



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



Comune di Ventotene  
REGIONE LAZIO

**CONTRATTO ISTITUZIONALE DI SVILUPPO**

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

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



**STAZIONE APPALTANTE**



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

**Funzione Servizi di Ingegneria**

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

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

**RESPONSABILE UNICO DEL PROCEDIMENTO:** Dott. Ing. ENRICO FUSCO

**COORDINAMENTO PROGETTAZIONE:** Dott. Arch. Rosa di NUZZO

**PROGETTAZIONE ARCHITETTONICA**  
Dott. Arch. Massimo BARAGLI

**PROGETTAZIONE STRUTTURALE**  
Dott. Ing. Letterio SONNESSA

**PROGETTAZIONE OPERE MARITTIME**  
Dott. Ing. Daniele BENOTTI

**RELAZIONE GEOLOGICA**  
Dott. Geol. Vincenzo GUIDO

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

**PROGETTAZIONE DELLA SICUREZZA**  
Dott. Ing. Nunzio LAURO

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

**COMPUTI E STIME**  
Geom. Luigino D'ANGELANTONIO

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

**GRUPPO DI LAVORO INTERNO**

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

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

**PROGETTAZIONE OPERE MARITTIME:**  
Dott. Ing. Leonardo GUALCO

**PROGETTAZIONE IMPIANTI:**  
Sig. Ennio REGNICOLI

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

**PROGETTAZIONE DELLA SICUREZZA**  
Dott. Arch. Ahmed ELGAZZAR

**SUPPORTO TECNICO OPERATIVO**

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

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

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

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

**INGEGNERIA NAVALE**  
Dott. Ing. Francesco PRINZIVALLI

**CONSULENZA TECNICO-SCIENTIFICA**  
Prof. Ing. Paolo SAMMARCO

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

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

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

**INDAGINI GEOMECCANICO :**  
Geoapp Srl  
Dott. Paolo FARINA

**PROGETTO DEFINITIVO**

ELABORATO			DATA	NOME	FIRMA
Progetto Strutturale			REDATTO	05-03-2021	G.GUIDUCCI
Mitigazione del rischio di instabilità del versante			VERIFICATO	05-03-2021	L.SONNESSA
Scalo della Marinella			APPROVATO	05-03-2021	Rosa di NUZZO
Relazione geotecnica e sulle fondazioni			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-S0-RF0001		
Rev. 2	20-11-2023	Integrazione condizione ambientale n.6	CODICE FILE		
Rev. 3			2017E037INV-02-D-S0-RF0001.dwg		

**S0-RF0001**

## 1 SOMMARIO

1	Sommario .....	0
2	Premessa .....	2
3	Documenti di riferimento.....	6
3.1	<i>Normativa tecnica</i> .....	6
3.2	<i>Documenti progettuali</i> .....	7
4	Descrizione degli interventi.....	8
4.1	<i>Premessa</i> .....	8
4.2	<i>Zona A: Falesia prospiciente l'approdo</i> .....	11
4.3	<i>Zona B: Muro e roccia sottostanti il percorso, lato mare</i> .....	17
4.4	<i>Zona C: Falesia sovrastante il percorso dopo il primo tornante</i> .....	18
5	MATERIALI .....	21
5.1	<i>Acciaio da carpenteria</i> .....	21
5.2	<i>Unioni bullonate</i> .....	21
5.3	<i>Calcestruzzo riempimento sottomurazione</i> .....	21
5.4	<i>Chiodature con barre tipo Dywidag</i> .....	22
5.5	<i>Rete metallica</i> .....	22
5.6	<i>Fune metallica</i> .....	23
6	Inquadramento geomeccanico delle aree di intervento .....	24
6.1	<i>Premessa</i> .....	24
6.2	<i>Inquadramento geomeccanico</i> .....	24
6.3	<i>Rilievo geomeccanico integrativo</i> .....	30

<b>7</b>	<b>Analisi di stabilità dei cunei e delle chiodature di consolidamento .....</b>	<b>33</b>
7.1	<b>Premessa .....</b>	<b>33</b>
7.2	<b>Metodologia di analisi tridimensionale dei cunei di roccia.....</b>	<b>33</b>
7.3	<b>Dati di input.....</b>	<b>34</b>
7.3.1	Volume e peso del cuneo di progetto .....	34
7.3.2	Spinta sismica del cuneo di roccia .....	35
7.3.3	Resistenza allo sfilamento del singolo elemento di chiodatura .....	36
7.4	<b>Risultati delle analisi.....</b>	<b>37</b>
<b>8</b>	<b>MONITORAGGIO .....</b>	<b>43</b>
8.1	<b>Premessa .....</b>	<b>43</b>
8.2	<b>Tipologie delle misure e degli strumenti .....</b>	<b>44</b>
8.2.1	Mire Topografiche (MT) .....	44
8.2.2	Celle di Carico sulla testata delle barre di chiodatura (CC) .....	45
8.2.3	Misuratori di giunti o fessurimetri (MG) .....	46
8.2.4	Termometri (TM) .....	47
8.2.5	Monitoraggio su basi fotografiche .....	47
8.3	<b>Figure con l'ubicazione dei punti di misura .....</b>	<b>51</b>
8.4	<b>Durata del monitoraggio e frequenze delle misure .....</b>	<b>53</b>
8.5	<b>Annotazioni .....</b>	<b>54</b>

## 2 PREMESSA

La presente relazione è parte integrante del progetto relativo all'intervento n. 3.a di *"Realizzazione/adequamento degli approdi all'isola di Santo Stefano – Opere di mitigazione del rischio crolli sulla falesia"*, rientrante tra gli 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 (Invitalia S.p.A.) per la realizzazione delle attività di soggetto attuatore del Contratto Istituzionale di Sviluppo (CIS) per il Recupero e la Rifunionalizzazione dell'*Ex Carcere Borbonico dell'isola di S. Stefano Ventotene*.

L'intervento generale di *Realizzazione/adequamento degli approdi all'isola di Santo Stefano*, considerata la peculiare condizione di insularità, con vincoli ambientali e difficoltà di accesso terrestre per la morfologia scoscesa della costa che riguarda l'intera isola, prevede la realizzazione in generale di opere di minimo impatto, privilegiando due punti di sbarco, già storicamente utilizzati, in posizioni diversamente esposte al mare, per consentirne l'uso alternativo in occasione di mareggiate, in relazione alla direzione di provenienza; i due approdi sono denominati scalo della Marinella, in posizione nord-ovest, e scalo n. 4, in posizione nord-est.

La realizzazione delle opere a mare nello scalo della Marinella è subordinata alla messa in sicurezza della falesia prospiciente l'approdo, vista la perimetrazione dell'area a pericolosità A e a rischio frana R4, riportata nel Piano di Assetto Idrogeologico (P.A.I.), predisposto dall'Autorità di Bacino del Distretto Idrografico Centrale.

Il presente progetto si riferisce, nello specifico, alle opere di mitigazione del rischio crolli sulle falesie prospicienti i due approdi; nel caso dello scalo 4 il progetto riguarderà anche la messa in sicurezza dei muretti a secco presenti lungo il percorso a gradoni, che conduce al carcere borbonico.



**Foto 1:Falesia dell'approdo Marinella**

Nella presente relazione si riportano le analisi geotecniche relative agli interventi previsti per la mitigazione del rischio di instabilità del versante della falesia nello scalo Marinella; si tratta, nello specifico, di cinque interventi, previsti in tre zone distinte, consistenti principalmente in rinforzi con singole chiodature e reti chiodate, rappresentati in dettaglio negli elaborati grafici di progetto, di cui si riportano alcuni stralci nel presente documento, con le relative raccomandazioni sulle modalità esecutive.

Tutte le informazioni utili alla redazione della presente relazione sono state ricavate dalle ricognizioni effettuate e dalla consultazione dei documenti seguenti, allegati al progetto:

- *2017E037INV-01-D-GE-RGEO000: Relazione Geologica*, redatta dal Dott. Geol. Vincenzo Guido;
- *Relazione Tecnica sulle indagini di Rilevamento Geologico-Tecnico e Analisi di Stabilità GEODES - Rev. 1 del 07.12.2020*, di cui alle indagini eseguite dalla *Geodes Laboratori di Bevilacqua M. Gabriella* nel mese di ottobre 2020 (codice elaborato: 2017E037INV-02-D-GE-IND001);
- *Relazione Tecnica sulle Rilievi geomeccanici integrativi da remoto, eseguiti da Geoapp s.r.l.* – codice elaborato *codice elaborato 2017E037INV-02-D-GE-IND002*.

Con particolare attenzione agli interventi sulla falesia principale prospiciente l'approdo, di seguito descritto, il presente studio recepisce quanto riportato nella Relazione Geologica di progetto, in merito ai rilievi geomeccanici effettuati nelle varie stazioni (rilievi eseguiti dalla *Geodes Laboratori di Bevilacqua M. Gabriella* nel mese di ottobre 2020) e alle relative indicazioni delle giaciture e delle possibili criticità. Queste ultime sono individuate dalle stazioni geomeccaniche SG1, SG2A e SG2B. In tali aree la falesia sarà stabilizzata con chiodature con barre in acciaio (tipo *Dywidag*) di lunghezza 3 e 6 m, rete metallica e funi, al fine di ricucire le eventuali fratture e contenere i possibili distacchi di blocchi superficiali.

L'intervento proposto è stato analizzato e verificato con analisi rigido-plastiche tridimensionale "a cunei", come esposto nel seguito. Il metodo appare appropriato in relazione ai potenziali cinematismi di tipo locale, che sono quelli risultati a maggiore criticità sulla base delle osservazioni e rilievi effettuati. Solo l'evoluzione delle criticità locali può comportare degradi tali da coinvolgere instabilità più ampie di tipo globale che, se pur subordinate, sono comunque state oggetto di analisi.

L'analisi è stata effettuata a partire da uno stato iniziale ipotizzato con fattori di sicurezza prossimi all'unità, assumendo opportuni parametri di resistenza dei giunti di roccia.

Si osserva che l'approccio numerico non può essere deterministico nella valutazione dei fattori di sicurezza; lo stato iniziale è posto, convenzionalmente e cautelativamente, con fattori di sicurezza prossimi all'unità (condizione al limite dell'equilibrio), ma che, di fatto, potrebbero essere superiori. I risultati di rilevanza progettuale sono gli incrementi dei fattori di sicurezza a seguito degli interventi, che daranno la misura dell'efficacia in termini relativi.

Ulteriori verifiche di stabilità di tipo "globale", condotte con analisi bidimensionale, sono state effettuate a compendio ed approfondimento sui possibili rischi di criticità a scala maggiore e per verifiche di sensibilità sugli effetti delle reali altezze delle falesie e sulla efficacia delle lunghezze delle chiodature – queste verifiche sono illustrate ed i risultati commentati nella Relazione Geologica richiamata.

Nella seconda parte della relazione è stato descritto il sistema di monitoraggio previsto per valutare l'adeguatezza degli interventi proposti e per il controllo delle possibili evoluzioni del

complesso della falesia nel tempo.



**Foto 2: Vista Panoramica dello scalo della Marinella e della via d'accesso pedonale fino all'Ex Carcere Borbonico**

### 3 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO

#### 3.1 Normativa tecnica

Le normative di riferimento utilizzate sono le seguenti:

DM 17.01.2018	Aggiornamento delle Nuove norme tecniche per le costruzioni (di seguito NTC-2018);
CIRCOLARE 21 GENNAIO 2019, N. 7	Istruzioni per l'applicazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni di cui al DM 17/01/2018 (DI SEGUITO Circolare di applicazione NTC-2018);
MINISTERO DELL'INTERNO CORPO NAZIONALE DEI VIGILI DEL FUOCO	Vademecum STOP – schede tecniche delle opere provvisoriale per la messa in sicurezza post-sisma da parte dei vigili del fuoco. Aprile 2010;
AUTORITA' DEI BACINI REGIONALI DEL LAZIO	PIANO STRALCIO PER L'ASSETTO IDROGEOLOGICO (P.A.I.) – Norme di Attuazione. (B.U.R.L. n. 21 del 07/06/2012 – S.O. n. 35);
AUTORITA' DEI BACINI REGIONALI DEL LAZIO	PIANO STRALCIO PER L'ASSETTO IDROGEOLOGICO (P.A.I.) – Relazione Tecnica (B.U.R.L. n. 21 del 07/06/2012 – S.O. n. 35);

Ad integrazione delle sopracitate norme e per quanto con esse non in contrasto, sono stati utilizzati ed elencati i documenti di seguito indicati:

- Eurocodici strutturali pubblicati dal CEN, con le precisazioni riportate nelle Appendici Nazionali;
- Norme UNI EN armonizzate i cui riferimenti siano pubblicati su Gazzetta Ufficiale dell'Unione Europea;
- Norme per prove, materiali e prodotti pubblicate da UNI;
- Istruzioni del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici;
- Linee Guida del Servizio Tecnico Centrale del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici.

### 3.2 Documenti progettuali

Per quanto riguarda gli interventi descritti, si riporta di seguito l'elenco degli elaborati progettuali di riferimento:

- 2017E037INV-02-D-GE-RGEO000: Relazione Geologica;
- Relazione Tecnica sulle indagini di Rilevamento Geologico-Tecnico e Analisi di Stabilità GEODES - Rev. 1 del 07.12.2020.
- 2017E037INV-02-D-S0-TAV001: *“Progetto Strutturale - Mitigazione del rischio di instabilità del versante. Interventi di progetto: Planimetria e Prospetti”*;
- 2017E037INV-02-D-S0-TAV002: *“Progetto Strutturale - Mitigazione del rischio di instabilità del versante. Interventi di sottomurazione: Planimetria e Sezioni”*;
- 2017E037INV-02-D-S0-TAV003: *“Progetto Strutturale - Mitigazione del rischio di instabilità del versante. Barre di chiodatura, reti e funi aderenti: Dettagli costruttivi”*;
- 2017E037INV-02-D-S0-TAV004: *“Progetto Strutturale - Mitigazione del rischio di instabilità del versante. Falesia Marinella e Cimitero: Schemi di installazione punti di misura per monitoraggio”*

## 4 Descrizione degli interventi

### 4.1 Premessa

Il progetto di mitigazione del rischio di instabilità del versante prevede tre settori o zone principali di intervento sulle quali sono stati applicati cinque tipi di intervento; le zone sono identificate negli stralci planimetrici e di prospetto riportati nelle figure seguenti, estratte dagli elaborati grafici ai quali si rimanda per la relativa consultazione di dettaglio.

Nello specifico, trattasi delle seguenti zone:

- **Zona A:** Falesia prospiciente l'approdo;
- **Zona B:** Muro e roccia sottostanti il percorso esistente, lato mare;
- **Zona C:** Falesia sovrastante il percorso, dopo il primo tornante.

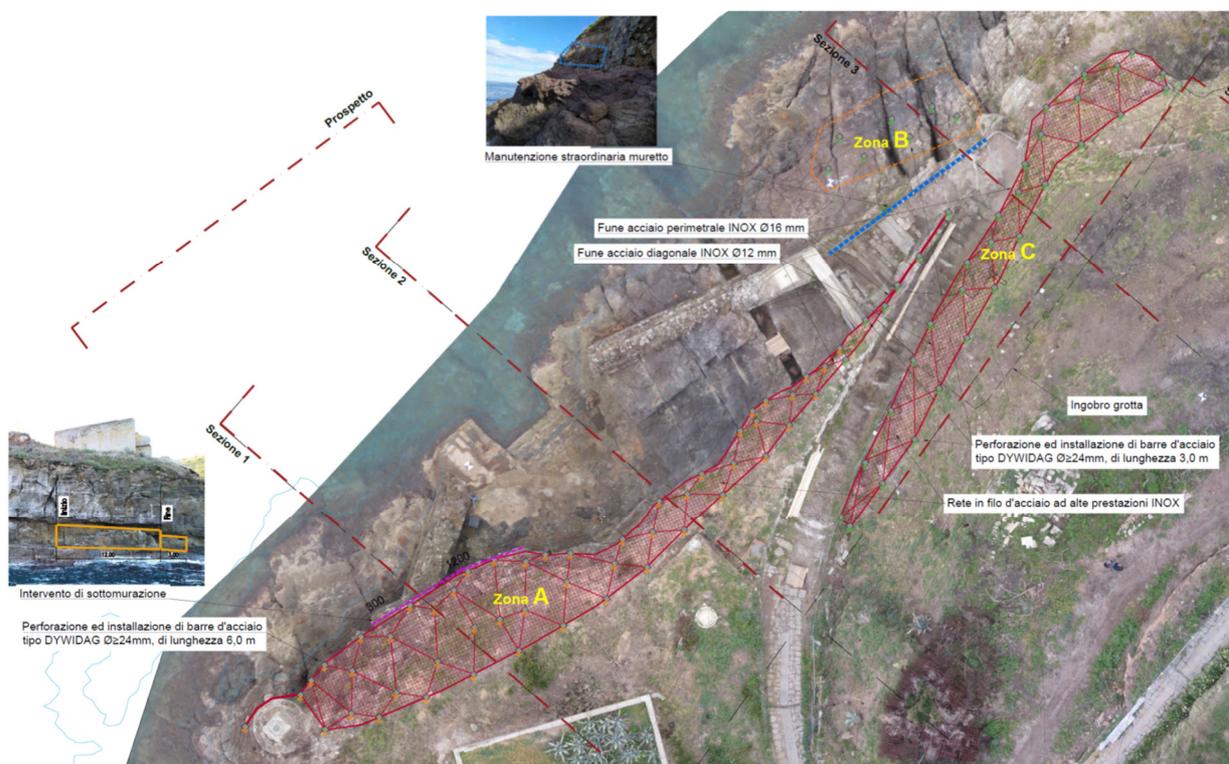
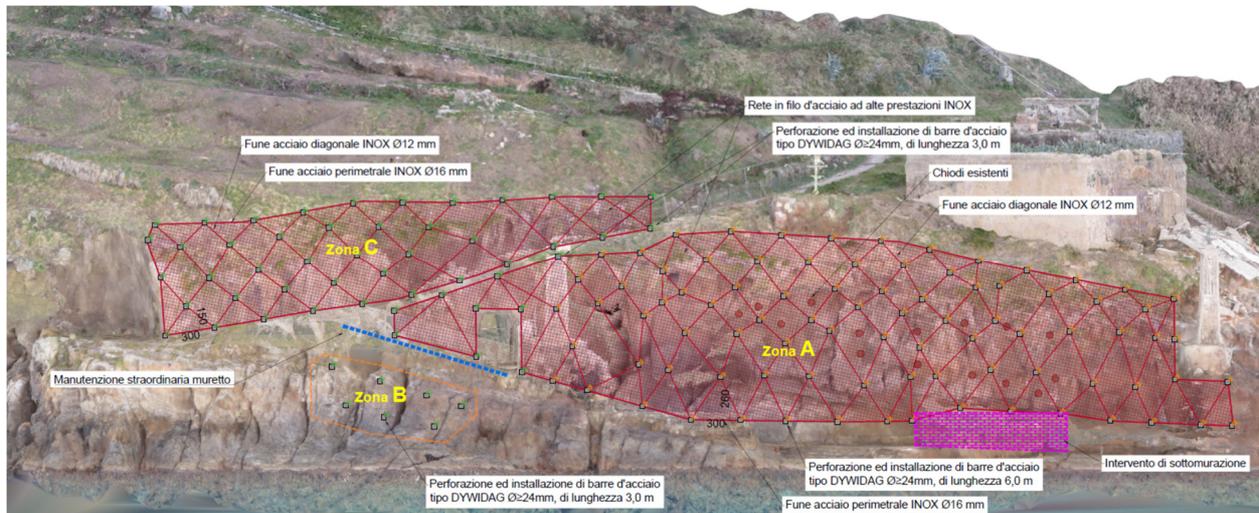


Figura 1. Foto-inserimento planimetrico degli interventi di progetto



**Figura 2: Foto-inserimento in prospettiva degli interventi di progetto**

Sulle zone individuate sono state applicate cinque diverse tipologie di interventi, definite sulla base delle criticità riscontrate dalle osservazioni e dai rilievi, di cui all'elenco seguente:

- **Intervento 1:** Ispezione e pulizia della parete rocciosa e demolizione di porzioni rocciose in precarie condizioni di stabilità.

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

- **Intervento 2:** Rafforzamento della parete rocciosa mediante chiodature con barre metalliche.

Perforazione ed installazione delle barre metalliche di chiodatura tipo Dywidag  $\varnothing \geq 24\text{mm}$ , di lunghezza 3.0 m, cementate con miscele cementizie

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

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  $6 \div 8 \text{ m}^2$ . Le testate delle barre saranno munite di golfari. Installazione

delle reti metalliche aderenti a maglia romboidale con filo in acciaio ad alta resistenza  $d \geq 2$  mm. Installazione delle funi metalliche sui golfari: di sommità e al piede  $\varnothing 16$  mm e diagonali  $\varnothing 12$  mm.

- **Intervento 4:** Manutenzione straordinaria della parete in muratura e roccia.

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 lapidei dovranno essere della stessa tipologia di quelli presenti. La ricostruzione deve avvenire. Sistemazione e ricostruzione della porzione nella parte superiore del muro, nel rispetto della sagoma esistente. Ripristino delle condizioni di drenaggio

- **Intervento 5:** Sottomurazione sulla parete rocciosa

Realizzazione di una parete in muratura realizzata con blocchetti di roccia lavica, legati con malta cementizia, pilastri con profili HEA 300, aventi interasse circa 1,5 m, e riempimento a tergo con calcestruzzo magro pompabile tipo geomix.

Nella tabella seguente si rappresenta un compendio delle zone trattate con i rispettivi interventi applicati; nel paragrafo seguente si riportano le descrizioni dettagliate.

**Tabella 1: Zone con elenco dei singoli interventi**

Zona di intervento	Interventi
<b>A</b> Falesia prospiciente l'approdo	<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, 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, 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

#### 4.2 Zona A: Falesia prospiciente l'approdo

La falesia prospiciente l'approdo della Marinella è senza dubbio la zona più critica, situata dinnanzi allo scalo ed oggetto principale del presente studio.

L'area è stata indagata, in una prima fase, con le stazioni geomeccaniche SG1, SG2A e SG2B, per le quali il test di Markland ha rilevato la compatibilità cinematica con il distacco di cunei di roccia, per le giaciture rilevate. Una seconda campagna di indagini, eseguita tramite rilievo con drone e laser scanner, ha fornito una più dettagliata descrizione dei potenziali cinematismi, di cui all'elenco seguente:

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

Per tale motivo si è reso necessario un intervento di mitigazione del rischio con una chiodatura, ad integrazione di un intervento analogo, realizzato nel 2020.



**Foto 3: Zona A stato attuale - Cavità antropica da chiudere per sottomurazione e falesia fessurata da stabilizzare tramite chiodature**

Gli interventi di mitigazione dovranno essere preceduti da una fase di ispezione visiva e di pulizia,

per verificare le condizioni locali e ottimizzare le posizioni per le perforazioni; a questa fase seguirà il disgiungimento delle porzioni instabili, metastabili o di forte irregolarità, con mezzi di demolizione meccanici.

Le chiodature con barre d'acciaio (intervento di tipo attivo) costituiscono l'elemento principale di stabilizzazione dei cunei rocciosi, tramite ricucitura delle fessure, con conseguente aumento generale della resistenza al taglio media dell'ammasso e miglioramento delle condizioni di stabilità globali e locali. La scelta di barre di diametro adeguato e di elevata classe di acciaio è fondamentale per conferire alla cucitura un significativo aumento di resistenza al taglio oltre che di resistenza allo sfilamento, aumentando l'efficacia dell'intervento per i vari piani di giacitura delle fessure.

Le chiodature sono corredate da reti aderenti e funi metalliche (intervento di tipo passivo), che evitano la caduta dei massi di piccole dimensioni (decimetrici). Il tipo di rete scelta soddisfa i requisiti di resistenza, durabilità e ridotta visibilità.

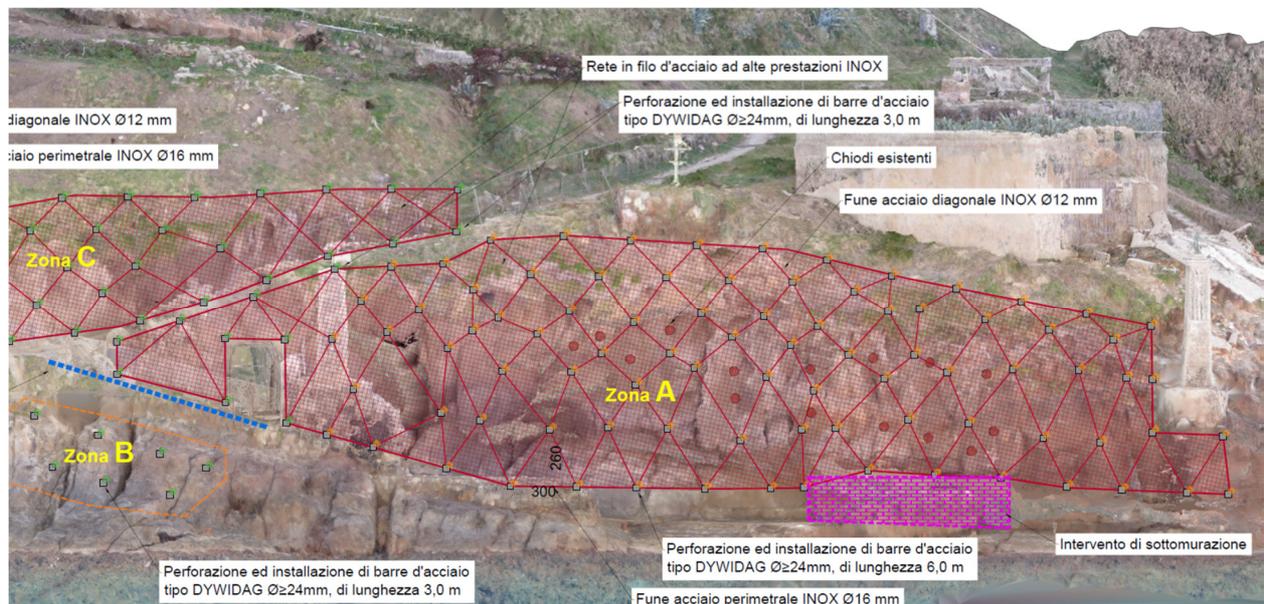
La falesia prospiciente l'approdo Marinella è già stata interessata da *"Lavori di somma urgenza a tutela della pubblica incolumità per la messa in sicurezza accessi sull'isola di Santo Stefano – Approdi Marinella e Scalo n. 4 – CIG: Z7A2EF99AD"*, affidati dal Comune di Ventotene.

I lavori sono stati eseguiti dall'Impresa CONSOLIDAMENTI s.r.l. di Narni (TR), ultimati il 25/11/2020; sulla base delle informazioni acquisite, i lavori effettuati sono consistiti nell'esecuzione di 15 chiodature  $\varnothing 24\text{mm}$  di lunghezza 6.0 m, non collegate con funi, rappresentate nella Figura 3 (pallino disgiunto dalla rete).

Il nuovo intervento di progetto prevede l'inserimento di barre tipo *Dywidag*  $\varnothing \geq 24\text{mm}$ , di lunghezza 6.0 m, nella parte inferiore, e 3.0 m, nella parte superiore, con una densità di circa di 1 barra ogni  $6 \div 8 \text{ m}^2$ . Si prevede inoltre una rete metallica in filo inossidabile  $\varnothing = 2\text{mm}$ ; la testa filettata di ciascun chiodo sarà dotata di un golfare che consente il collegamento delle chiodature con funi di acciaio diagonali  $\varnothing 12\text{mm}$ . Funi di acciaio  $\varnothing 16\text{mm}$  completeranno il sistema delle reti in sommità ed alla base. In ausilio e per la sicurezza della cantierizzazione dovrà essere predisposta una idonea "linea vita" sommitale.

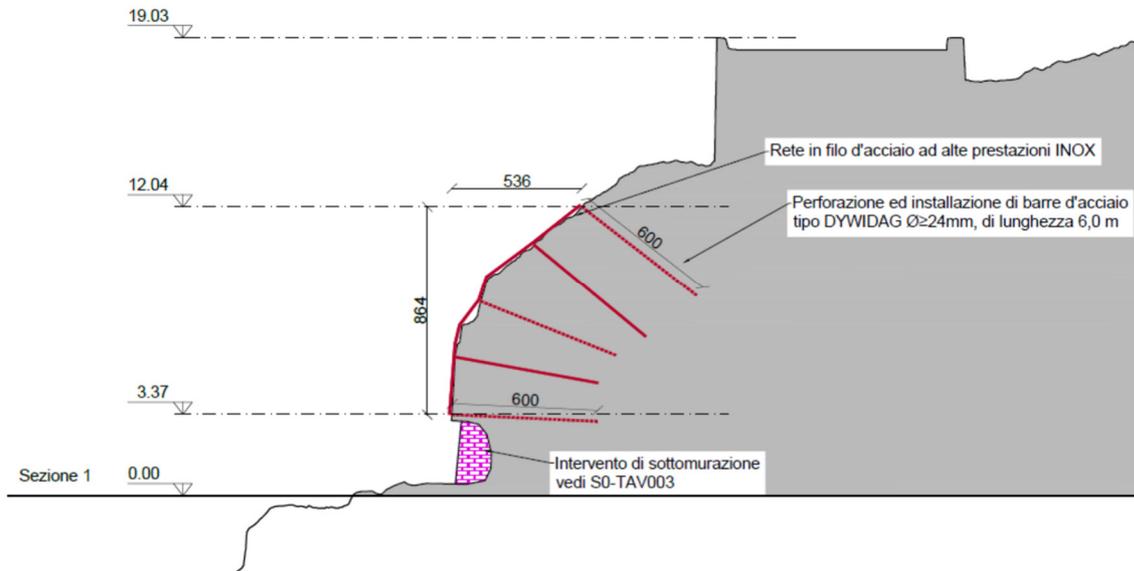
In Figura 3 è riportato uno stralcio con l'indicazione dell'intervento di progetto, la cui estensione

si sviluppa dalla colonna del Cristo Redentore fino al primo tornante. La disposizione delle chiodature mostrata è indicativa; la disposizione reale e l'inclinazione di ciascuna perforazione sarà dettagliatamente stabilita in sito, di concerto con la D.L., avendo cura di posizionare la testa del singolo elemento di consolidamento in una porzione di roccia integra e non nell'immediata prossimità di una frattura, valutando tra l'altro le angolazioni ottimali per ottenere una efficace ricucitura delle fessure.



**Figura 3. Zona A: Falesia prospiciente l'approdo Marinella. Integrazione delle chiodature esistenti con chiodature di lunghezza 6 m e 3 m, rete e funi metalliche**

Laddove, a seguito dell'attività di ispezione preventiva e tracciamento dei chiodi, dovesse risultare che le posizioni delle barre in progetto risultassero prossime a quelle esistenti si ricorrerà a barre tipo Dywidag  $\varnothing \geq 17.5$  mm, lunghezza 1.5 m con golfare, per il solo scopo di fissaggio delle funi e reti metalliche.



**Figura 4. Zona A: Falesia prospiciente l'approdo Marinella e sottomurazione - sezione tipo**

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'aggetto.

L'intervento della sottomurazione sarà costituito dai seguenti elementi strutturali:

- Pilastri costituiti da putrelle metalliche HE300A con passo 1.5 m, da inserire verticalmente, su apposite piastre terminali, allettate con malta ad alta resistenza, con metodologia idonea

a “forzatura” per ottenere immediata messa in carico nei confronti di piccoli eventuali assestamenti.

- Muretto di rivestimento in pietra lavica naturale montato con malta cementizia, con materiali e tessitura che saranno dello stesso tipo dei muretti esistenti nell’area dello scalo; il muretto ha solo una funzione estetica.
- Riempimento della zona a tergo del muretto, da eseguire con calcestruzzo magro pompabile, necessario in quanto il muretto non resisterebbe all’impatto delle onde. Il riempimento verrà eseguito a tratti di altezza circa 0.60 m, di pari passo con l’innalzamento del muretto, per limitare la spinta idrostatica che, per altezze elevate potrebbe compromettere la stabilità dello stesso. Per ottenere un collegamento fra il muretto ed il riempimento si impiegheranno teli rettangolari di rete in acciaio inox.
- Barre d’acciaio da cementare e perforazioni da eseguire nella roccia e con testate sporgenti da inglobate nel riempimento, per completare la solidarizzazione fra tutti gli elementi, roccia, riempimento e muretto di chiusura frontale.

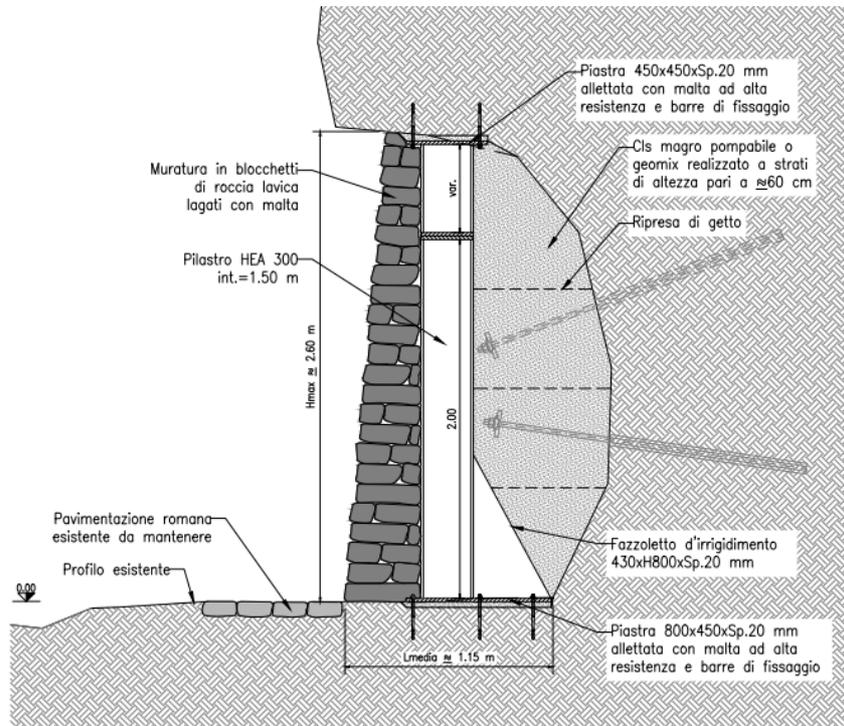
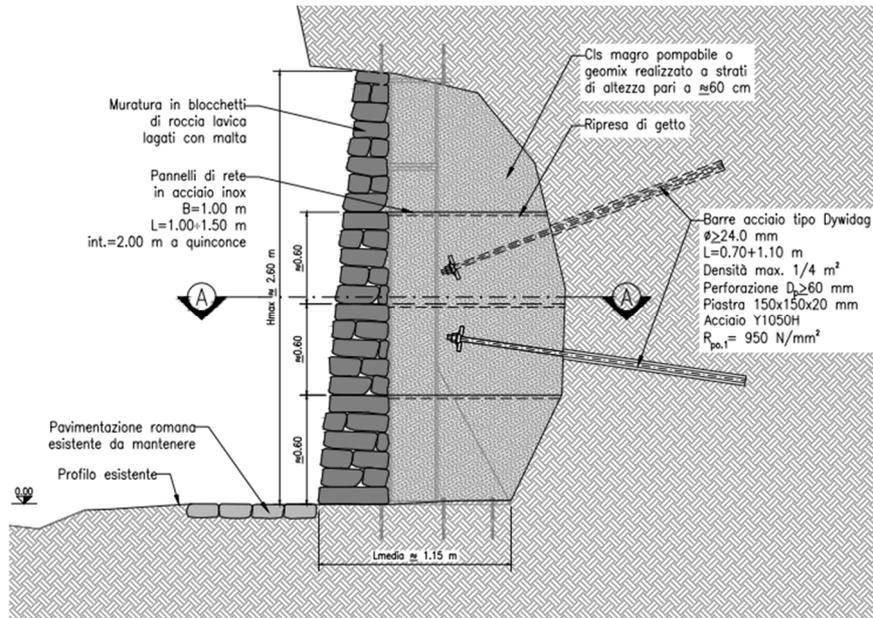


Figura 5. Intervento di sottomurazione: sezioni trasversali

#### 4.3 Zona B: Muro e roccia sottostanti il percorso, lato mare

Il sostegno del sentiero che parte dall'approdo, lato mare, è in buona parte costituito da un muretto in pietra naturale, che presenta dissesti locali (si veda Figura 6).



**Figura 6. Zona B stato attuale - Muro e roccia sottostanti il percorso Marinella, con evidenza di dissesti locali**

Si prevedono i seguenti interventi di manutenzione straordinaria:

- Ispezione, con rilievo delle attuali condizioni del muro;
- Pulizia e rimozione delle parti instabili;
- Riempimento degli spazi liberi del muro con pietrame di adeguate dimensioni e con l'impiego di malte cementizie. Il pietrame ed il legante dovranno essere dello stesso tipo di quelli esistenti;
- Sistemazione e ricostruzione della parte superiore del muro, maggiormente degradata;
- Ripristino di un sistema di drenaggio;
- Sfalciatura della vegetazione infestante, localmente dannosa per il manufatto e interferente con i lavori, previa verifica del rispetto delle indicazioni e delle mappature delle essenze da parte della Riserva naturale Statale;
- Per le porzioni di muro degradate, deformate o crollate si prevede lo smontaggio e la ricostruzione locale, nel rispetto di sagoma esistente.
- Ispezione e pulizia della parete rocciosa e demolizione di porzioni rocciose in precarie condizioni di stabilità.

- inserimento di barre tipo *Dywidag*  $\varnothing \geq 24\text{mm}$  di lunghezza 3.0 m con una densità di circa di 1 barra ogni  $6 \div 8 \text{ m}^2$ . Quest'ultimo intervento è finalizzato al rafforzamento dell'ammasso roccioso e alla ricucitura di fessure.

Non si ritiene, al momento, utile inserire reti e funi in acciaio perché l'eventuale caduta di pietre o detriti, comunque di modesta dimensione, avverrebbe direttamente in mare e non costituisce, pertanto, pericolo per l'incolumità di persone.

Le condizioni di stabilità della porzione di falesia sommersa non appaiono critiche e di pericolo; l'esito dei rilievi geostrutturali appare molto incerto per le difficili condizioni ambientali. Non si ritiene, al momento, utile proporre interventi di presidio anche per le elevate difficoltà esecutive e per l'impatto che si avrebbe sul fondale; eventuali piccoli dissesti locali non costituirebbero, comunque, pericolo.

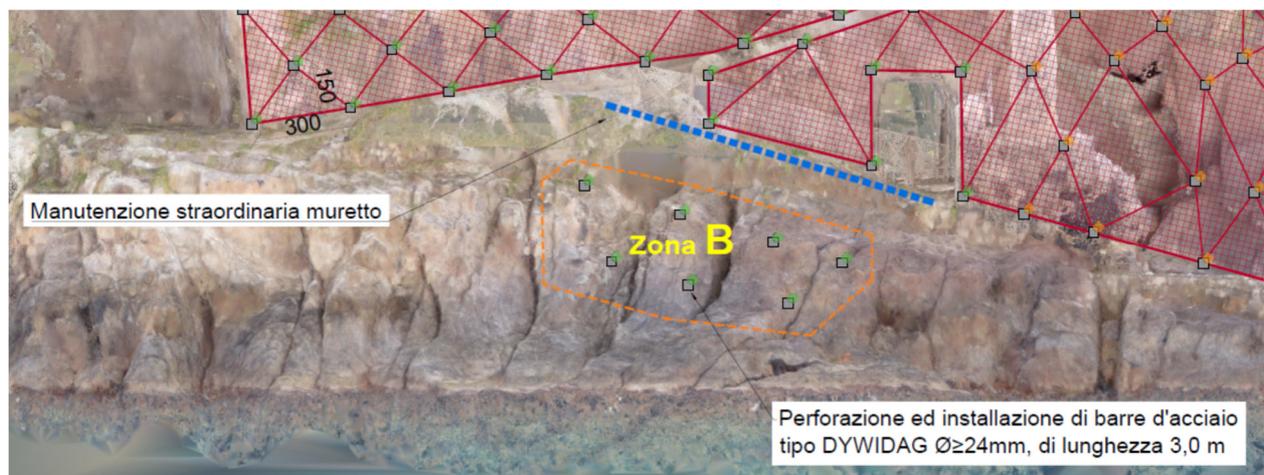


Figura 7. Zona B: Manutenzione straordinaria del muro e roccia sottostanti il percorso

#### 4.4 Zona C: Falesia sovrastante il percorso dopo il primo tornante

La porzione di falesia sovrastante il percorso che si dirama dall'approdo della Marinella, subito dopo il primo tornante, riguarda una zona meno critica rispetto a quella relativa alla zona A (par. 4.2). In questo tratto la falesia è stata prodotta dallo scavo per la realizzazione del percorso; la sua superficie si presenta piuttosto planare, quasi verticale, con altezza massima di circa 3.0 m

che si riduce nel verso della salita del sentiero.

L'ispezione visiva ha rilevato un quadro maggiormente stabile nell'ammasso costituente la falesia, che ha richiesto di ricucire le fessure naturali al fine di mitigare il rischio di degrado a lungo termine.



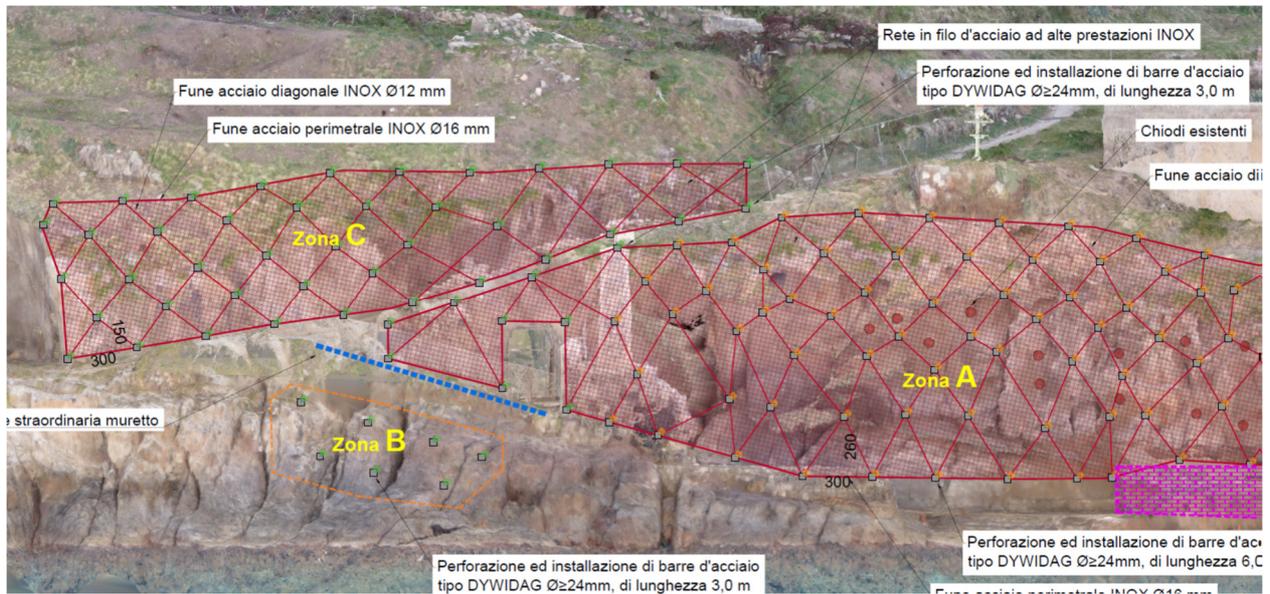
**Figura 8. Zona C stato attuale - Falesia sovrastante il percorso Marinella dopo il primo tornante**

La messa in opera di tali interventi deve essere preceduta da una ispezione visiva, da una pulizia e da un disaggio degli elementi instabili.

Si predispongono chiodature con barre tipo Dywidag  $\varnothing \geq 24\text{mm}$ , di lunghezza 3.0 m, con densità circa di 1 barra ogni  $6 \div 8 \text{ m}^2$ ; laddove la barra dovesse interessare la cavità presente, si dovrà prevedere la messa in opera del piatto di ancoraggio anche nella seconda estremità.

In particolare, la porzione di parete con roccia affiorante a monte del sentiero, generata da un "taglio" antropico, necessita di piccoli interventi di disaggio, per lo più concentrati nella parte sommitale.

Per la porzione superiore della falesia e sul pendio sovrastante, ricoperto da terreno vegetale con forte acclività, si prevedono anche reti e funi metalliche al fine di preservare il sentiero da pericoli di caduta massi per eventuali distacchi superficiali.



**Figura 9. Zona C: Falesia sovrastante il percorso Marinella dopo il primo tornante: Chiodature L=3m sulla falesia e sul pendio sovrastante.**

## 5 MATERIALI

### 5.1 Acciaio da carpenteria

Per i profili laminati a caldo si dovranno utilizzare acciai conformi alle norme armonizzate UNI EN 10025-2, di classe non inferiore a S355, per la quale si ha:

- Tensione di snervamento caratteristica 355 MPa;
- Tensione di rottura caratteristica 510 MPa;
- Modulo elastico 210000 MPa;
- Fattori parziali di sicurezza secondo NTC-18.

Per i profili cavi, utilizzati nelle opere provvisoriale, sarà utilizzato acciaio UNI EN 10210 S235JRH; sono accettati acciai con resistenze meccaniche superiori.

Tutte le componenti dovranno essere protette mediante zincatura a caldo secondo EN ISO 1461:2009.

### 5.2 Unioni bullonate

Per le unioni bullonate saranno utilizzate viti UNI EN 898-1 classe 8.8 e dadi UNI EN 898-2 classe 8; sono accettate componenti con resistenze meccaniche superiori.

L'insieme deve rispondere alla UNI EN 15048 ed essere munito di rondella sotto dado.

- Tensione di snervamento caratteristica 640 MPa;
- Tensione di rottura caratteristica 800 MPa;
- Fattori parziali di sicurezza secondo NTC-18.

### 5.3 Calcestruzzo riempimento sottomurazione

Magrone:

- Classe di resistenza C12/15;
- Classe di consistenza S4;
- Diametro massimo dell'aggregato 32 mm;
- Classe d'esposizione X0;

Terreno artificiale pompabile (tipo geomix):

- Resistenza a compressione a 28gg 1-2 MPa;
- Massa volumica 18 kN/mc;
- Modulo elastico 400-600 MPa;
- Permeabilità all'acqua 0.0005-0.001 m/s.

#### 5.4 Chiodature con barre tipo Dywidag

Tiranti di tipo passivo con Certificazione di Valutazione Tecnica rilasciato dal CSLPP o accompagnato da ETA.

Chiodi costituiti da barre filettate in acciaio armonico con le seguenti caratteristiche:

- Tensione caratteristica al carico massimo 1050 MPa;
- Tensione caratteristica allo 0.1% di deformazione residua 900 MPa;
- Allungamento totale percentuale a carico massimo 3.5%;
- Diametro M24;
- Rivestimenti protettivi zincatura a caldo.

Boiaccia per cavi di precompressione EN 447:

- Cemento tipo II o tipo III;
- Rapporto a/c <0.40-0.50;
- Fluidità iniziale 10-30 secondi;
- Fluidità a 30' <80 secondi;
- Essudamento <2%;
- Variazione di volume tra -1% e 5%;
- Resistenza a compressione >30 MPa.

Golfari femmina DIN 582:2021 in acciaio:

- Portata 1800 daN;
- Coefficiente di sicurezza 4:1;
- Misura M24;
- Rivestimenti protettivi zincatura a caldo.

#### 5.5 Rete metallica

Rete in acciaio armonico inossidabile EN 10218-1,2, EN 10264-1,2 romboidale:

- Resistenza caratteristica al carico massimo 1775 MPa;

- Tipo di acciaio AISI316 (EN 1.4401);
- Diametro filo 2mm.

## 5.6 Fune metallica

Fune in acciaio armonico inossidabile ad anima metallica EN 10218-1,2, EN 10264-1,2:

- Resistenza caratteristica al carico massimo dei fili 1775 MPa;
- Tipo di acciaio AISI316 (EN 1.4401);
- Diametro nominale (DIN3060) 12-16 mm;
- Carico di rottura minimo 75(12) 133(16) KN.

## 6 INQUADRAMENTO GEOMECCANICO DELLE AREE DI INTERVENTO

### 6.1 Premessa

Tutte le informazioni riguardanti la caratterizzazione del sito in esame sono state ricavate dalla Relazione geologica di progetto, alla quale si rimanda per i relativi approfondimenti; nel paragrafo successivo sono riportati i dati e le informazioni principali utili per le analisi di stabilità eseguite.

### 6.2 Inquadramento geomeccanico

Lo scalo della Marinella è costituito dalla Formazione di Santo Stefano, che consiste in un substrato lavico fratturato (riconducibile a trachi-basalti).

Nell'area oggetto di studio sono disponibili n.2 sondaggi a carotaggio continuo, eseguiti a mare, fino alla profondità di 22 e 23 m. I due sondaggi, data la loro posizione, seppur nei pressi dell'approdo, non possono fornire informazioni utili sulla stabilità della falesia.

La parte affiorante dell'approdo, costituita da lave e scorie della Formazione di Santo Stefano, si presenta con aspetto litoide, con uno stato di fratturazione principalmente dovuto alla fase di messa in posto e di raffreddamento. Le fratture principali sono 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 cunei potenzialmente instabili.

Per quanto riguarda il percorso che dall'approdo conduce verso il carcere, il rischio è identificato nella possibilità di crolli che interessano soprattutto la falesia, per la conformazione geometrica e per la giacitura subverticale.



Figura 10. Prima rampa del sentiero dallo scalo



Figura 11. Seconda rampa del sentiero

Sulla base del rilievo geologico e geomeccanico sono disponibili alcune sezioni geomorfologiche in cui si mettono in evidenza i principali elementi che danno luogo al potenziale dissesto idrogeologico.

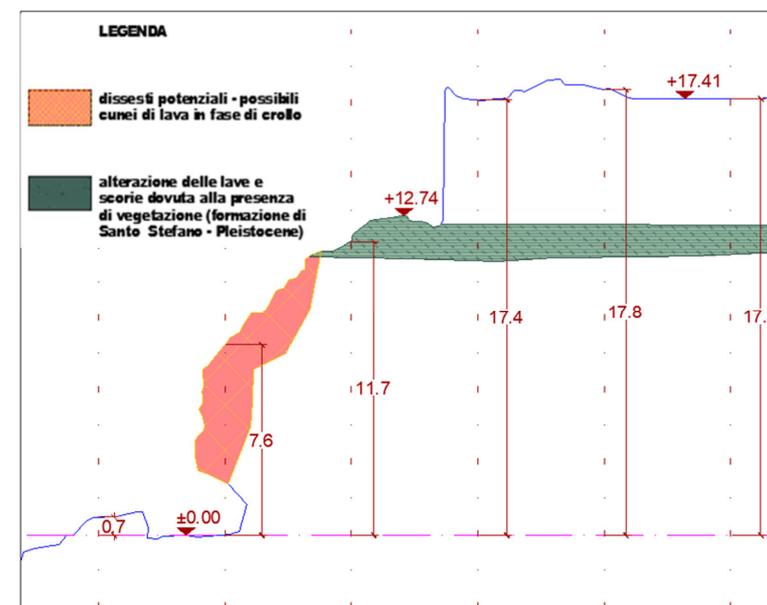


Figura 12. Sezione geomorfologica della falesia

Per la caratterizzazione delle falesie dell'isola di Santo Stefano e, nello specifico, della falesia prospiciente l'attuale scalo della Marinella, ha svolto un ruolo chiave la campagna di rilevamento geostrutturale, di cui alle indagini richiamate in premessa, eseguita su n.3 stazioni geomeccaniche secondo i criteri e le raccomandazioni della ISRM (International Society for Rock Mechanics).



**Figura 13. Stazioni geomeccaniche SG1, SG2A e SG2B nella zona dello scalo della Marinella**



**Figura 14. Stazioni geomeccaniche SG3 nella zona dello scalo n. 4.**

In località Marinella sono state eseguite due stazioni geomeccaniche, denominate SG1 ed SG2, con ubicazione indicata in Figura 3; la stazione SG2 è stata suddivisa verticalmente in SG2A e SG2B a causa di un cambio di inclinazione e ramificazione delle discontinuità presenti sull'affioramento.

Per ogni stazione sono state stimate le dimensioni dei blocchi di roccia formati, attraverso la formula di [Palmstrom, 2005]; tale stima, utile al dimensionamento dell'intervento di chiodatura, ha consentito di definire come volume medio dei blocchi (VB) che si possono formare in possibili distacchi un valore variabile tra 1,86 e 4,48 m<sup>3</sup>.



Figura 15. Stazioni geomeccaniche SG2A e SG2B.

Lo studio geomeccanico dell'ammasso ha portato ad escludere la necessità di sostegni nella zona indagata con la stazione geomeccanica SG3, i cui risultati non sono pertanto inclusi nelle elaborazioni riportate nel seguito, che si concentrano sulla zona di intervento.

Lo studio include le seguenti principali caratterizzazioni:

- **Rugosità**, con il pettine di **Barton**: JRC = 10÷16 (in una scala da 0 a 20), con conseguente resistenza a compressione dei giunti inclusa tra 25 e 55 MPa.
- **Geological Strength Index** di **Marinos e Hoek**, indice dello stato di fratturazione: GSI = 65÷70 (su una scala da 5 a 95).
- **Rock Mass Rating** di **Bieniawski**, basato su resistenza a compressione monoassiale, Rock Quality Designation, spaziatura, condizioni delle discontinuità e condizioni idrauliche dei

giunti:  $RMRc$  (corretto) =  $36 \div 38$  (su una scala da 0 a 50), con conseguente coesione media di  $305 \div 315$  kPa e angolo di resistenza al taglio di  $35.5 \div 36.5^\circ$ .

- **Slope Mass Rating di Romana:** risulta  $SMR=76.9 \div 78.9$ , che identifica ammassi di qualità buona e mal predisposti sia a fenomeni di scivolamento che fenomeni di ribaltamento.

È stato, infine, eseguito il *test di Markland* per ogni stazione geomeccanica rilevata in campagna. Tale test, considerando i meccanismi di movimento di scivolamento planare, ribaltamento e distacco di cunei, misura la predisposizione al cinematismo e l'ammissibilità dinamica dello stesso, sulla base delle giaciture rilevate e dei parametri di attrito dati dal metodo di Bieniawsky, per ciascuna stazione.

I risultati ottenuti sono i seguenti:

- La stazione SG1 registra compatibilità cinematica e ammissibilità dinamica per distacchi di cunei tra le famiglie 3 e 4 e tra le famiglie 4 e 5, e compatibilità cinematica, ma non ammissibilità dinamica, per lo scorrimento planare;
- La stazione SG2A registra compatibilità cinematica, ma non ammissibilità dinamica, per lo scorrimento planare;
- La stazione SG2B registra compatibilità cinematica e ammissibilità dinamica per distacchi di cunei, e compatibilità cinematica, ma non ammissibilità dinamica, per lo scorrimento planare.

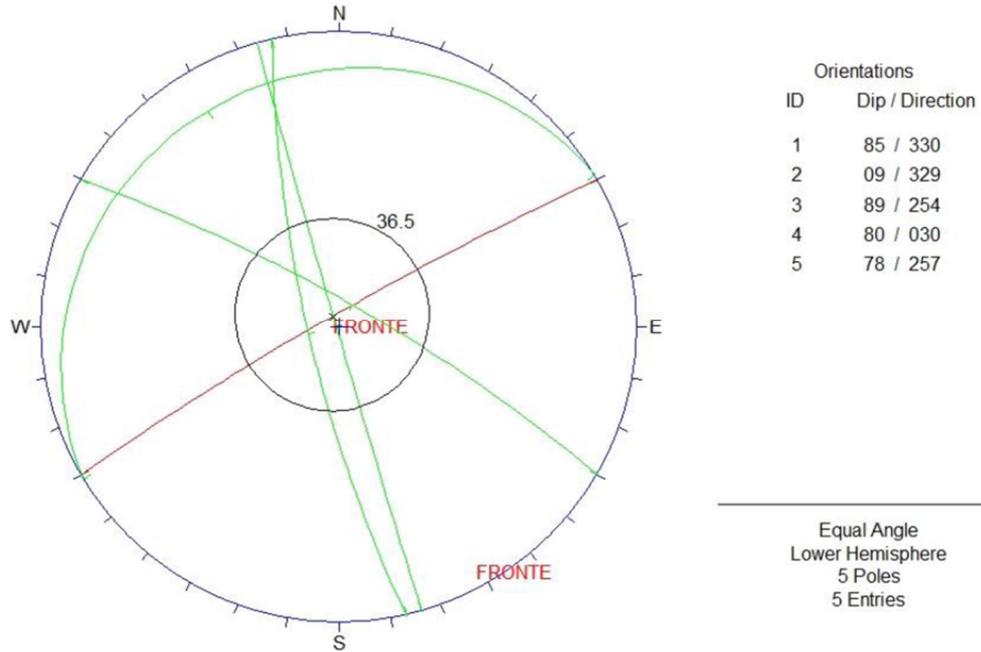


Figura 16. Test di Markland e giaciture per la stazione geomeccanica SG1 (da Relazione Geologica)

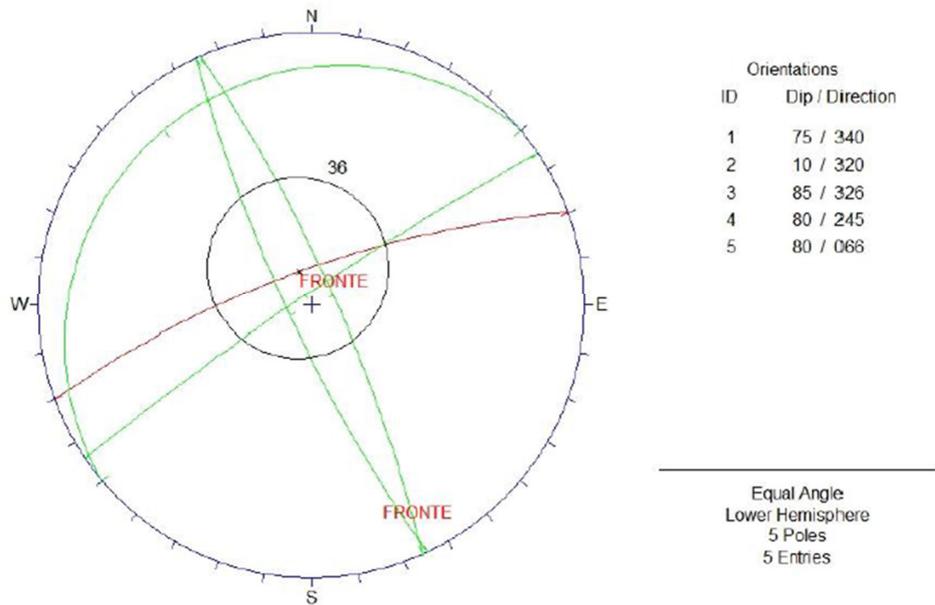


Figura 17. Test di Markland e giaciture per la stazione geomeccanica SG2A (da Relazione Geologica)

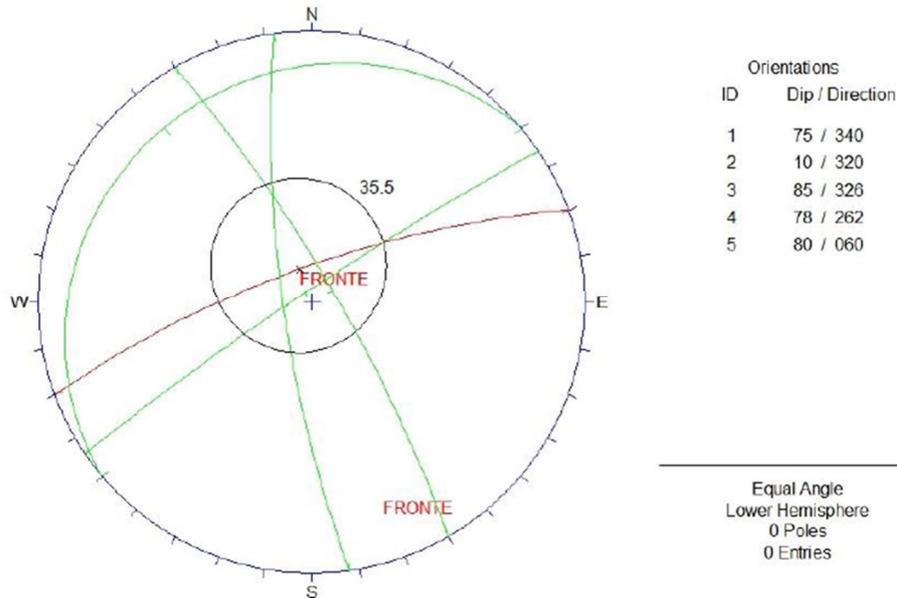


Figura 18. Test di Markland e giaciture per la stazione geomeccanica SG2B (da Relazione Geologica)

### 6.3 Rilievo geomeccanico integrativo

Come su riportato, per approfondire lo stato conoscitivo è stato eseguito un ulteriore rilievo geomeccanico da remoto dell'ammasso roccioso, presso gli scali interessati, mediante l'impiego di drone e laser scanner da terra.

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; nello specifico, l'estrazione dei piani di discontinuità è stata effettuata manualmente interpolando singolarmente, tramite superfici planari, le porzioni delle nuvole di punti appartenenti alla stessa discontinuità. L'utilizzo dell'estrazione manuale si è resa necessaria considerando che le discontinuità non danno origine a piani evidenti. Questo ha consentito di estrapolare successivamente oltre ai parametri di orientazione anche i valori di persistenza delle discontinuità individuate.

I poligoni 3D che delimitano i piani di discontinuità con persistenza maggiore di 15 cm così individuati sono riportati in Figura 19, mentre in e Figura 20 sono riportati i poli e le relative linee di isodensità, considerando anche i piani determinati tramite il rilievo geomeccanico classico.

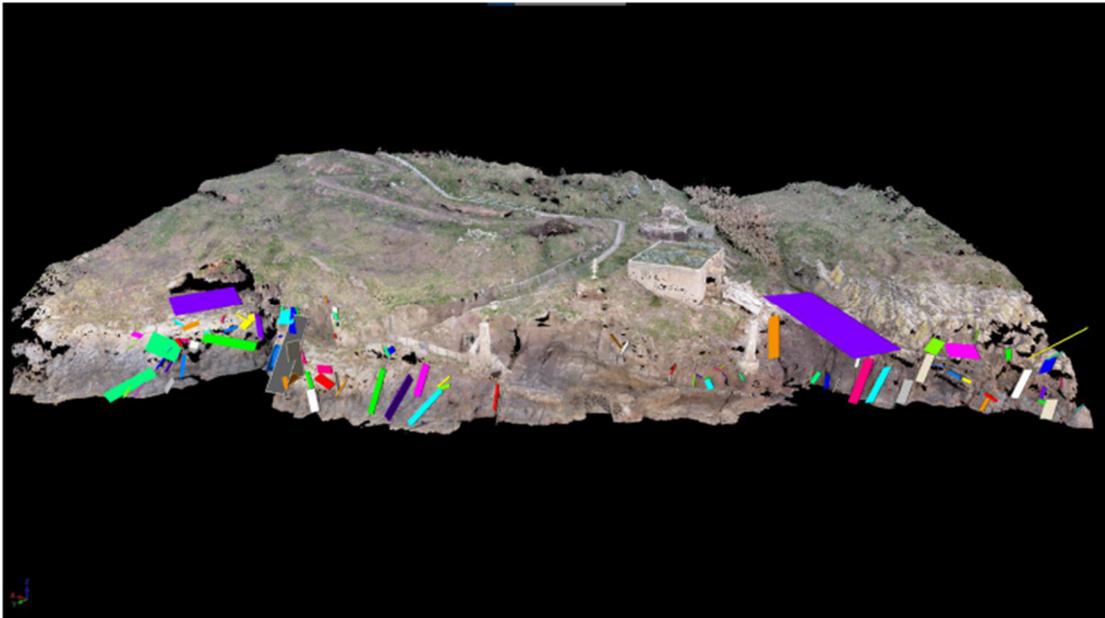


Figura 19: Estrazione dei piani di discontinuità da nuvola di punti TLS relativa allo Scalo Marinella

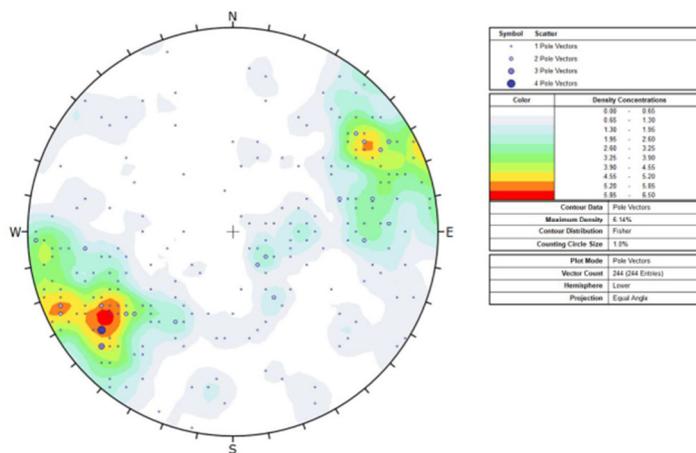


Figura 20: Proiezione stereografica delle linee di isodensità dei poli di discontinuità relativi allo scalo Marinella

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°

## 7 ANALISI DI STABILITÀ DEI CUNEI E DELLE CHIODATURE DI CONSOLIDAMENTO

### 7.1 Premessa

Dai test di Markland, esposti nel precedente paragrafo, è emersa la probabilità di distacco di cunei per l'area individuata nella zona A, relativa allo scalo della Marinella; le informazioni derivanti dalle stazioni geomeccaniche, riguardanti il volume del cuneo, le giaciture, la resistenza dell'ammasso e dei giunti, sono implementate nelle analisi di stabilità dei cunei di roccia. Nel seguito si espone la metodologia utilizzata, le ipotesi adottate ed i risultati dell'analisi.

### 7.2 Metodologia di analisi tridimensionale dei cunei di roccia

L'analisi del cinematismo tridimensionale dato dal distacco di un cuneo di roccia è svolta tramite il codice di calcolo *GeoRocce Dolmen 20* che implementa la geometria del cuneo tramite la definizione delle giaciture e del fronte che lo delimitano, svolgendo un'analisi rigido-plastica e indagando quindi l'equilibrio delle forze lungo i giunti; questi rappresentano le superfici di rottura preferenziali del sistema geotecnico, su cui si determinano staticamente, la sommatoria della resistenza al taglio disponibile e di quella effettivamente mobilitata, individuandone il coefficiente di sicurezza:

$$FS = \frac{\int_S \tau_{\text{disp}}}{\int_S \tau_{\text{mob}}} \quad \text{coefficiente di sicurezza}$$

Nell'ipotesi semplificativa di escludere il contributo delle chiodature e di considerare solo 2 famiglie di giaciture, lo schema statico si riduce a quello di Figura 21. Definendo gli angoli  $\psi_i$ ,  $\xi$  e  $\beta$ , e l'angolo di attrito  $\phi$  su entrambi i piani, il fattore di sicurezza risulta il seguente:

$$FS = \frac{\sin \beta \tan \phi}{\sin 0.5\xi \tan \psi_i}$$

Allo schema semplificativo sopra esposto, il metodo utilizzato aggiunge la definizione di un giunto di trazione, la resistenza al taglio dei giunti principali definita con angolo d'attrito e coesione

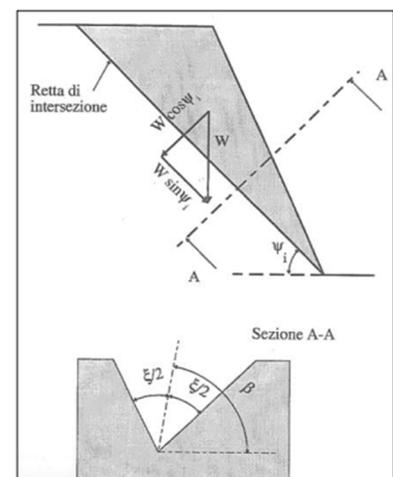


Figura 21. Schema semplificato

efficace, e la possibilità di inserire il contributo dei sostegni dati dagli interventi di consolidamento con le chiodature.

Lo schema completo di analisi del cuneo è esposto in Figura 22.

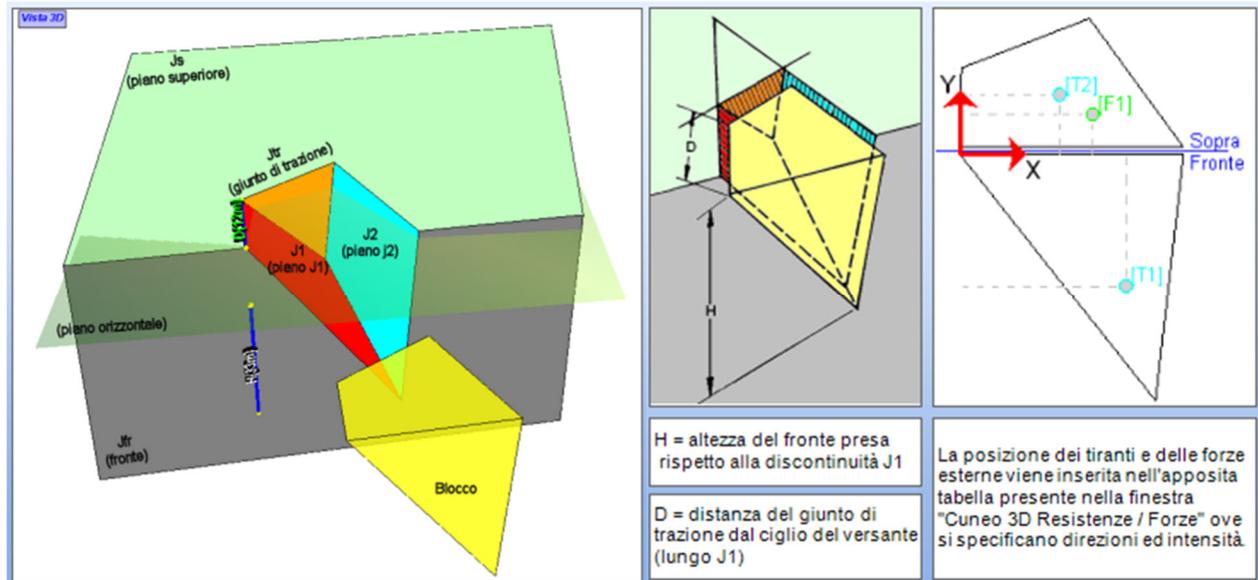


Figura 22. Schema completo di analisi tridimensionale dei cunei di roccia

In conformità alla normativa vigente (NTC-18), l'analisi deve svolgersi agli SLU, secondo l'Approccio 1, Combinazione 2. Pertanto, ai parametri geotecnici caratteristici di resistenza del terreno ( $c'$  e  $\phi'$ ), in condizioni statiche si applica il coefficiente parziale riduttivo  $\gamma_m = 1.25$  e l'analisi deve inoltre soddisfare un coefficiente di sicurezza  $\gamma_R = 1.1$ , mentre in condizioni sismiche non si applicano coefficienti riduttivi ai parametri del terreno e il coefficiente di sicurezza minimo deve risultare  $\gamma_R = 1.2$ .

### 7.3 Dati di input

#### 7.3.1 Volume e peso del cuneo di progetto

Dalla formulazione di Palmstrom [2005], come riportato al precedente paragrafo, risulta un volume massimo dei cunei di roccia con probabilità di distacco pari a circa  $4.5 \text{ m}^3$ .

Da tale considerazione, è stata dimensionata la spaziatura media delle chiodature di progetto di  $3.14 \text{ m} \times 1.57 \text{ m}$ , senza considerare quelle già realizzate dai precedenti interventi di

consolidamento richiamati. Tali interassi, ipotizzando uno spessore medio di 1.0 m, definiscono il seguente volume di influenza del singolo chiodo, assunto cautelativamente come volume rappresentativo per l'analisi di stabilità:

$$V \geq 3.14 \times 1.57 \times 1.0 = 4.93 \text{ m}^3$$

Ad esso, attribuendo il peso di volume  $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$  all'ammasso, corrisponde il peso  $G = 89 \text{ kN}$ .

### 7.3.2 Spinta sismica del cuneo di roccia

Per il sito di riferimento (Santo Stefano, LT) si ottiene la seguente caratterizzazione sismica:



Eliporto, 04020 Ventotene LT, Italia		CERCA
VITA NOMINALE:	CLASSE DI UTILIZZO:	
50 (anni)	Classe III	
VITA DI RIFERIMENTO:	SPETTRO:	
75	SLV 10%	
PROBABILITÀ DI SUPERAMENTO DELLA VITA DI RIFERIMENTO:	PERIODO DI RITORNO:	
10 %	712 (anni)	
LATITUDINE:	LONGITUDINE:	
40.78970	13.45551	
<b>RISULTATI:</b>		
AG/G:	FO:	TC:
0.0658	3	0.5

Figura 23. Classificazione sismica del sito

Per vita nominale  $V_N = 50$  anni, coefficiente d'uso  $C_U = 1.5$  (Classe d'uso III), categoria di sottosuolo B (si veda la relazione geologica), le accelerazioni massime attese al piano campagna sono pari a:

$$a_g = 0.0658 \text{ g}, \quad S_s = 1.2, \quad S_T = 1.0,$$

da cui:

$$a_{\max} = 0.0658 \cdot 1.2 = 0.099 \text{ g}.$$

L'inerzia sismica del cuneo di roccia di progetto, di peso  $G$ , vale quindi:

$$F_h = G \cdot a_{\max}/g = 89 \cdot 0.099 = 8.8 \text{ kN}$$

### 7.3.3 Resistenza allo sfilamento del singolo elemento di chiodatura

In considerazione delle caratteristiche tecnologiche e della natura dei terreni si valutano le tensioni “caratteristiche” di adesione laterale limite fondazione-terreno  $\alpha\tau_{lim}$ , riferite al diametro nominale di perforazione. Tali valori sono in accordo a quanto suggerito dall’esperienza di Bustamante e Doix per il caso in esame. Per l’ammasso in cui sono fondate le chiodature di progetto si assume cautelativamente il valore  $\alpha\tau_{lim} = 150$  kPa.

In accordo alla normativa vigente (NTC-18), tale valore deve essere fattorizzato per il coefficiente parziale  $\gamma_M$ , che vale 1.25, per il caso statico, e 1.00, per il caso sismico.

L’adesione laterale limite di progetto risulta quindi:

$$\begin{aligned} \alpha\tau_{lim,d} &= 120 \text{ kPa} && \text{adesione laterale limite di progetto in condizioni statiche,} \\ \alpha\tau_{lim,Ed} &= 150 \text{ kPa} && \text{adesione laterale limite di progetto in condizioni sismiche.} \end{aligned}$$

Si considera inoltre, in via cautelativa, una lunghezza della chiodatura reagente  $L_a = 3.0$  m. Dato il diametro di perforazione  $D_p = 75$  mm, si ricava la resistenza del singolo elemento di rinforzo, sottraendo, in condizioni sismiche, l’inerzia del cuneo:

$$\begin{aligned} R_d &= 0.075 \cdot \pi \cdot 120 \cdot 3 = 85 \text{ kN} && \text{resistenza a sfilamento in condizioni statiche,} \\ R_{Ed} - F_h &= 0.075 \cdot \pi \cdot 150 \cdot 3 - 8.8 = 97 \text{ kN} && \text{resistenza a sfilamento in condizioni sismiche.} \end{aligned}$$

Come mostrato dal confronto tra le precedenti resistenze, il caso statico, date le fattorizzazioni, è più critico del caso sismico. Nelle seguenti analisi, quindi, l’analisi sismica sarà trascurata.

#### 7.4 Risultati delle analisi

L'analisi tridimensionale dei cunei è condotta con le metodologie e le ipotesi progettuali sopra elencate, assumendo il volume di riferimento non inferiore a  $4.93 \text{ m}^3$ , considerando il solo caso statico, che risulta il più critico, al netto delle fattorizzazioni di normativa, per la resistenza delle chiodature di progetto.

L'incognita rimanente nelle analisi è quella della resistenza al taglio dei giunti, in cui si assumono angoli di attrito di  $35\div 37^\circ$ , e la coesione, tale per cui risulti un coefficiente di sicurezza dello stato di fatto (senza rinforzi) circa unitario. Tale condizione corrisponde ad una back-analysis di uno stato di fatto in cui i cunei di riferimento siano al limite della stabilità (sebbene le coesioni efficaci che determinano tale condizione siano basse).

A partire da tale quadro cautelativo, si valuta l'influenza dei sostegni misurandone l'efficacia in termini di aumento di fattore di sicurezza.

L'analisi è ripetuta per i vari casi di studio dati dai rilievi delle stazioni geomeccaniche:

- La stazione SG1 è stata ripetuta per le famiglie 3-4 e 4-5, dato che il test di Markland ha rilevato per entrambe le coppie di giaciture compatibilità cinematica e ammissibilità dinamica;
- Le stazioni SG2A e SG2B sono state analizzate solo per le coppie di famiglie maggiormente critiche (famiglie 3-4), invertendo però la posizione della famiglia con  $\text{dip}=85^\circ$ , con il fronte (rilevato con  $\text{dip}=75^\circ$ ); in tale modo il volume del cuneo e i piani di rottura sono i medesimi, ed il software utilizzato consente di inserire il sostegno di progetto con l'inclinazione ortogonale al fronte.

Per tutti i casi considerati, il coefficiente di sicurezza ottenuto dopo l'inserimento della chiodatura è non inferiore a 1.1 e, quindi, la verifica di stabilità risulta soddisfatta.

Si riassumono nel seguito i principali risultati:

- **SG1, famiglie 3-4:**
  - Back-Analysis cuneo: per giunti con  $\varphi'=37^\circ$  e  $c'=3.0 \text{ kPa}$  → FS = ~1.0
  - Stabilità cuneo in condizioni statiche con chiodatura → FS = 3.0

- **SG1, famiglie 4-5:**

- Back-Analysis cuneo: per giunti con  $\varphi'=37^\circ$  e  $c'=2.5$  kPa → FS = ~1.0
- Stabilità cuneo in condizioni statiche con chiodatura → FS = 3.6

- **SG2A:**

- Back-Analysis cuneo: per giunti con  $\varphi'=35^\circ$  e  $c'=4.8$  kPa → FS = ~1.0
- Stabilità cuneo in condizioni statiche con chiodatura → FS = 2.1

- **SG2B:**

- Back-Analysis cuneo: per giunti con  $\varphi'=35^\circ$  e  $c'=3.85$  kPa → FS = ~1.0
- Stabilità cuneo in condizioni statiche con chiodatura → FS = 2.2

L'intervento di chiodatura previsto risulta quindi adeguato, conferendo alla parete un sufficiente incremento di resistenza, con un buon margine rispetto ai minimi richiesti dalla normativa.

Si riportano di seguito le immagini degli output di dettaglio delle analisi svolte.

Come affermato in premessa, l'approccio numerico non può essere deterministico nella valutazione dei fattori di sicurezza; lo stato iniziale è stato posto, convenzionalmente e cautelativamente, con fattore di sicurezza prossimo all'unità (condizione al limite dell'equilibrio), ma che potrebbe essere anche superiore.

I risultati di rilevanza progettuale sono gli incrementi dei fattori di sicurezza a seguito degli interventi, che danno la misura dell'efficacia in termini relativi.

<b>angolo di attrito</b> $\phi$ (J1) = 37 ° $\phi$ (J2) = 37 °	<b>Fattori di Sicurezza calcolati</b> <input type="checkbox"/> CON ACQUA nel giunto di trazione, lungo piano di scivolamento e CON FORZE (tiranti, forze esterne) <b>Fs = ---</b> <input checked="" type="checkbox"/> CON ACQUA nel SOLO giunto e SENZA FORZE (tiranti, forze esterne) [J1J2] <b>Fs = 1.002</b> <input checked="" type="checkbox"/> SENZA ACQUA e SENZA FORZE (tiranti, forze esterne) [J1J2] <b>Fs = 1.002</b> <input checked="" type="checkbox"/> CON ACQUA nel SOLO giunto di trazione e CON FORZE (tiranti, forze esterne) [C] <b>Fs = 3.023</b> <input checked="" type="checkbox"/> Personalizzato <input checked="" type="checkbox"/> Acqua nel giunto 100 % <input checked="" type="checkbox"/> Forze e Tiranti <input type="checkbox"/> Acqua nei piani 100 % <b>Fs = 3.023</b>
<b>coesione</b> $c'$ (J1) = 3 kN/m2 $c'$ (J2) = 3 kN/m2	<b>Linea di intersezione J1 J2</b> $dip = 74.8$ ° $dipdir = -19.7$ °
<b>peso di volume roccia</b> $gr = 18$ kN/m3	
<b>Acqua</b> $gw = 10$ kN/m3	<b>Cuneo</b> $volume = 4.98$ m <sup>3</sup> $peso = 8.96$ t
<input type="button" value="Applica"/> <input type="button" value="Ok"/>	

Figura 24. SG1, famiglie 3-4: Analisi tridimensionale del cuneo, senza sostegno e con sostegno (FS = 3.0)

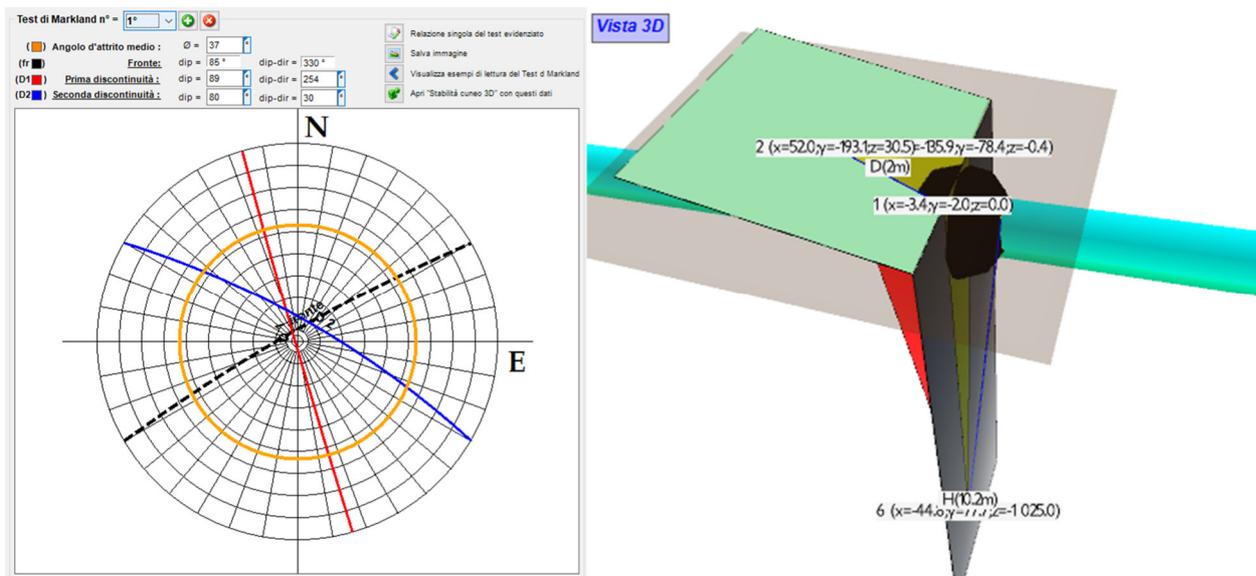


Figura 25. SG1, famiglie 3-4: Stereogramma delle giaciture e geometria del cuneo con il sostegno

<b>angolo di attrito</b> $\phi$ (J1) = 37 ° $\phi$ (J2) = 37 °	<b>Fattori di Sicurezza calcolati</b> <input type="checkbox"/> CON ACQUA nel giunto di trazione, lungo piano di scivolamento e CON FORZE (tiranti, forze esterne) $F_s = \text{---}$ <input checked="" type="checkbox"/> CON ACQUA nel SOLO giunto e SENZA FORZE (tiranti, forze esterne) [J1J2] $F_s = 1.072$ <input checked="" type="checkbox"/> SENZA ACQUA e SENZA FORZE (tiranti, forze esterne) [J1J2] $F_s = 1.072$ <input checked="" type="checkbox"/> CON ACQUA nel SOLO giunto di trazione e CON FORZE (tiranti, forze esterne) [J1J2] $F_s = 3.616$ <input checked="" type="checkbox"/> Personalizzato <input checked="" type="checkbox"/> Acqua nel giunto 100 % <input checked="" type="checkbox"/> Forze e Tiranti [J1J2] <input type="checkbox"/> Acqua nei piani 100 % $F_s = 3.616$
<b>coesione</b> $c'$ (J1) = 2.5 kN/m2 $c'$ (J2) = 2.5 kN/m2	
<b>peso di volume roccia</b> $gr = 18$ kN/m3	
<b>Acqua</b> $gw = 10$ kN/m3	
<b>Linea di intersezione J1 J2</b> $dip = 64$ ° $dipdir = 321.2$ °	<b>Cuneo</b> $volume = 5.3$ m <sup>3</sup> $peso = 9.54$ t
<input type="button" value="Applica"/> <input type="button" value="Ok"/>	

Figura 26. SG1, famiglie 4-5: Analisi tridimensionale del cuneo, senza sostegno e con sostegno ( $F_s = 3.6$ )

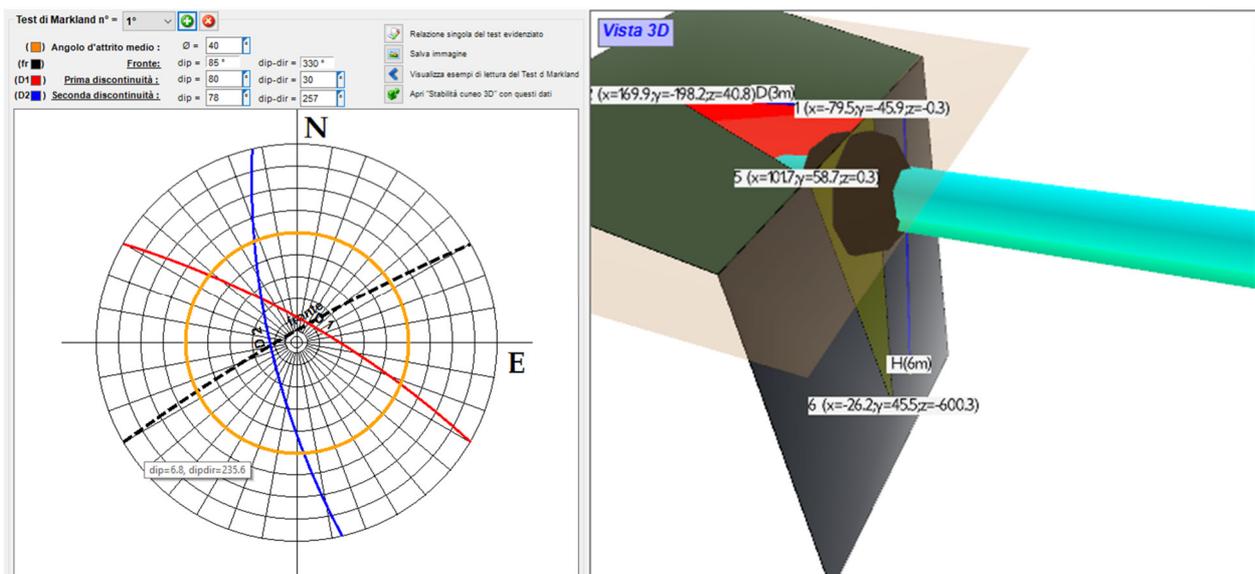


Figura 27. SG1, famiglie 4-5: Stereogramma delle giaciture e geometria del cuneo con il sostegno

<b>angolo di attrito</b> $\varphi$ (J1) = 35 ° $\varphi$ (J2) = 35 °	<b>Fattori di Sicurezza calcolati</b> <input type="checkbox"/> CON ACQUA nel giunto di trazione, lungo piano di scivolamento e CON FORZE (tiranti, forze esterne) <b>Fs = ---</b> <input checked="" type="checkbox"/> CON ACQUA nel SOLO giunto e SENZA FORZE (tiranti, forze esterne) [J1J2] <b>Fs = 1.005</b> <input checked="" type="checkbox"/> SENZA ACQUA e SENZA FORZE (tiranti, forze esterne) [J1J2] <b>Fs = 1.005</b> <input checked="" type="checkbox"/> CON ACQUA nel SOLO giunto di trazione e CON FORZE (tiranti, forze esterne) [J1] <b>Fs = 2.11</b> <input checked="" type="checkbox"/> Personalizzato <input checked="" type="checkbox"/> Acqua nel giunto 100 % <input checked="" type="checkbox"/> Forze e Tiranti [J1J2] <input type="checkbox"/> Acqua nei piani 100 % <b>Fs = 2.11</b>
<b>coesione</b> $c'$ (J1) = 4.8 kN/m2 $c'$ (J2) = 4.8 kN/m2	<b>Linea di intersezione J1 J2</b> $dip = 71.5$ ° $dipdir = -56.8$ °
<b>peso di volume roccia</b> $gr = 18$ kN/m3	
<b>Acqua</b> $gw = 10$ kN/m3	<b>Cuneo</b> $volume = 4.94$ m <sup>3</sup> $peso = 8.89$ t

Figura 28. SG2A: Analisi tridimensionale del cuneo, senza sostegno e con sostegno (FS = 2.1)

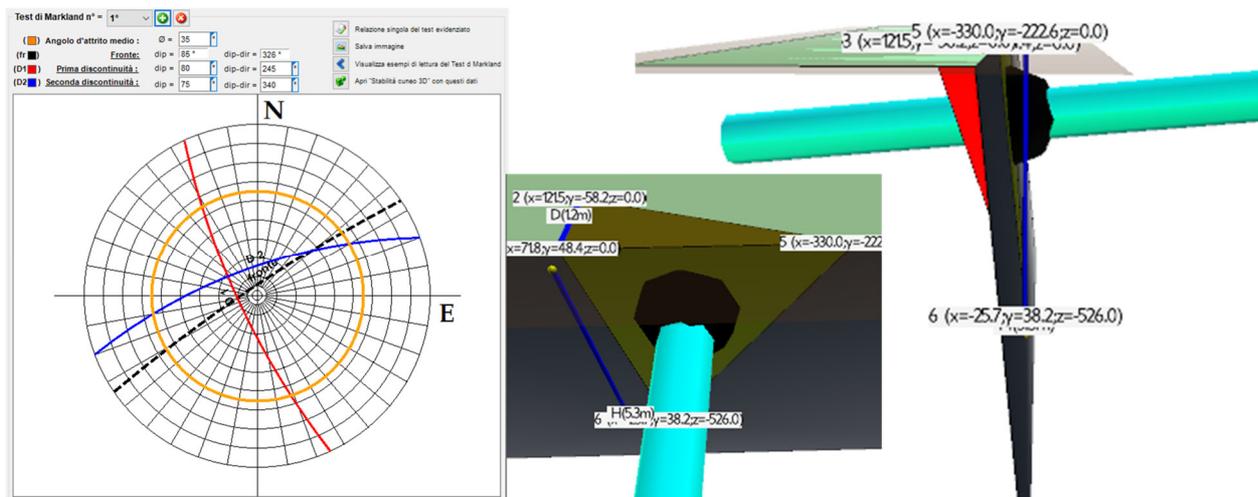


Figura 29. SG2A: Stereogramma delle giaciture e geometria del cuneo con il sostegno

<b>angolo di attrito</b> $\phi$ (J1) = 35 ° $\phi$ (J2) = 35 °	<b>Fattori di Sicurezza calcolati</b> <input type="checkbox"/> CON ACQUA nel giunto di trazione, lungo piano di scivolamento e CON FORZE (tiranti, forze esterne) $F_s = \text{---}$ <input checked="" type="checkbox"/> CON ACQUA nel SOLO giunto e SENZA FORZE (tiranti, forze esterne) [J1J2] $F_s = 1.006$ <input checked="" type="checkbox"/> SENZA ACQUA e SENZA FORZE (tiranti, forze esterne) [J1J2] $F_s = 1.006$ <input checked="" type="checkbox"/> CON ACQUA nel SOLO giunto di trazione e CON FORZE (tiranti, forze esterne) [C] $F_s = 2.246$ <input checked="" type="checkbox"/> Personalizzato <input checked="" type="checkbox"/> Acqua nel giunto 100 % <input checked="" type="checkbox"/> Forze e Tiranti <input type="checkbox"/> Acqua nei piani 100 % $F_s = 2.246$
<b>coesione</b> $c'$ (J1) = 3.85 kN/m2 $c'$ (J2) = 3.85 kN/m2	<b>Linea di intersezione J1 J2</b> $dip = 72.7$ ° $dipdir = -50.9$ °
<b>peso di volume roccia</b> $gr = 18$ kN/m3	
<b>Acqua</b> $gw = 10$ kN/m3	<b>Cuneo</b> $volume = 4.94$ m <sup>3</sup> $peso = 8.88$ t

Figura 30. SG2B: Analisi tridimensionale del cuneo, senza sostegno e con sostegno ( $F_s = 2.2$ )

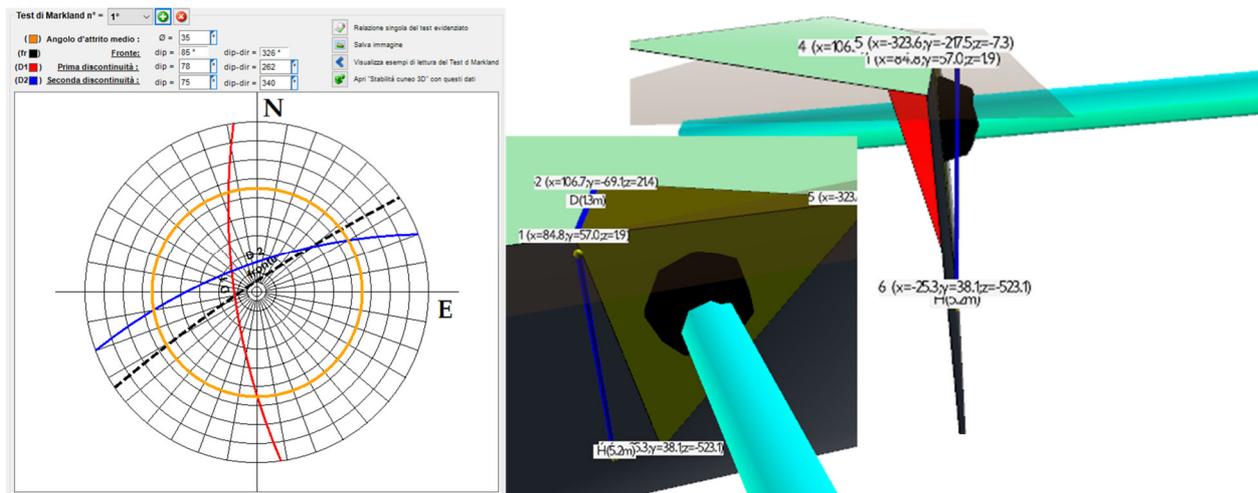


Figura 31. SG2B: Stereogramma delle giaciture e geometria del cuneo con il sostegno

## 8 MONITORAGGIO

### 8.1 Premessa

Nel presente capitolo viene illustrata una proposta per il monitoraggio di controllo negli ambiti dell'approdo Marinella, dello Scalo 4 e della zona del Cimitero.

Per le falesie dell'approdo Marinella si fa riferimento al presente progetto di mitigazione del rischio relativo ai distacchi di cunei rocciosi e di caduta dei massi.

Al momento non appare sussistano condizioni di criticità per la stabilità delle falesie, come blocchi di roccia in condizioni di precario equilibrio, con fessure in progressiva apertura, o evidenze di lenti movimenti sulle dislocazioni.

Gli interventi in progetto hanno carattere estensivo con scopi di presidio e contrasto per l'innescio di fenomeni deformativi. Gli interventi di tipo attivo (chiodature) conferiranno incrementi dei fattori di sicurezza alla stabilità globale e locale su scala metrica; gli interventi di tipo passivo (es. reti) conferiranno sicurezza alla stabilità locale su scala decimetrica.

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 quanto riguarda la zona del Cimitero, caratterizzata da muretti di sostegno, da un rudere in pietra soggetti ad intervento di restauro strutturale in corso di esecuzione, si prospetta un monitoraggio delle deformazioni in alcuni punti significativi. Il controllo ha lo scopo di valutare l'efficacia degli interventi e la stabilità delle opere murarie.

La proposta per il monitoraggio comprende un sistema per la misura puntuale di deformazioni di tipo assoluto o relativo, misura diretta o di parametri correlabili alle deformazioni.

Le misure puntuali debbono essere riferite a punti significativi diffusi sulle zone di osservazione; esse consentono una elevata precisione ed una elevata frequenza e rapidità di dati, ove le misure possono essere automatizzate e remotizzate. Le misure puntuali, possibili su un numero relativamente limitato di punti, non consentono una buona visione globale dei fenomeni;

possono lasciare “zone d’ombra”, incertezze sulle interpretazioni, difficoltà a discernere errori o malfunzionamenti, specialmente in presenza di dati contrastanti.

Si propone quindi, ad integrazione del sistema puntuale, un sistema di osservazione su base fotografica che consente delle “mappature” periodiche ed una elaborazione dei confronti per il riconoscimento delle zone critiche.

Le quantità degli strumenti riportate nei paragrafi successivi, così come le posizioni rappresentate sulla tavola del monitoraggio, sono indicative e dovranno essere meglio definite in corso d’opera.

## 8.2 Tipologie delle misure e degli strumenti

Si riportano nel seguito le tipologie di misure e di strumenti previsti per l’attività di monitoraggio (si veda l’elaborato 2017E037INV-02-D-S0-TAV004 per le nomenclature e le posizioni):

### 8.2.1 Mire Topografiche (MT)

Il monitoraggio prevede un numero totale di 36 mire topografiche (MT):

- 13 sulle falesie nella zona approdo Marinella;
- 11 sulle falesie nella zona dello scalo 4;
- 12 sulle strutture del Cimitero.

Lo scopo del monitoraggio topografico è il rilievo delle coordinate delle mire a cadenza periodica, consentendo di rilevare le tre coordinate dei punti di misura e seguirne le evoluzioni ricavando le eventuali modifiche delle posizioni corrispondenti alle deformazioni in termini assoluti.

Le mire topografiche si integreranno in un sistema di rilievo topografico che comprenderà almeno 2 capisaldi di riferimento in una zona stabile, arretrata di almeno 25 m dai cigli delle falesie, un idoneo strumento di rilievo topografico, tipo stazione totale, punti e modalità di stazione, metodologia operativa per l’organizzazione, la gestione e l’interpretazione delle misure. Il caso in esame presenta diverse complessità; la logistica dei luoghi, con poco spazio per effettuare stazioni frontali alle falesie, la necessità di dover ricorrere a poligonali, con riduzione della precisione, e le condizioni ambientali.

L’esecuzione del ciclo di misure che, per il caso in esame non potrà essere automatizzato, sarà piuttosto onerosa. La frequenza delle misure, che di base dovrà essere plurimensile, potrà essere

eventualmente aumentata laddove ci saranno importanti evidenze (importanti variazioni sulle misure delle celle di carico, osservazioni sulla falesia, etc.).

I punti di misura hanno costi molto bassi e per questo conviene prevedere una certa ridondanza, utile per verificare l'affidabilità delle misure e per avere una scorta nei confronti di possibili danneggiamenti.

Si dovrà inserire sempre una mira topografica accanto ad altri punti di misura (BS CC), per ragioni di controllo.



**Figura 32: Mira topografica e miniprisma**

### 8.2.2 Celle di Carico sulla testata delle barre di chiodatura (CC)

Il monitoraggio prevede un numero totale di circa 10 celle di carico sulla testata delle barre di chiodatura per le falesie sullo scalo della Marinella.

Le celle di carico toroidali vengono installate fra il bullone di serraggio e la piastra di ripartizione della testata della barra di chiodatura, consentendo la misura dello sforzo assiale.

Per i casi in esame si osserva che le condizioni di instabilità dei cunei rocciosi si possono verificare per deformazioni relativamente piccole, per le quali il monitoraggio delle deformazioni potrebbe presentare una insufficiente precisione.

Per contro anche piccole deformazioni del cuneo roccioso possono mobilitare elevati incrementi di carico nelle celle (superiori alla precisione delle misure), per cui le misure di incrementi degli sforzi sulle celle di carico possono rappresentare importanti segnali di attivazione di fasi critiche, che potranno poi essere esaminati con l'intero quadro delle misure.

Un altro vantaggio del sistema delle celle è l'automatizzazione e la possibilità di remotizzare le misure; questo consente un'alta frequenza delle misure, la tempestività delle analisi dei dati, la definizione del *trend* e la riduzione dei costi relativi ai sopralluoghi.

La precisione e l'affidabilità del sistema sono verificabili dopo alcuni mesi; in particolare, occorrerà valutare l'influenza degli effetti ambientali, piuttosto severi nel sito di intervento.



**Figura 33: Celle di carico toroidali elettriche**

### 8.2.3 Misuratori di giunti o fessurimetri (MG)

Il monitoraggio prevede un numero totale di circa 5 fessurimetri (MG) da posizionare sulla falesia dell'approdo Marinella; le posizioni potranno essere definite in sito, a seguito di una attenta ispezione da parte del Direttore dei Lavori.

I misuratori di giunti o fessurimetri consentono di monitorare l'apertura di fessure nella direzione dei due supporti dello strumento.

Le variazioni di apertura delle fessure possono rappresentare importanti segnali di attivazione di fasi critiche, che potranno poi essere esaminati con l'intero quadro delle misure.

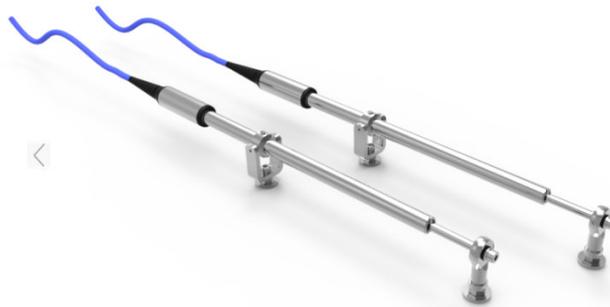
L'entità critica della variazione di apertura di una fessura è certamente superiore alla precisione dello strumento. Lo strumento può quindi fornire tempestivi ed importanti segnali di attivazione di fasi critiche, che potranno poi essere esaminate con l'intero quadro delle misure.

Un vantaggio del sistema delle celle è l'automatizzazione e la possibilità di remotizzare le misure; questo consente un'alta frequenza delle misure, la tempestività delle analisi dei dati, la definizione del *trend* e la riduzione dei costi relativi ai sopralluoghi.

La precisione e l'affidabilità del sistema sono verificabili dopo alcuni mesi; in particolare, occorrerà valutare l'influenza degli effetti ambientali, piuttosto severi nel sito di intervento.

L'installazione deve essere effettuata su fessure suscettibili di apertura per un possibile cinematiso di instabilità di un cuneo roccioso, nella direzione dell'apertura o della dislocazione

fra i lembi. Le posizioni potranno quindi essere definite sul luogo, a seguito di una ispezione mirata.



**Figura 34: Misuratori di giunti, o fessurimetri, di tipo elettrico**

#### 8.2.4 Termometri (TM)

Il monitoraggio prevede un numero totale di 3 termometri (TM):

- 2 nella zona dello scalo della Marinella;
- 1 nella zona dello scalo 4.

Le misure delle temperature consentono di monitorare il fattore ambientale che maggiormente influenza il monitoraggio. I cicli giornalieri e stagionali delle variazioni delle temperature possono essere confrontati con analoghi cicli sui valori delle misure strumentali, in maniera da comprendere le correlazioni e poterne depurare gli effetti.

Anche le misure termometriche sono automatizzate e remotizzate.

#### 8.2.5 Monitoraggio su basi fotografiche

La proposta di monitoraggio si può definire una sovrapposizione di immagini digitali acquisite in tempi diversi sulla stessa area ed una successiva elaborazione dei confronti in termini di spostamenti differenziali secondo un algoritmo del tipo *change detection* o *digital image correlation*; nei casi in esame l'acquisizione delle immagini si effettuerà da drone.

Al fine di seguire l'andamento temporale del fenomeno si effettuerà un rilievo da remoto, ripetuto nel tempo.

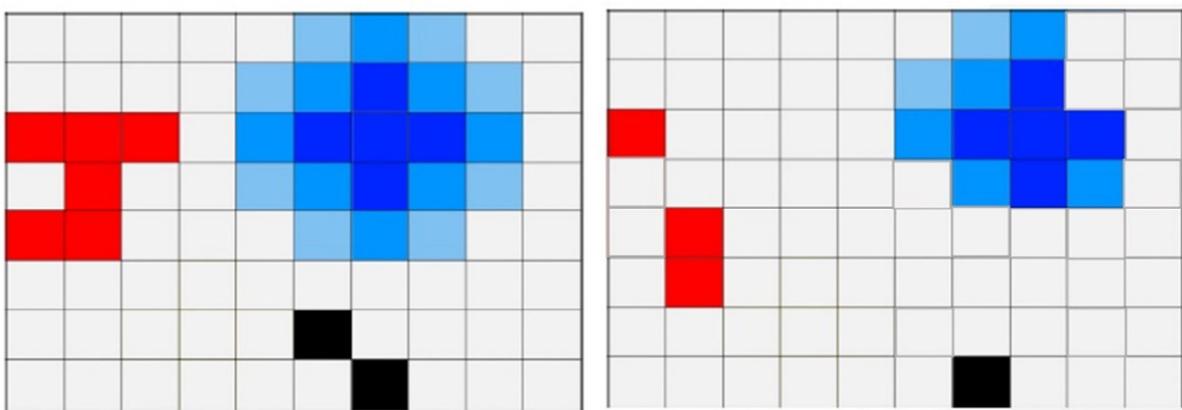
Tale sistema, che rientra nel campo del monitoraggio fotografico, è costituito essenzialmente da una fotocamera (sensore ottico) trasportata da drone che consentirà l'acquisizione di immagini

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 ogni 2 mesi circa.

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 o gli spostamenti del terreno, 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.

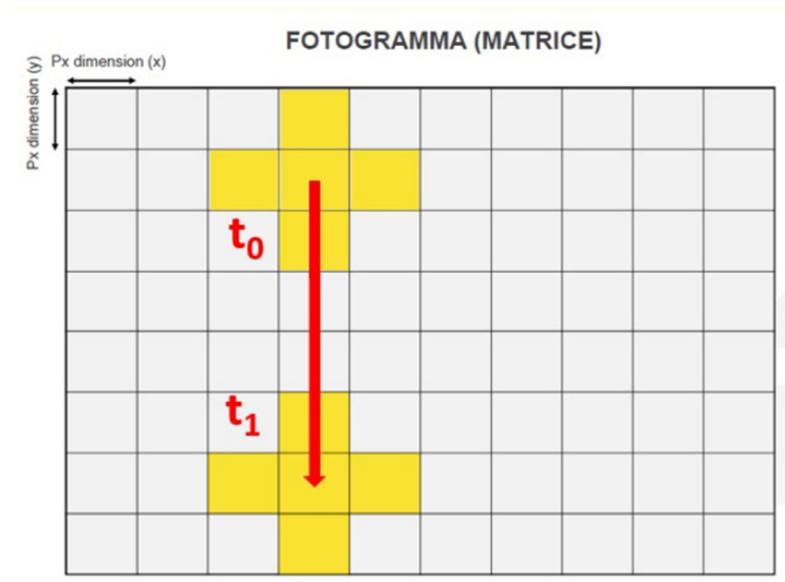
Il concetto fondamentale alla base di tale tecnica è l'individuazione, all'interno dell'immagini analizzate, di "Features" quali strutture come punti, linee nonché pattern più complessi oppure colore, luminosità e contrasto. Attraverso il confronto con un'ulteriore immagine, le "Features" successivamente 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 35: 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 36: Esempio di tracciamento "Features".**

Nel caso in esame l'analisi effettuata sarà, visto il fenomeno in atto 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, la volumetria del materiale crollato.

### 8.3 Figure con l'ubicazione dei punti di misura

Nelle figure seguenti si riportano le posizioni schematiche dei punti di misura e gli strumenti proposti.

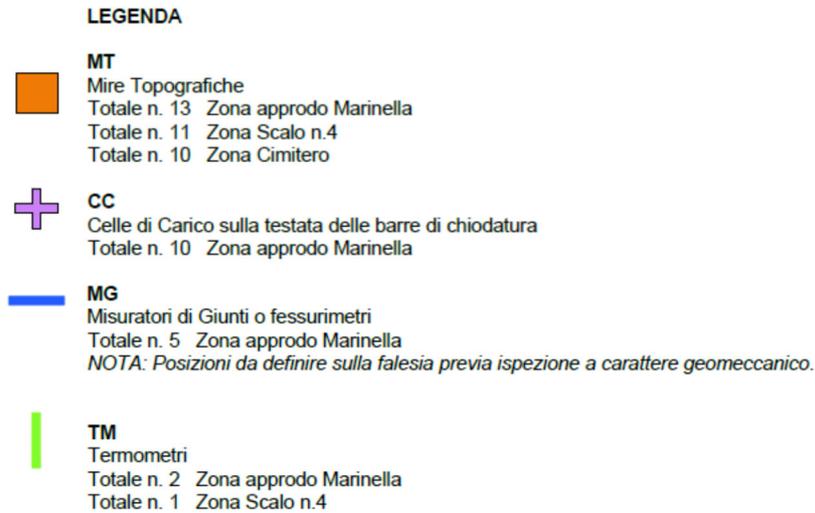
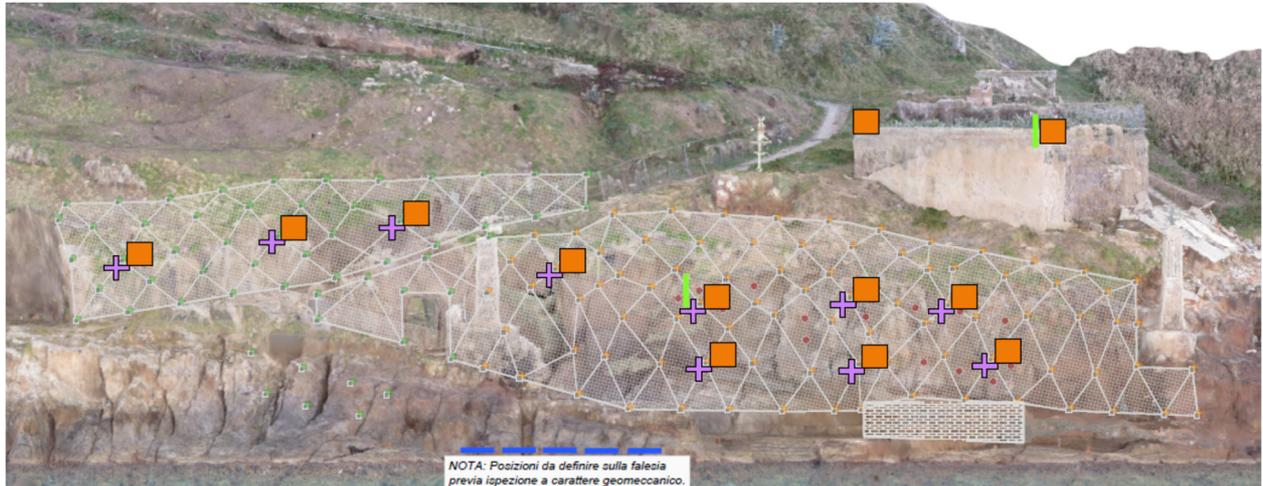


Figura 37. Legenda dei punti di misura e delle strumentazioni di monitoraggio



Figura 38. Planimetria punti e strumenti di monitoraggio scalo Marinella



**Figura 39. Prospetto punti e strumenti di monitoraggio scalo Marinella**



**Figura 40. Planimetria punti e strumenti di monitoraggio scalo 4**

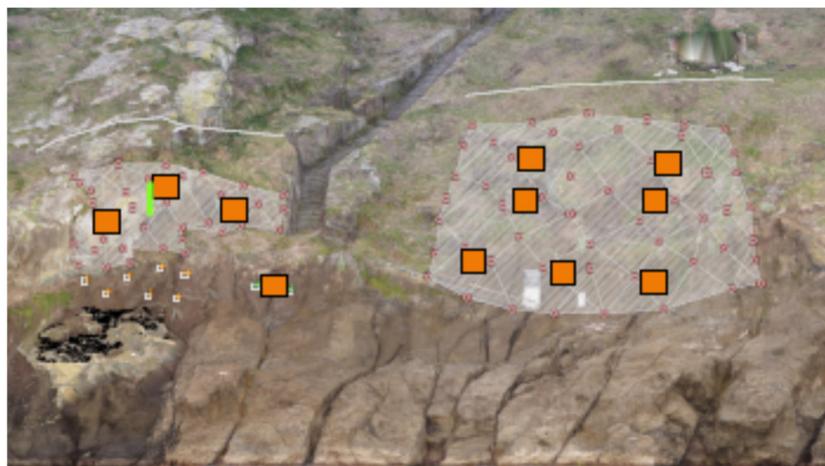


Figura 41. Prospetto punti e strumenti di monitoraggio scalo 4

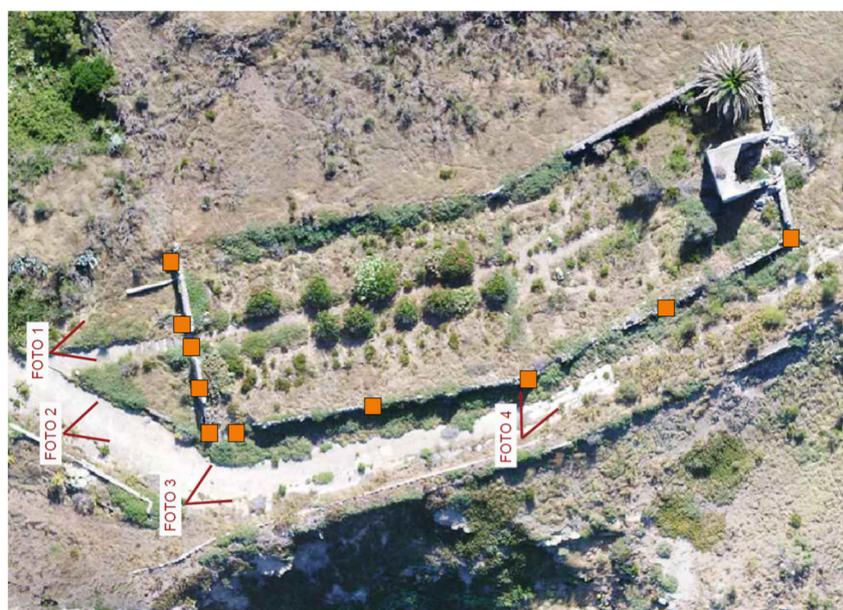


Figura 42. Planimetria punti e strumenti di monitoraggio zona cimitero

#### 8.4 Durata del monitoraggio e frequenze delle misure

Il monitoraggio proposto è un'attività di controllo e non è definibile a priori una durata, se non convenzionale; una durata minima dovrebbe comprendere almeno tre (3) cicli stagionali completi

Le frequenze delle misure possono essere, indicativamente:

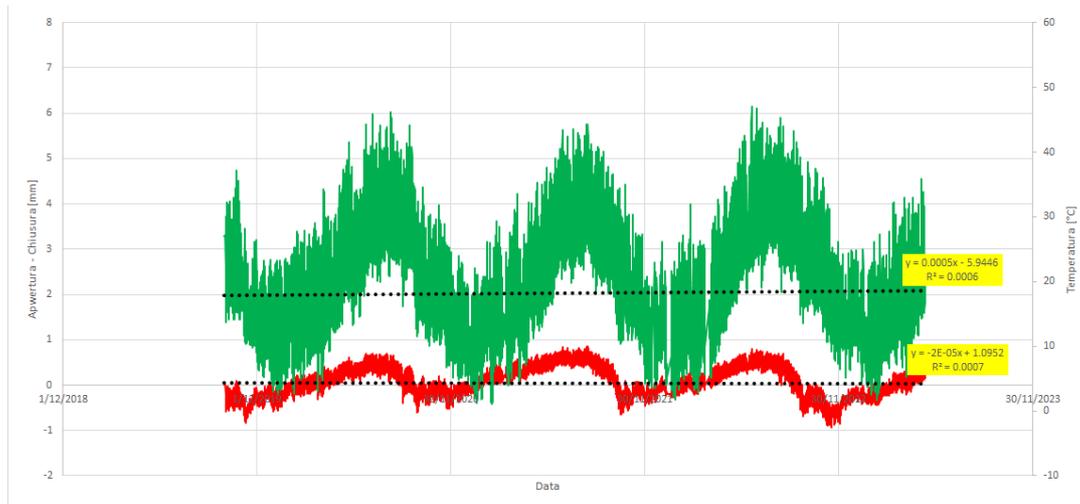
- 2 volte al giorno per quelle automatiche;
- Ogni 3 mesi per i rilievi topografici a regime, con una frequenza di 1 volta ogni 2 mesi, nel primo anno. L'aumento della frequenza delle misure topografiche nel primo anno ha lo scopo principale di ottimizzare e perfezionare le modalità di esecuzione delle misure e la precisione del sistema;
- Ogni 2 mesi per il monitoraggio su basi fotografiche nel primo anno.

## 8.5 Annotazioni

L'installazione precisa dei punti di misura proposti dovrà essere stabilita in sito, in accordo con il Direttore dei Lavori ed il Progettista, in relazione alla conformazione dei luoghi e tenendo conto dell'efficacia e degli aspetti di logistica.

Per la definizione delle soglie di controllo (attenzione e allarme) sarà necessario attendere il primo ciclo di misure (almeno 1 anno) 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 prestabilite, vista l'estrema velocità con cui avvengono senza particolari preavvisi (spostamenti submillimetrici, aumento di carico repentino). Si osserva, inoltre, che le condizioni ambientali dei luoghi di osservazione sono particolarmente severe e possono condizionare le misure in termini più che millimetrici, quindi con oscillazioni anche superiori ai valori stessi della misura.

Nella figura 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.



**Figura 43: Andamento delle misure delle temperature (verde) e dell'apertura di una fessura (rosso) per un periodo di osservazione di 4 anni.**

Si dovrà individuare operatori, esperti ed adeguatamente referenziati, per lo svolgimento dei servizi seguenti:

- a) installazione degli strumenti, architettura del sistema, cablaggio, energizzazione, manutenzione degli strumenti, acquisizioni locali e trasmissioni dei dati;
- b) acquisizione delle basi fotografiche digitali ed elaborazioni dei confronti.

Si dovranno definire i ruoli, almeno per il primo anno di gestione delle misure, per lo svolgimento dei seguenti servizi:

- c) data management, progetto e gestione del sito Web, validazione dei dati di misura, report e liste di pubblicazioni; è consigliabile che sia lo stesso soggetto a cui è stato affidato il servizio di cui al punto precedente (a);
- d) Interpretazione delle misure e pubblicazione dei relativi report periodici in relazione agli obiettivi del monitoraggio ed eventuali segnalazioni di criticità; è consigliabile che sia un soggetto diverso da quello a cui è stato affidato il servizio a); non va esclusa la possibilità che possa essere il progettista degli interventi.

L'esperienza del primo anno potrà fornire quelle informazioni utili per ottimizzare il sistema di ricezione e per garantire una efficiente gestione delle misure.