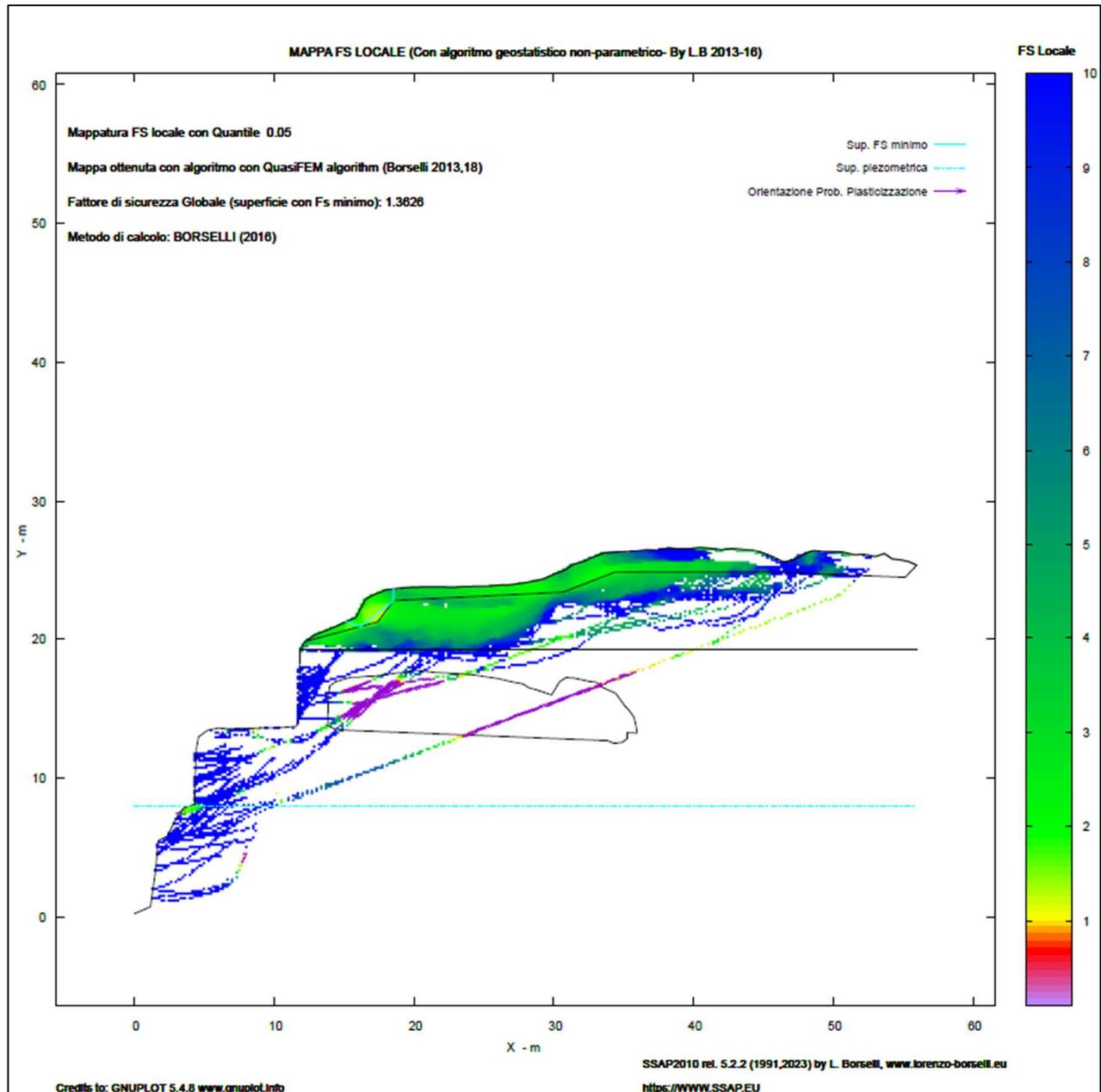


Fig. 120 - Mappa Fs locale con individuazione delle superficie con Fs minimo – sezione D-D' ante operam

Di seguito si mostra inoltre la mappa a colori delle pressioni neutre generate dal livello medio mare; e dalla falda; la quota del l.m.m. è stata considerata come livello freatico all'interno dell'ammasso roccioso:

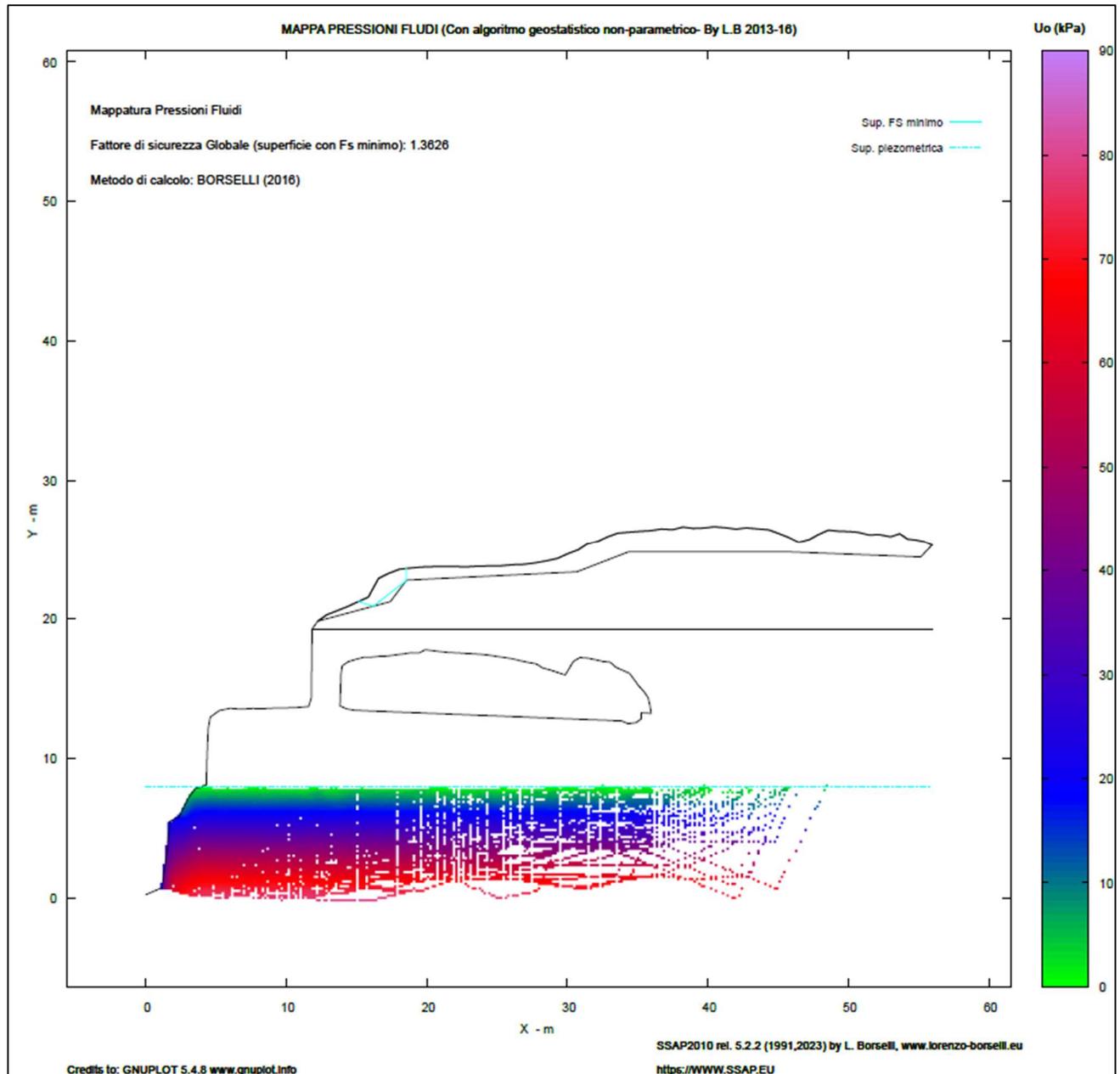


Fig. 121 - Mappa a colori delle pressioni neutre – sezione D-D'

l'intervento non interessa questa sezione, pertanto non verrà rappresentato il post operam; tuttavia, è utile verificare la stabilità globale anche nel senso longitudinale dello sviluppo della galleria; come si evince dai paragrafi precedenti il fattore di sicurezza soddisfa la verifica. Visti gli esiti delle indagini integrative, che mostrano nell'area della galleria delle zone con indice cinematico di pericolosità globale alto, si propone l'interdizione al passaggio nella galleria ed al passaggio e la sosta all'ingresso della galleria rappresentato in sezione (nord est).

#### 14 **Interventi di mitigazione presso l'approdo Marinella**

In analogia a quanto già realizzato presso lo scalo n.4, anche presso la Marinella sono previste le seguenti opere di mitigazione:

Zona di intervento	Interventi
<b>A</b> Falesia prospiciente l'approdo Marinella	<b>Intervento 1:</b> Ispezione e pulizia della parete rocciosa e demolizione di porzioni rocciose in precarie condizioni di stabilità
	<b>Intervento 3:</b> Rafforzamento e protezione della parete rocciosa mediante chiodature con barre metalliche L=3-6m, reti e funi in acciaio
	<b>Intervento 5:</b> Sottomurazione sulla parete rocciosa
<b>B</b> Muro e roccia sottostanti il percorso Marinella, lato mare	<b>Intervento 4:</b> Manutenzione straordinaria della parete in muratura e roccia
	<b>Intervento 2:</b> Rafforzamento della parete rocciosa mediante chiodature con barre metalliche
<b>C</b> Falesia sovrastante il percorso Marinella dopo il primo tornante	<b>Intervento 1:</b> Ispezione e pulizia della parete rocciosa e demolizione di porzioni rocciose in precarie condizioni di stabilità
	<b>Intervento 3:</b> Rafforzamento e protezione della parete rocciosa mediante chiodature con barre metalliche L=3m, reti e funi in acciaio

Demolizione "meccanica" per mezzo di leve o martinetti da inserire nelle fessure aperte, opportunamente allargate o previa esecuzione di fori di indebolimento, rimozione della vegetazione.

Perforazione ed installazione delle barre metalliche di chiodatura tipo Dywidag  $\varnothing \geq 24\text{mm}$ , di lunghezza 3.0/6.0 m, cementate con miscele cementizie con disposizione a maglia rombica con densità circa di 1 barra ogni 6÷8 m<sup>2</sup>. Le testate delle barre saranno munite di golfari. Installazione delle reti metalliche aderenti a maglia romboidale con filo in acciaio ad alta resistenza  $d \geq 2\text{ mm}$ . Installazione delle funi metalliche sui golfari: di sommità e al piede  $\varnothing 16\text{ mm}$  e diagonali  $\varnothing 12\text{ mm}$ .

Ispezione, con rilievo delle attuali condizioni del muro e della roccia; Pulizia e rimozione delle

porzioni instabili; Riempimento degli spazi liberi con pietrame di adeguate dimensioni e con impiego di malte cementizie. I materiali dovranno essere degli stessi tipi già presenti; Sistemazione e ricostruzione del degrado diffuso della parte superiore del muro; Ripristino di idonee capacità di drenaggio; Interventi sulla vegetazione, localmente destabilizzanti o interferenti con i lavori, da compiere in accordo con le specifiche indicazioni. Per le porzioni degradate, deformate o crollate si prevede lo smontaggio e la ricostruzione locale del muro nel rispetto di sagoma.

Muratura in blocchetti di roccia lavica legati con malta cementizia, pilastri in HEA 300 interasse circa 1,5 m.

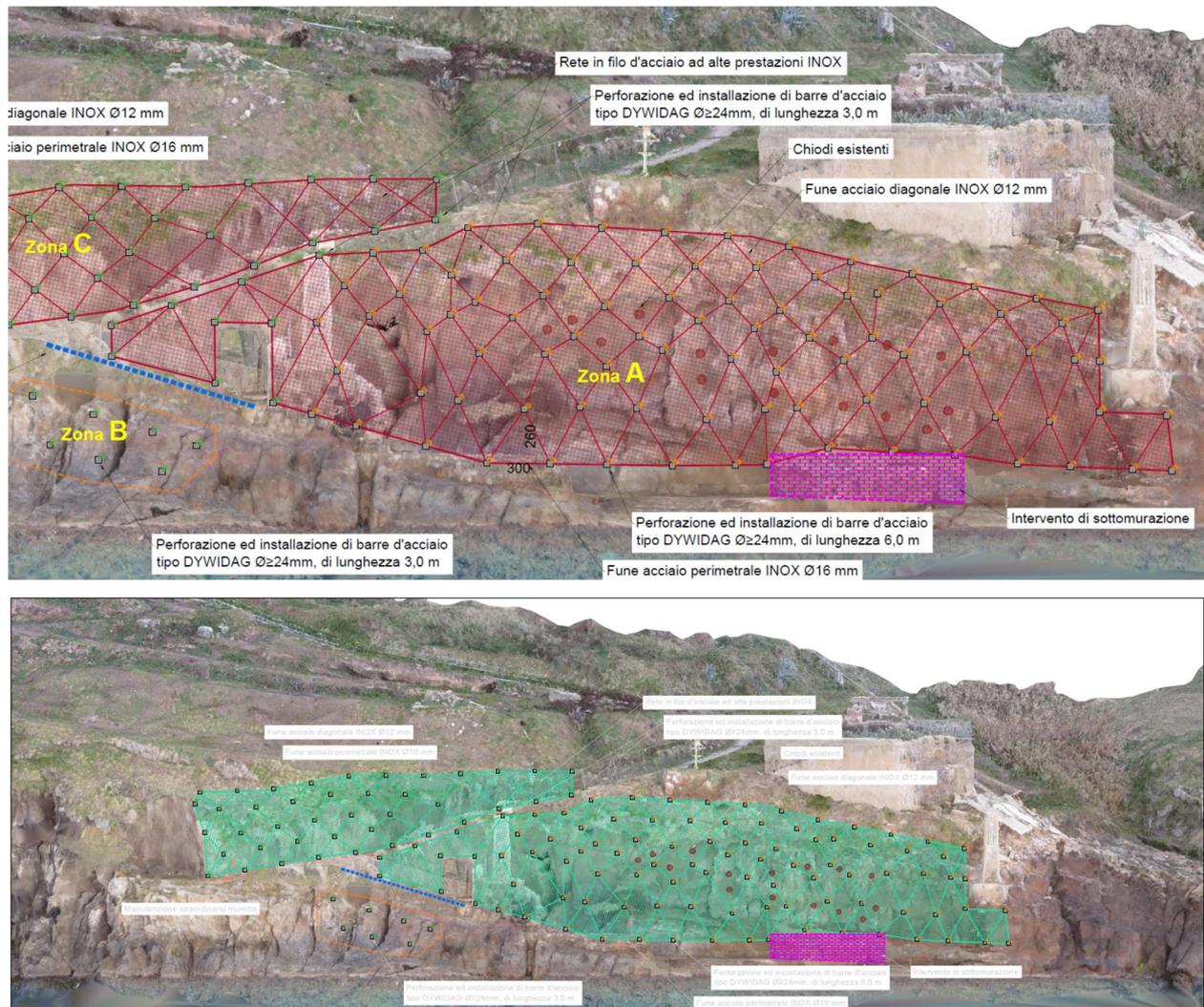


Fig. 122 – Prospetto scalo Marinella con interventi di progetto

In ottemperanza a quanto richiesto dal parere dell'Autorità di Bacino, al piede della falesia, nell'area prospiciente l'attuale scalo della Marinella, è presente un incavo antropico che sarà

oggetto di un apposito intervento di riempimento per sottomurazione con i seguenti obiettivi:

- protezione dall'azione meccanica erosiva e demolitrice delle onde;
- protezione dall'azione degli agenti atmosferici: variazioni delle temperature, salsedine ecc.;
- sostegno della parte aggettante, intesa come risorsa di rigidità per contrastare l'allentamento; tale funzione statica viene comunque considerata subordinata a quella delle protezioni di cui ai punti precedenti.

Al fine di mantenere il pregio estetico di una pavimentazione esistente e ancora in uso, la posizione della sottomurazione è stata posizionata leggermente arretrata rispetto alla parete sub-verticale superiore. Questo arretramento consente anche di mantenere l'evidenza caratterizzante dell'oggetto.

### 15 *Ulteriori Vincoli idrogeologici*

Sul sito, oltre alle aree a vincolo frana identificata dal P.A.I. si ritrovano ulteriori vincoli di natura idrogeologica del R.D.L. n. 3267/23 e del R.D. n. 1126/26; di seguito lo stralcio cartografico che mostra in rosso le aree dell'isola interessate dal vincolo idrogeologico:



Fig.123 - carta dei vincoli idrogeologici R.D.L. n. 3267/23 e del R.D. n. 1126/26

Per tali aree valgono le stesse considerazioni già espresse per il P.A.I.

È inoltre necessario sottolineare nell'ambito geologico-geomorfologico dell'opera in progetto che



La finalità di tale intervento, in ottemperanza all'art. 12 comma 3 delle Norme di Attuazione del P.A.I., è quella di attenuare le condizioni di rischio nelle aree interessate dall'intervento. Sarà necessario eseguire un monitoraggio geotecnico (paragrafo 17.1), in corso d'opera e post operam, di almeno un anno così come prescritto dal parere dell' AUTORITÀ DI BACINO DISTRETTUALE DELL'APPENNINO CENTRALE - Settore sub-distrettuale Ovest e Roma Capitale prima di procedere alla richiesta di ripermetrazione delle aree.

Sarà inoltre necessario ottenere la regolare esecuzione e/o collaudo dell'opera di consolidamento.

### **16.1 Piano di monitoraggio aree a pericolo e rischio di frana**

Lo scopo principale del monitoraggio sarà, quindi, di controllo, con l'obiettivo di ottenere informazioni sufficientemente tempestive su eventuali movimenti dei punti osservati e per seguirne l'evoluzione.

Di questo si dovrà tener conto nella gestione delle misure che si dovrà protrarre per un lungo periodo (diversi anni), con basse frequenze nella programmazione di base di quelle non automatizzabili (es. rilievi topografici).

Per ottemperare a tali esigenze si è pensato all'installazione, in corrispondenza della testa della chiodatura ed a questa solidale, di celle di carico. Un principio di rottura di eventuali cunei rocciosi farà segnalare infatti un aumento del carico sulla cella. Piccole deformazioni del cuneo roccioso possono mobilitare elevati incrementi di carico nelle celle e quindi segnalare l'attivazione di fasi critiche. Il progetto prevede l'installazione di n. 10 celle di carico collegate mediante cavo ad una centralina per la trasmissione dei dati in modalità remota. Le misure saranno acquisite dal sistema automaticamente. La gestione del monitoraggio sarà affidata in una prima fase (almeno il primo anno) ad un soggetto adeguatamente referenziato ed in seguito al Comune di Ventotene vista la competenza in ambito di protezione civile in qualità di C.O.C. (Centro Operativo Comunale). Verranno installati, in corrispondenza della falesia dell'approdo, n.13 mire topografiche per un monitoraggio topografico da realizzare da punti fissi scelti in funzione della logistica - almeno due capisaldi di riferimento in zona stabile arretrata di almeno 25 m dai cigli delle falesie - e della possibilità di traguardo, da eseguirsi con idonea strumentazione, ad esempio stazione totale con precisione sub-centimetrica.

Ai sistemi di monitoraggio menzionati si aggiungono n. 5 misuratori di giunti o fessurimetri per misurare le variazioni di apertura delle fessure. L'installazione deve essere effettuata su fessure suscettibili di aperture per possibile cinematismo d'instabilità di un cuneo roccioso nella direzione

dell'apertura. Completano il sistema integrato di monitoraggio n. 2 termometri da installare in corrispondenza della struttura in c.a. presente sulla sommità della falesia e sulla parete verticale della falesia. Infatti, la temperatura è uno dei fattori ambientali che maggiormente influisce sulle misure (fig.127). I cicli giornalieri e stagionali delle variazioni di temperatura possono essere confrontati con analoghi cicli sui valori delle misure strumentali in maniere da comprendere le correlazioni e poterne depurare gli effetti. Anche le misure termometriche, così come le misure fessurimetriche e quelle effettuate sulle celle di carico, saranno automatizzate e remotizzate.

Anche l'area dello scalo n.4 sarà interessata da un monitoraggio geotecnico con lo scopo di registrare eventuali movimenti della falesia. In quest'area verranno installati n. 11 target per il monitoraggio topografico nonché un termometro (fig.126).

Al fine seguire l'andamento temporale del fenomeno, si effettuerà sovrapposizione di immagini digitali acquisite in tempi diversi sulla stessa area ed elaborazione dei confronti in termini di spostamenti differenziali secondo algoritmo del tipo change detection o digital image correlation.

Tale sistema, che rientra nel campo del monitoraggio fotografico, è costituito essenzialmente da una fotocamera (sensore ottico) trasportato da drone consentirà l'acquisizione di immagini digitali con caratteristiche di risoluzione geometrica (pixel) e radiometriche note con cadenza temporale funzione del fenomeno che si sta osservando (nel nostro caso il rilievo verrà effettuato una volta al mese).

La sovrapposizione di immagini ripetute nel tempo da sensore ottico, infatti, è una nuova soluzione di monitoraggio che sfrutta la grande diffusione nel mondo di sensori ottici/multispettrali al fine di ottenere informazioni circa i cambiamenti del terreno in termini di spostamenti differenziali, mediante opportune tecniche di Digital Image Processing (DIP), ovvero la manipolazione di immagini digitali per ottenere dati ed informazioni. Esso opera a diverse scale spaziali e temporali, rappresentando uno strumento ideale per lo studio e il monitoraggio di processi deformativi superficiali.

Il concetto fondamentale alla base di tale tecnica è l'individuazione, all'interno dell'immagini analizzate, di "Features" quali strutture come punti, linee nonché pattern più complessi oppure colore, luminosità e contrasto. Attraverso il confronto con un'ulteriore immagine, le "Features" successivamente possono essere soggette a due tipologie di analisi principali:

- Change Detection (CD): attraverso la quale si ricercano "Features" che compaiono o scompaiono all'interno della scena; la ricerca avviene (a) valutando una variazione di luminosità e/o esposizione, (b) valutando il rapporto tra le intensità dei pixel in differenti bande oppure (c) valutando l'assenza\presenza di linee e pattern che implicano cambiamenti di forma e struttura (Figura 124);

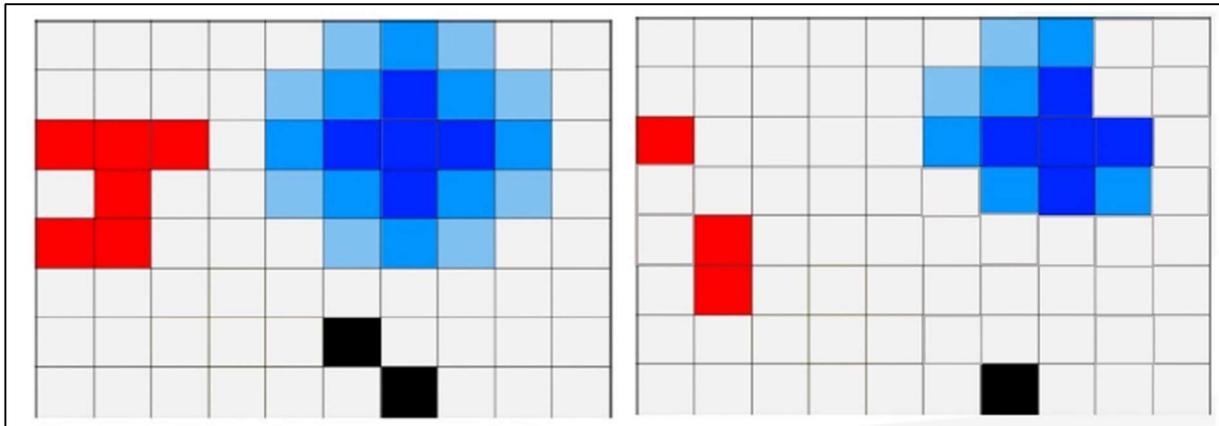


Figura 124 - Esempio di comparsa o scomparsa di "Features" tra due immagini che riprendono la stessa scenama in due momenti differenti.

- Digital Image Correlation (DIC): attraverso la quale si identificano e tracciano soltanto le "Features" riconducibili a linee e pattern, identificandone i cambiamenti di posizione sui fotogrammi. E dunque una misurazione ottico-numerica in grado di misurare spostamenti e deformazioni superficiali che avvengono esclusivamente lungo il piano del fotogramma, ovvero perpendicolare alla linea di vista (Figura 125);

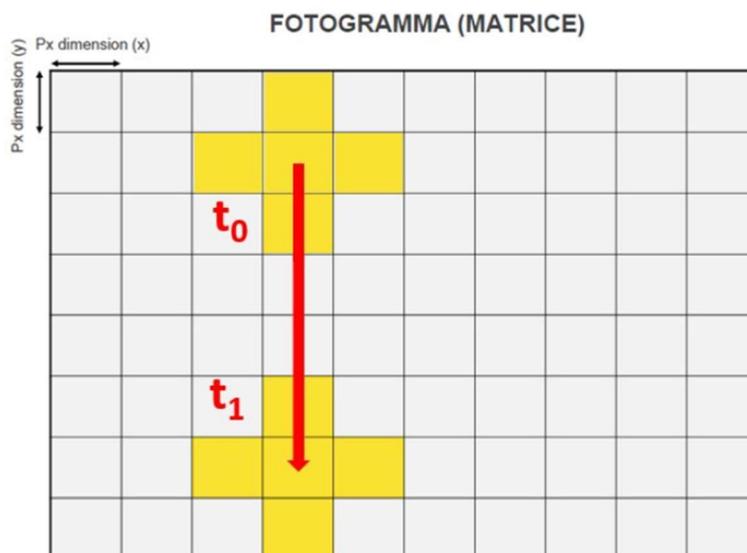


Figura 125 - Esempio di tracciamento "Features".

Nel caso in esame l'analisi effettuata sarà, visto il fenomeno in atto e/o potenziale, di tipo change detection.

Le caratteristiche del sistema (es. tipologia di sensore e ottica, ubicazione del sistema) tali da

raggiungere le condizioni ottimali richieste per effettuare il monitoraggio ed il controllo del fenomeno oggetto di indagine sono:

- Risoluzione Geometrica - Viene comunemente riferita al numero di pixel (celle della matrice) che costituiscono l'immagine digitale. In tal senso, maggiore è il numero dei pixel, maggiore sarà la risoluzione e minore sarà la dimensione minima degli oggetti ripresi che può essere rilevata.
- Risoluzione Radiometrica - Rappresenta la minima differenza di intensità che un sensore può rilevare tra due valori di energia. Maggiore è la risoluzione radiometrica di un sensore, più sensibile è nel registrare piccole differenze nell'energia riflessa o emessa.
- Risoluzione Spettrale - Rappresenta il numero di bande spettrali di acquisizione e la loro ampiezza. Può essere anche definita come la capacità di risolvere le caratteristiche di un oggetto nel campo elettromagnetico.
- Risoluzione Temporale - Viene definita come il periodo di tempo che intercorre tra due riprese successive di una stessa area, detta comunemente anche "frequenza di campionamento".

Per effettuare monitoraggio attraverso la tecnica della sovrapposizione di immagini digitali da fotocamera fissa o da drone, siano esse analisi di DIC o di CD, e poter estrapolare informazioni attendibili rispetto ad una grandezza variabile da tenere sotto controllo (quantità di spostamento, velocità di spostamento, cambiamenti, etc.) è necessario che le immagini da analizzare siano sottoposte in via preliminare ad un processo di allineamento preciso, ovvero ad uno step di "co-registrazione". L'obiettivo di questo step è quello di ottenere due o più immagini confrontabili; questo diventa possibile attraverso diverse tipologie di trasformazioni che si applicano alle immagini da allineare (Slave), rispetto ad un'immagine di riferimento (Master). La fase di Co-registrazione risulta quindi un passaggio cardine ed indispensabile per la sovrapposizione di immagini digitali.

Infine, sarà necessario processare i dati acquisiti con software dedicato con algoritmo che consenta il change detection.

Grazie all'acquisizione di immagini da drone, sarà possibile in fase di processamento dei dati fare un confronto sulla nuvola di punti acquisiti: in tal modo sarà possibile identificare, oltre agli eventuali distacchi anche la volumetria del materiale crollato.

Premesso che la frequenza delle misure va tarata in funzione della risposta dei primi cicli dei dati per comprendere meglio l'evoluzione del potenziale dissesto, si propone:

- 4 volte al giorno per le misure automatiche (celle di carico, fessurimetri, termometri);
- 1 rilievo da drone ogni due mesi per le immagini del monitoraggio fotografico per un anno (7 rilievi totali in un anno);

- ogni 3 mesi per i rilievi topografici a regime; con frequenza 1,5-2 mesi nel primo anno per verificare la precisione del sistema ed apportare eventuali ottimizzazioni.

Si precisa che le celle di carico, i fessurimetri ed i termometri dovranno essere installati e messi in funzione da un soggetto adeguatamente referenziato, di cui al presente progetto e successivamente messe a disposizione del Comune di Ventotene che provvederà a gestire in remoto il monitoraggio dopo un periodo di taratura costituito da 12 mesi di misure con la frequenza sopra riportata. Anche le mire topografiche dovranno essere funzionali al monitoraggio topografico di cui l'Ente Gestore si farà carico in un secondo momento e che integreranno il monitoraggio geotecnico con funzione di allertamento per le finalità di gestione del rischio frana nell'ambito del piano di emergenza comunale di protezione civile approvato con delibera del C.C. n.05 del 01/12/2019 con aggiornamento delibera C.C. n.04 del 21/04/2017. Per la definizione delle soglie di allarme sarà necessario attendere il primo ciclo di misure di tutto il sistema di monitoraggio; si ricorda che i crolli in roccia sono una fenomenologia che non permette di definire facilmente soglie di innesco prestabili viste l'estrema velocità con cui avvengono senza particolari preavvisi (spostamenti submillimetrici, aumento di carico repentino).

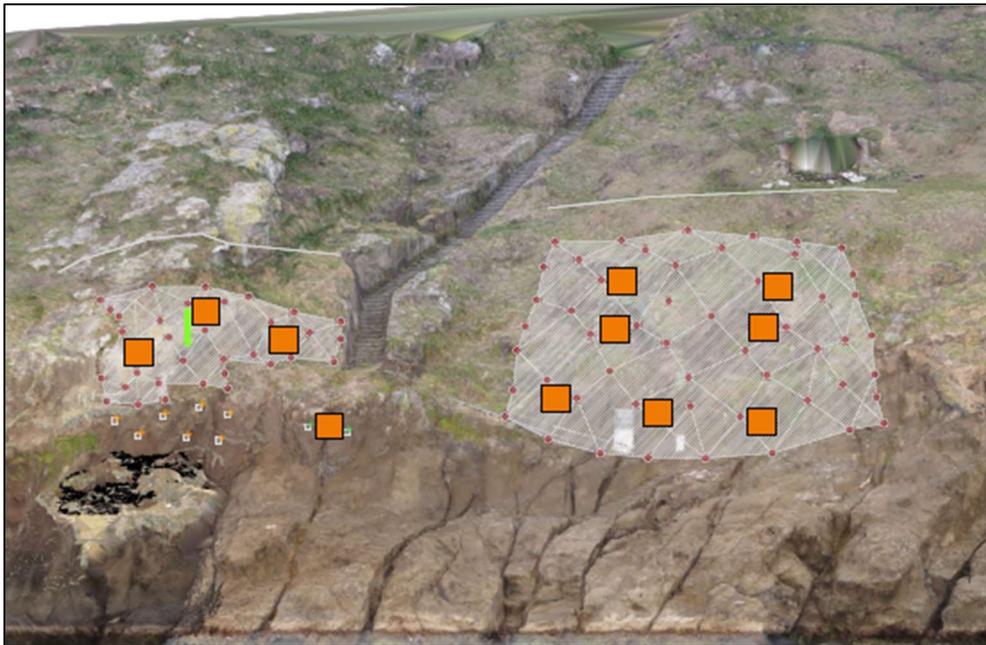


Fig. 126: ubicazione di massima di mire topografiche (quadrati arancioni) – termometro (linea gialla) presso scalo n. 4

APPRODO MARINELLA - PROSPETTO - 1:200

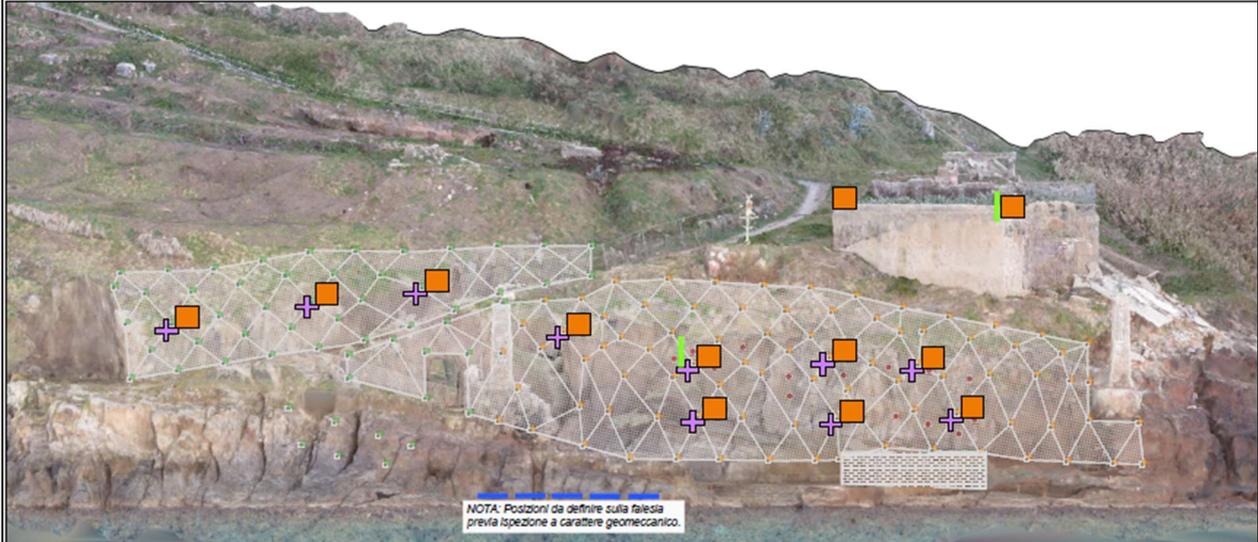


Fig. 127: ubicazione di massima di mire topografiche (quadrati arancioni) - termometro (linea gialla) – celle di carico (croci azzurre) presso scalo Marinella

CIMITERO - PIANTA - 1:200

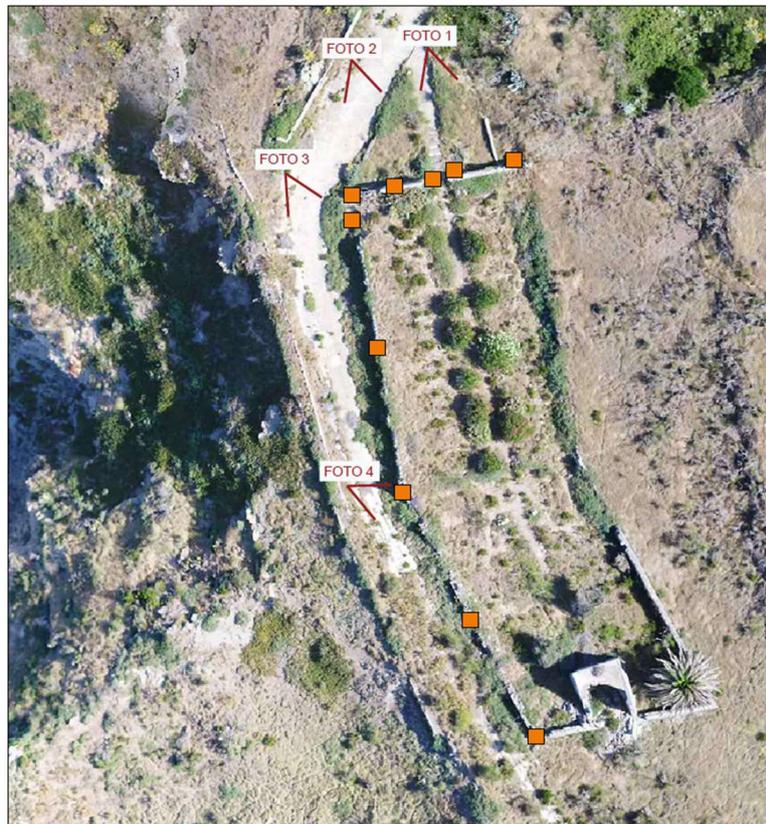


Fig. 128: ubicazione di massima di mire topografiche (quadrati arancioni) presso area del cimitero

Nella Figura 129 seguente si mostra un esempio in cui l'apertura di una fessura è praticamente stabile nel periodo monitorato di 4 anni con evidenza di importanti oscillazioni dei valori delle misure dovute principalmente agli effetti termici sia stagionali che giornalieri.

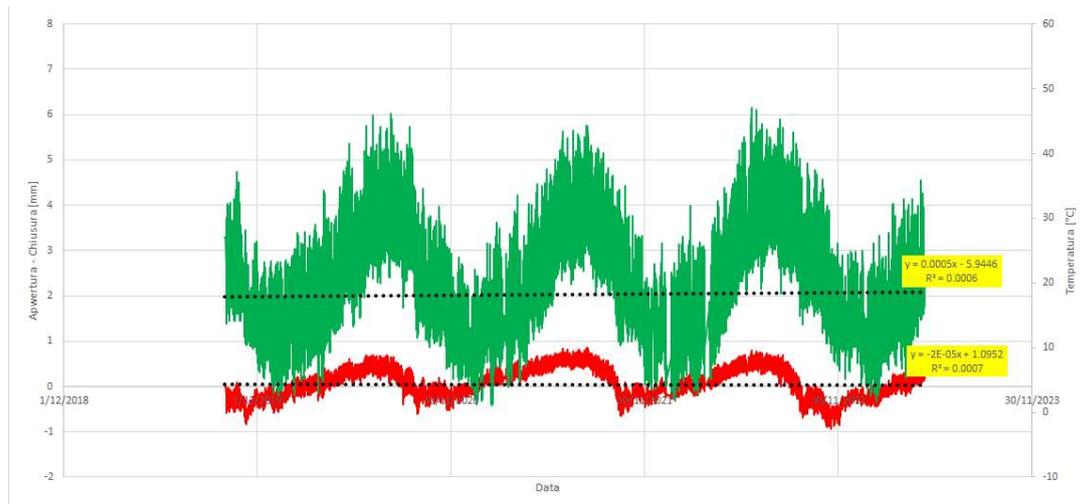


Fig. 129: Andamento delle misure delle temperature (verde) e dell'apertura di una fessura (rosso) per un periodo di osservazione di 4 anni.

## 17 Inquadramento ed osservazioni idrogeologiche

Le terebrazioni sull'isola per altri interventi non hanno consentito di riconoscere la presenza di eventuale falda acquifera. Si può osservare che la presenza di tale falda è condizionata sia dalle litologie sia alla morfologia del sito. Dal punto di vista delle permeabilità i litotipi riconosciuti hanno caratteristiche differenti dall'alto verso il basso. Nell'area del carcere sono presenti depositi piroclastici e pomici che presentano generalmente una permeabilità primaria per porosità e secondaria per fratturazione. In questi depositi è possibile la formazione di falde stagionali non continue in funzione del grado di porosità e fratturazione. Alla base delle piroclastiti si rinvencono le scorie e le lave che hanno permeabilità primaria per fessurazione che potenzialmente potrebbero diventare il recapito delle acque provenienti dalla parte sommitale dell'isola. Dal punto di vista geomorfologico, infatti, le acque meteoriche potrebbero infiltrarsi nella parte sommitale dell'isola alla quota di circa 80 m sul livello del mare e formare una falda stagionale a seconda dello stato di fessurazione e porosità delle piroclastiche. Viste le dimensioni dell'isola l'area di ricarica delle piogge è limitata alla parte più pianeggiante che coincide con l'edificio dell'ergastolo. Nell'area immediatamente ad ovest dell'approdo è presente un impluvio che costituisce

l'elemento essenziale del reticolo idrico di quest'area dell'isola. Il recapito dell'impluvio, che verosimilmente accoglie le acque piovane nei periodi d'intense precipitazioni, sfocia direttamente in mare come evidenziato nella figura seguente.

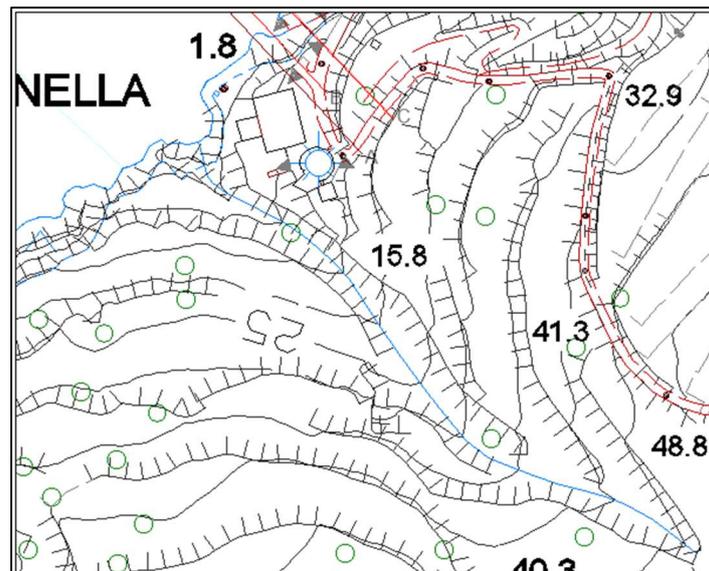


Fig. 130: reticolo idrografico

Il rilievo geomeccanico non ha evidenziato la presenza di acqua che scorre in maniera fluente all'interno delle diverse famiglie di frattura ma un certo grado di umidità. Nella parte sommitale della falesia sono state riconosciute alcune aree di coltre regolitica soggetta ad erosione diffusa.

## 18 Conclusioni

Il presente studio di compatibilità geomorfologica è relativo all'*Intervento n. 3.a – Realizzazione/adequamento degli approdi all'Isola di Santo Stefano, Opere di mitigazione del rischio crolli sulla Falesia*". A monte del presente progetto sono stati eseguiti interventi in somma urgenza necessari a seguito del peggioramento delle condizioni di stabilità della falesia prospiciente l'insenatura di approdo dello scalo n.4, evidenziato dal distacco di un volume di roccia verificatosi nel mese di marzo 2023. Si rappresenta che lo scalo n.4 è stato inibito all'accesso e che le lavorazioni sono state realizzate con lo scopo principale di consentire alle sole maestranze presenti sull'isola per i lavori di messa in sicurezza dell'ex carcere borbonico, di utilizzare tale scalo quale via di accesso e di esodo nei casi in cui, per le condizioni meteo marine particolarmente avverse, l'approdo denominato Marinella non fosse idoneo.

Il progetto di somma urgenza è parte integrante del presente progetto più ampio che include, tra l'altro, la mitigazione del rischio crolli presso l'approdo Marinella, denominato **Intervento n. 3**

**“Realizzazione/adequamento degli approdi all’Isola di Santo Stefano”**, sul quale l’Autorità di Bacino Distrettuale dell’Appennino Centrale ha espresso il parere di cui al prot. n. 12714/2022 del 23-11-2022 e per il quale la scrivente Stazione Appaltante sta provvedendo ad ottemperare alle relative richieste di integrazioni.

Il rilievo geomeccanico integrativo, eseguito sia con metodo classico sia da remoto tramite drone e laser scanner, ha reso possibile definire la pericolosità geomorfologica dell’area esaminata attraverso un indice di probabilità di accadimento, per ogni cinematismo individuato. In particolare, sono stati individuati i seguenti potenziali cinematismi:

- Scivolamento planare;
- Ribaltamento di flessura;
- Scivolamento di cunei;
- Caduta libera;
- Ribaltamento di cunei;

Tra questi, per entrambi gli scali, il cinematismo con valori massimi più alti è quello relativo alla caduta libera, seguito dallo scivolamento planare e dal ribaltamento di flessura; gli altri meccanismi mostrano indici nettamente più bassi. Per una disamina su ogni singola zona si rimanda all’elaborato 2017E037INV-02-D-GE-IND002.

Si è, inoltre, proceduto alla verifica di stabilità globale del pendio su n.3 sezioni interessate dagli interventi di somma urgenza e per n.4 sezioni relative allo scalo della Marinella. Per la definizione del modello geomeccanico dell’ammasso roccioso si è utilizzato il criterio di rottura di Hoek et al. 2002; è necessario, tuttavia, sottolineare che il campo di applicazione della metodologia è limitato ai pendii in roccia dove non sono presenti instabilità e distacchi di natura strutturale (cunei o poliedri di roccia, topplig/ribaltamenti, e caduta di massi). Tuttavia, il metodo presenta una capacità di generalizzazione molto ampia, potendo spaziare dagli ammassi rocciosi in rocce consistenti, alle rocce deboli fino alle rocce tenere e agli ammassi in formazioni in facies di flysch (Marinos & Hoek; 2001, Marinos, 2017). *Per tali ragioni i risultati delle verifiche sono da ritenersi qualitativi e non quantitativi, visti i cinematismi attesi e messi in luce dalle indagini.* Le analisi numeriche hanno messo in evidenza, in corrispondenza degli interventi in somma urgenza dello scalo n.4, comunque valori del fattore di sicurezza *post operam* che indicano stabilità. In questa sede è stato tuttavia necessario sanare alcune piccole criticità, a valle degli interventi in somma urgenza, mediante chiodature per ottenere un  $F_s \geq 1,15$  come richiesto dal progetto. Per quanto riguarda gli esiti delle verifiche dello scalo Marinella, tutte le sezioni verificate hanno fornito valori di  $F_s \geq 1,15$ .

Gli interventi progettati risultano compatibili con il modello geologico-geomorfologico dei siti nonché con le tipologie di dissesti potenziali individuati.

Il progetto prevede inoltre un monitoraggio geotecnico, sulle falesie e le opere realizzate e da realizzarsi, in corso e post operam, per un periodo di almeno un anno con finalità conoscitive e per l'individuazione di soglie di allarme che, nel caso di crolli in roccia, sono di difficile determinazione. A valle del monitoraggio si valuterà la possibilità di presentare una richiesta di riclassifica della pericolosità/rischi del P.A.I. che consentirebbe la realizzazione di un approdo in corrispondenza della Marinella. Si sottolinea come gli interventi progettati hanno lo scopo di mitigare i potenziali crolli solo nelle aree degli approdi e più precisamente sulle falesie prospicienti agli stessi.

## Bibliografia

- M. Ingrassia - Studio di strutture geologiche prodotte da fuoriuscita di fluidi e possibili georischi associati. Applicazioni ai fondali circostanti l'Arcipelago Pontino (Tirreno Centrale). Progetto Dottorato di Ricerca – Università la Sapienza Roma;
- Bergomi C., Catenacci V., Cestari G., Manfredini M., Manganeli V. (1969) - Note illustrative del Foglio 171 Gaeta e vulcano di Roccamonfina. Servizio Geologico d'Italia;
- E. SACCHI<sup>1</sup> & F.M.PETTI Insect pupation chambers from the Pleistocene paleosols of Santo Stefano Island (Pontine Archipelago, Central Italy) Studi Trent. Sci. Nat. Acta Geol., 83 (2008): 205-210;
- Bellucci F., Lirer L. & Munno R., 1999a - Geology of Ponza, Ventotene and Santo Stefano island (with a 1:15.000 scale geological map). Acta Vulcanologica, 11 (2): 197-222.
- Bellucci F., Lirer L. & Rolandi G., 1999b - Geological Map of Ponza, Ventotene and Santo Stefano Islands. Scale 1:15.000.;
- D. Molin<sup>1</sup>, F. Bernardini<sup>2</sup>, R. Camassi<sup>2</sup>, C. H. Caracciolo<sup>2</sup>, V. Castelli<sup>2</sup>, E. Ercolani<sup>2</sup>, L. Postpischl "MATERIALI PER UN CATALOGO DEI TERREMOTI ITALIANI: REVISIONE DELLA SISMICITÀ MINORE DEL TERRITORIO NAZIONALE". Dipartimento della Protezione Civile - Roma - Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - Sezione di Bologna.;
- Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche - A.G.I. 1977.;
- M. Pietrantoni, A. Tagliaferri, M. Petrangeli "Valutazione dell'affidabilità delle prove SPT per la caratterizzazione sismica dei terreni" – Rivista Geotecnica Italiana 2013
- Palmstrom "Measurements of and Correlations between Block Size and Rock Quality Designation (RQD)" – Tunnels and Underground Space Technology 20 362-377 – 2005
- Luis I. Gonzalez De Vallejo – Geoingegneria – Pearson Prentice Hall -2005

- Casagli N., Pini G. "ANALISI CINEMATICA DELLA STABILITÀ DI VERSANTI NATURALI E DI FRONTI DI SCAVO IN ROCCIA - GEOLOGIA APPLICATA E IDROGEOLOGIA, Bari, 1993, vol. 28: pp. 223-232
- Gigli et al. 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 & Mining Sciences 157 (2022) 105178;
- Borselli L. - SSAP2010 – Slope Stability Analysis Program – Reference Manual Versione 5.2 (2023)
- <http://esse1-gis.mi.ingv.it/>
- [https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/query\\_eq/](https://emidius.mi.ingv.it/CPTI15-DBMI15/query_eq/)
- <https://webgis.abdac.it/portal/apps/webappviewer/index.html?id=b4f5f37d97e9427c9c2e4ce7e30928f9>