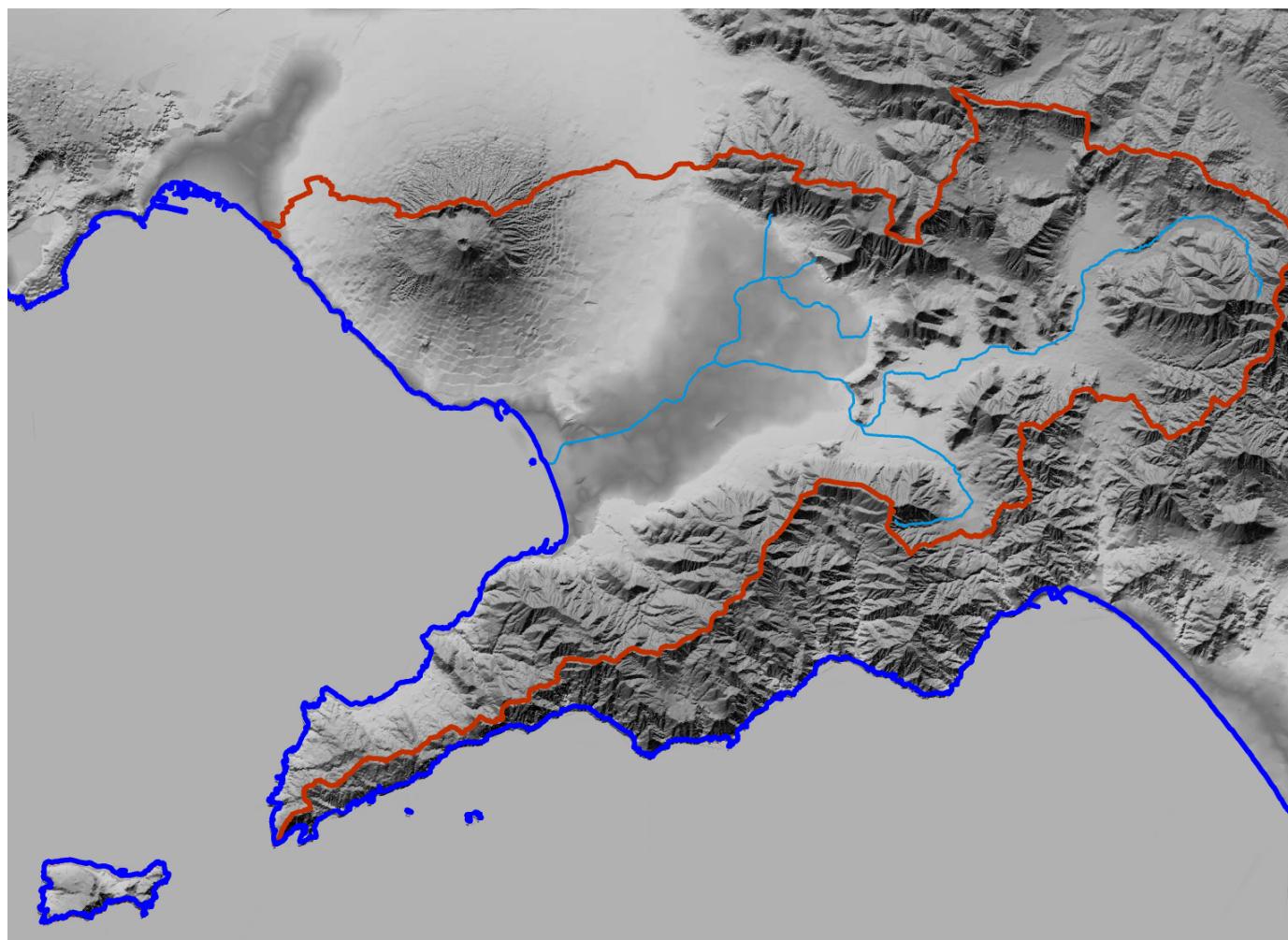


**PIANO STRALCIO DI BACINO PER L'ASSETTO IDROGEOLOGICO
 AGGIORNAMENTO**

R07	Descrizione elaborato	Gruppo di lavoro
	<p align="center">RELAZIONE TECNICA RILEVAMENTO GEOMETRICO E GEOSTRUTTURALE DEL SISTEMA DI FRATTURE E DEI VOLUMI DI ROCCIA POTENZIALMENTE INSTABILI DELLA FALESIA DELL'ENTROTERRA DI MARINA PICCOLA NELL'ISOLA DI CAPRI</p>	<p>S.T.O. A.d.B. Sarno R.U.P. dr. geol. F.Baistrocchi</p>
<p>Luglio 2011 (redazione Novembre 2009)</p>	<p><u>CONSULENTI</u> Università degli Studi di Siena — Centro di Geotecnologie</p>	<p>Commissario Straordinario ing. Pasquale Marrazzo</p>



**RILEVAMENTO GEOMETRICO E GEOSTRUTTURALE DEL SISTEMA DI FRATTURE E DEI VOLUMI
DI ROCCIA POTENZIALMENTE INSTABILI
DELLA FALESIA
DELL'ENTROTERRA DI MARINA PICCOLA
NELL'ISOLA DI CAPRI**

R07	Descrizione elaborato	Gruppo di lavoro
	RELAZIONE TECNICA	R.U.P. dr. geol. A. Guerriero
Novembre 2009	<u>CONSULENTI</u> Università degli Studi di Siena — Centro di Geotecnologie	Segretario Generale Pietro Giuliano Cannata

Relazione finale della Convenzione tra Autorità di Bacino del Sarno e Università degli Studi di Siena, Centro di Geotecnologie, inerente a:

Attività di rilevamento geometrico e geo-strutturale del sistema di fratture e dei relativi volumi di roccia, potenzialmente instabili derivanti dalla loro intersezione e di una parte della falesia dell'entroterra di Marina Piccola, mediante tecniche fotogrammetriche e laser scanning (Legge n° 183 del 18.5.1989 e ss.mm.ii)

PREMESSA

L'analisi ed il monitoraggio dei dissesti geologici ha un ruolo fondamentale nelle politiche di gestione del territorio, sia nelle aree densamente popolate sia nei centri urbani di pregio storico-artistico. L'importanza di questi temi impone un'analisi delle cause geologiche che sono alla base dei fenomeni di instabilità sia per la definizione dei parametri progettuali per le opere di messa in sicurezza sia ai fini delle attività di rilevamento dei dissesti nel tempo (monitoraggio).

Riferendoci al contesto che attiene ai movimenti dei versanti in roccia, le tecniche analitiche utilizzate sono inerenti alla definizione dei parametri geostrutturali e geomeccanici dei fronti rocciosi. Tali tecniche permettono di individuare le caratteristiche geometriche dei blocchi e degli ammassi rocciosi, funzionali alle analisi di stabilità ed alla determinazione dei parametri di progetto delle opere di messa in sicurezza (consolidazione, tirantatura, installazione di reti metalliche etc.).

Le metodologie di analisi strutturale e geomeccanica includono il rilevamento di dettaglio delle attitudini geometriche dei piani di fratturazione, degli indicatori cinematici e, mediante "stendimenti" lungo sezioni rappresentative, la raccolta di dati geomeccanici relativi a giacitura delle fratture, persistenza, spaziatura, rugosità, resistenza della parete, apertura, riempimento, presenza d'acqua, numero di sistemi di discontinuità e dimensione dei blocchi. La validità dei risultati di tali modalità di analisi può essere migliorata se integrata con le tecniche di indagine e rilievo topo-cartografico tra cui la fotogrammetria digitale ed il laser-scanner. Tali tecniche sono il contributo più aggiornato delle tecnologie geomatiche allo studio dei movimenti dei versanti, e la loro applicazione, integrata con i metodi di analisi strutturale e geomeccanica, permette una ricostruzione estremamente dettagliata del modello geometrico, dei blocchi e degli ammassi rocciosi presenti nei versanti in roccia. Infatti, i metodi di analisi di stabilità con simulazione numerica si basano su un modello di riferimento ottenuto in base alla geometria dei sistemi di discontinuità, alle condizioni al contorno (*boundary conditions*), allo stato tensionale iniziale (*in situ stress*) ed infine, al comportamento della roccia intatta e delle discontinuità (*constitutive laws*), legato alle loro caratteristiche fisico-meccaniche. Nonostante che i metodi di analisi convenzionali siano utilizzati nella pratica a causa della loro facilità e rapidità di utilizzo, la loro applicazione risulta essere limitata a problemi di natura semplice con elementari configurazioni geometriche e meccaniche. Nella maggior parte dei casi, tuttavia, l'instabilità dei pendii in roccia implica l'esistenza di una oggettiva complessità legata agli aspetti geometrici del versante, ai sistemi di discontinuità strutturale, alle caratteristiche dei materiali e alla distribuzione degli stati tensionali nell'ammasso (Stead, 2003). Per questo, i metodi convenzionali di analisi cinematica e all'equilibrio limite, utili nella ricostruzione dei meccanismi di innesco alla base del cedimento, **sono insufficienti** nella modellazione dell'evento gravitativo sulla stabilità dell'intero versante.

Per effettuare l'analisi di stabilità è anche necessario disporre di informazioni riguardanti le proprietà fisico-meccaniche e l'assetto geometrico sia della roccia integra sia delle sue discontinuità. Le proprietà fisico-meccaniche derivano da prove in sito e di laboratorio, mentre, nel caso della inaccessibilità delle pareti, le caratteristiche geometriche per analisi di tipo

deterministico possono essere ricavate da immagini fotografiche dettagliate e prese da differenti punti di vista. A tal fine, la fotogrammetria digitale terrestre integrata al rilievo laser scanner permette di misurare gli elementi strutturali e geomeccanici (es. la spaziatura) archiviandoli in banche dati e favorisce la discussione tra gli addetti ai lavori anche di diversa estrazione culturale (es. geologi, ingegneri) attraverso un facile esame congiunto del modello stereoscopico tridimensionale. Il monitoraggio consiste nella misura periodica e automatica di parametri che esprimono l'andamento dei movimenti indotti dai processi attivi quali ad esempio i movimenti del suolo a bassa velocità ed accelerazione e facilita la riduzione dell'impatto di tali deformazioni su persone e cose al verificarsi di eventi intensi. Per il controllo di questi movimenti del suolo si ricorre a sistemi di misura in sito (inclinometri ed estensimetri), livellazioni topografiche e reti GPS integrate da tecniche basate su sensori geodetici tipo laser. I moderni sistemi di monitoraggio sono costituiti da una rete di rilevamento automatico di diversi parametri la cui registrazione è gestita attraverso degli applicativi software in grado di eseguire confronti tra i parametri misurati e le eventuali soglie di allerta. Una tecnica di misura alternativa per il monitoraggio dei movimenti del suolo è l'Interferometria Differenziale Radar ad Apertura Sintetica (DInSAR) sia satellitare sia terrestre. Con questa metodologia è possibile misurare lo spostamento di tali superfici elaborando interferogrammi di immagini SAR della stessa area acquisite in tempi diversi. La tecnica consente teoricamente la valutazione di deformazioni della superficie terrestre con precisione millimetrica. Un sistema di monitoraggio remoto basato su DInSAR consente di controllare, in modo spazialmente continuo, l'evoluzione dei movimenti del suolo ad intervalli di tempo molto brevi, rendendo possibile il riconoscimento di nuovi fenomeni di movimento prima che questi producano effetti. Tuttavia, alcuni problemi connessi a scarsa coerenza tra le scene, principalmente legati ad effetti atmosferici e a variazioni della copertura del suolo, possono impedire la stima accurata degli spostamenti occorsi al suolo tra scene SAR successive, limitando l'utilizzazione della tecnica.

Quanto esposto costituisce non solo lo stato dell'arte in materia di analisi e monitoraggio dei movimenti dei fronti rocciosi, ma anche la descrizione di un approccio integrato ad un fenomeno che, solo utilizzando tutte le tecniche descritte, può essere valutato nella sua complessità ed evoluzione spazio-temporale. **Per questo motivo nelle attività di studio dei fenomeni di instabilità della Falesia di Grotta delle Felci, che saranno di seguito descritte, sono state applicate tutte le metodologie di cui sopra con l'esclusione di quelle inerenti al monitoraggio, indicando per queste ultime, le modalità e le caratteristiche per una loro messa in funzione in tempi rapidi.**

1. INTRODUZIONE

L'Autorità di Bacino Regionale del Sarno (AdB), nel contesto delle proprie finalità istituzionali, ha commissionato all'Università di Siena, Centro di Geotecnologie, lo studio della falesia rocciosa dell'area prossima a Grotta delle Felci, situata al confine tra i Comuni di Anacapri e Capri, ove nel dicembre 2007 si sono verificati alcuni fenomeni di distacco di blocchi di roccia che hanno interessato le abitazioni della zona. Come illustrato in premessa, nei pendii in roccia le conoscenze dell'intensità e delle caratteristiche geometriche e geostrutturali della fratturazione che interessa i volumi di roccia costituiscono un elemento decisivo ai fini dell'analisi della stabilità dei versanti. Per il raggiungimento di tali conoscenze nel caso in esame il principale problema è rappresentato dalla impossibilità di accedere alla zona di studio, costituita da un falesia verticale alta oltre 180 metri e lunga 250 metri, sita a strapiombo su strade e abitazioni. In questo caso, oltre alle normali

metodiche di indagine, è stato sviluppato un approccio di studio che permette un'analisi dettagliata delle discontinuità strutturali, integrando i dati provenienti dalle seguenti attività:

1. Rilevamento geologico e geomorfologico dell'area di Grotta delle Felci e delle zone prospicienti;
2. Rilevamento geostrutturale e geomeccanico;
3. Rilevamento laser scanner e rilievi topografici integrati con misure GPS;
4. Rilevamento fotogrammetrico;
5. Analisi della stabilità dei volumi di roccia tramite integrazione dei dati provenienti da tecniche di interpretazione fotogeologica basata su metodi fotogrammetrici per la valutazione dei fattori di sicurezza in condizioni normali e critiche (presenza di acqua e accelerazione sismica);
6. Individuazione delle soluzioni tecniche e di monitoraggio

Lo studio è stato svolto tramite due distinte Convenzioni istituite con l'AdB, la prima conclusa nel novembre 2008 inerente alle attività 1,2,3 sopra elencate, mentre i punti 4,5,6 sono stati oggetto di una seconda convenzione di cui questo testo costituisce la relazione finale. Allo scopo di permettere una visione di assieme dei dati e delle elaborazioni svolte, nei successivi paragrafi (2.1,2.2,2.3) verranno riassunti i principali risultati già emersi in base ai risultati della prima convenzione, mentre per i seguenti paragrafi (2.4,2.5,2.6) verranno illustrate le attività svolte ed i risultati ottenuti.

2. DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ

2.1 - Attività 1. Rilevamento geologico e geomorfologico dell'area di Grotta delle Felci e delle zone prospicienti

La prima fase è stata dedicata all'acquisizione ed omogeneizzazione dei dati per la definizione del quadro geostrutturale e geomorfologico. A tal fine sono state svolte analisi di dettaglio della successione stratigrafica e dell'assetto strutturale del Gruppo del Monte Solaro (area tra M.te Solaro, S. Maria Cetrella e Passettiello) che domina la parte settentrionale della parete (Fig.1). I dati rilevati (Allegato 1: CARTA GEOLOGICA) mostrano come tutta l'area sia interessata da un sistema di fratture con direzione variabile da N-S a 120° - 130° e con inclinazioni oscillanti da 70° a verticale. La cinematica delle faglie è risultata prevalentemente di tipo trascorrente per quelle con direzione 130° , mentre, in generale, le superfici orientate N-S hanno mostrato rigetti verticali con abbassamento del blocco orientale. Una terza famiglia di fratture assai pervasiva mostra una direzione 130° - 145° ed inclinazioni comprese tra 30° e 40° , andando ad intercettare le due famiglie precedenti nonché la parete rocciosa, nei confronti della quale genera superfici a franapoggio di scorrimento preferenziale. L'intersezione dei sistemi di frattura suddetti genera una fascia di debolezza ad inviluppo N-S che ha guidato la geometria della parete rocciosa; ad un'analisi morfologica da foto aerea risulta infatti chiara la geometria a "denti di sega" che la parete assume a seguito dell'intersezione dei due sistemi di frattura sub-verticali. Sono inoltre da segnalare imponenti fenomeni carsici presenti a varia scala che, intersecandosi con fratture e diaclasi, costituiscono un ulteriore elemento di debolezza della falesia.

2.2 - Attività 2. Rilevamento geostrutturale e geomeccanico.

Attraverso il rilievo di circa 260 elementi di discontinuità negli ammassi rocciosi calcarei della base della parete orientale del Monte Solaro (Fig. 1), in località Grotta delle Felci, è stata compiuta un'indagine rivolta alla caratterizzazione degli ammassi rocciosi che sulla base delle classificazioni geomeccaniche di letteratura (Bieniawski, 1976; Romana, 1985) presentano

caratteristiche generali di qualità da mediocre (III classe SMR) fino a scadente (IV-V classe SMR) (Fig.2) con una situazione di stabilità parziale e una modalità prevalente di rottura lungo piani e cunei.

Il cinematismo di rottura riscontrato dall'analisi dei giunti e dell'orientazione della parete ha consentito di determinare la presenza di 5 famiglie medie principali di giunti (Fig.2). Le maggiori problematiche si verificano in corrispondenza della liberazione di cunei liberi secondo i seguenti cinematismi, in ordine di importanza.

- Elevata tendenza all'instabilità per scorrimento planare di blocchi derivati dalla interferenza tra i giunti appartenenti alle classi K3 (Fig.2) e K7 (Fig.2).
- Tendenza elevata allo scorrimento planare lungo le superfici appartenenti alle classi K4, K5. Tendenza molto elevata all'instabilità per ribaltamento (toppling) di blocchi creati dalla interferenza tra giunti appartenenti alle classi K2 e K1.
- Tendenza da elevata a molto elevata alla instabilità per ribaltamento lungo giunti appartenenti a K4, soprattutto nelle aree di relativa "rientranza" della parete.
- Tendenza al crollo con caduta verticale di porzioni di ammasso roccioso distaccati dall'interferenza dei giunti K1 e K2 (o in più rari casi, con la superficie di stratificazione S0) in caso di già avvenuto distacco dell'ammasso roccioso sottostante.

Dei meccanismi di innesco presentati, i primi tre appaiono essere quelli maggiormente indiziati degli eventi di caduta che hanno coinvolto il versante della loc. Grotta delle Felci.

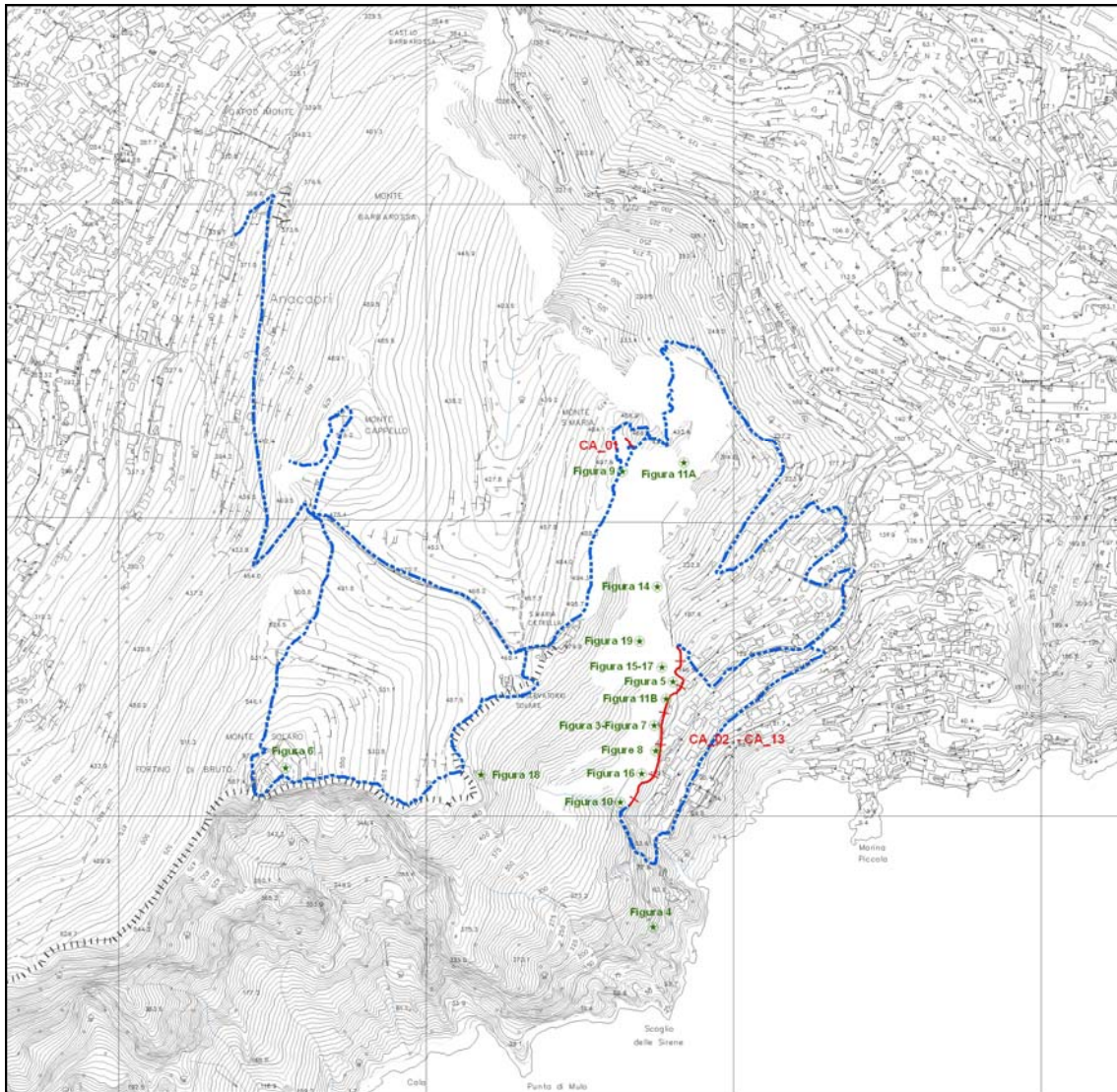


Fig. 1 - Ubicazione dei rilievi: in blu traccia degli itinerari geologici, in rosso ubicazione degli stendimenti geomeccanici; le stelline verdi indicano la localizzazione di affioramenti fotografati (cfr relazione prima Convenzione) e riportati in questa relazione

A causa dell'impossibilità di una effettuazione di rilievi geomeccanici in parete in questa fase di studio, non è stato possibile verificare, se non in pochi casi, la eventuale variazione litologica tra Calcari Bioclastici della Grotta delle Felci e i soprastanti Calcari Selciferi della Migliara, visibili in alcune aree di grotte costituenti antiche linee di battente marino di falesia.

All'interno delle cavità carsiche e di successivo crollo delle grotte è stato possibile verificare la presenza di livelli di calcari selciferi con pieghe (Fig. 2) con possibilità di cedimenti e cadute di porzioni rocciose maggiormente alterate dalle cavità.

Sistemi di Discontinuità (K)	Famiglie di Giunti Direzione di immersione (0°-360°)	Famiglie di Giunti Inclinazione (0°-90°)	RMR b	SMR	Classe SMR
K1a	110°- 130°	85°	64.2	44.2	IV-V
K1b	290°- 310°	85°	64.2	44.2	IV-V
K2 a	90 °	85 °	66.4	31.4	IV
K2 b	270 °	85 °	66.4	31.4	IV
K7	120°	40°	61.6	40.9	III-IV
K3 a	230°	75°	63.9	27.9	IV
K3 b	50°	75°	63.9	27.9	IV
K4a	10	80°	65.5	30.5	IV
K4b	190	80°	65.5	30.5	IV

Fig.2 - Tabella dei dati geomeccanici di base e delle caratteristiche di instabilità potenziale (5 classi di maggiore evidenza, suddivise per chiarezza nelle sottoclassi a,b quando a causa degli alti valori di inclinazione le classi ricadono in opposti quadranti di immersione). Nel trattamento sono state trascurate due classi minori, poco evidenti, che nello stereo net di Fig. 4, sono contrassegnate con K5 e K6



Fig. 2 - Pieghe a scala metrica con asse appenninico sub-orizzontale e direzione di trasporto verso NE. Sono presenti anche dislocazioni fragili a modesto rigetto con cinematica inversa

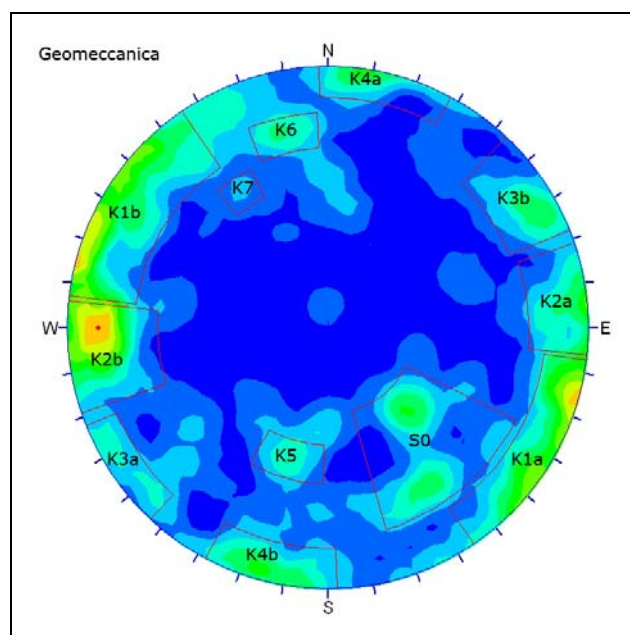


Fig.4 – Stereonet delle direzioni/immersioni delle famiglie di giunti

2.3 - Attività 3: Rilievo Laser scanner e rilievi topografici integrati con misure GPS.

Il rilievo tramite Laser Scanner tipo RIEGL® Z420i ha permesso di realizzare un DDSM (Digital Dense Surface Model) della superficie studiata con risoluzione centimetrica (7 cm in parete). La precisione della misura raggiunge +/- 10 mm (a 500m), e l'area di ripresa fino a 90° verticale e 360° orizzontale. Lo strumento (Fig. 5) può misurare punti posti a distanze oltre i 1000 metri dal punto di stazione. Per il rilievo della falesia sono state utilizzate scansioni poste in due diverse stazioni; una in prossimità di Scoglio delle Sirene ed una posta sul tetto dell'ospedale di Capri.



Fig.5 – Laser Scanner RIEGL® Z420I posizionato sulla II stazione di misura posta sul tetto dell'ospedale di Capri

Il modello digitale realizzato a partire dalla nuvole di punti (i due rilievi hanno totalizzato oltre 13 milioni di punti, mentre quelli effettivamente utilizzati sono oltre 7 milioni di punti), ha costituito una struttura topo-cartografica portante per il rilievo fotogrammetrico (vedi punto successivo) sia in fase di analisi che nella produzione degli elaborati orto-fotografici; una visualizzazione tridimensionale del risultato finale è riportata in Fig.6.

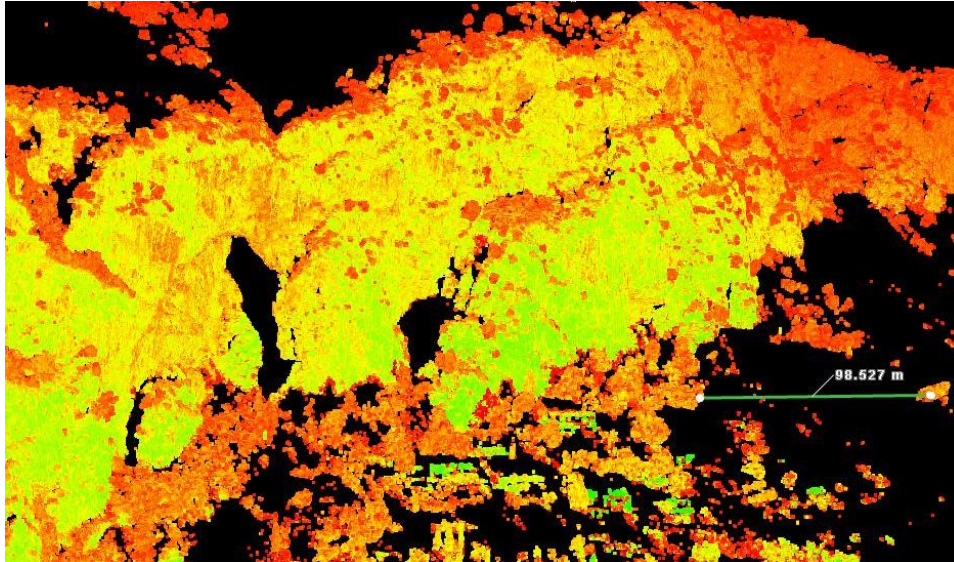


Fig.6 – Scansione Laser della falesia di Grotta delle Felci (montaggio dei dati derivanti da due scansioni, oltre 13 milioni punti rilevati)

2.4 - Attività 4 : Rilievo Fotogrammetrico

2.4.1 – Rilievo fotografico

Le sfavorevoli condizione di accessibilità alla parete rocciosa in esame hanno fatti si che le comuni tecniche di presa fotografica, quali elevatori meccanici o palloni aerostatici dove posizionare le macchine, non risultassero idonee all'esecuzione del rilievo. Per ovviare al problema si è scelto di eseguire il rilievo da un elicottero dove, grazie ad una barra appositamente costruita, è stata fissata l'attrezzatura fotografica. La strumentazione di ripresa fotogrammetrica di proprietà del CGT è composta da un supporto in alluminio fissato sul cestello sopra il pattino dell'elicottero, questo ospita due macchine fotografiche Nikon™ D80 (10 megapixel di risoluzione spaziale) che eseguono scatti contemporanei con una base di presa pari a 3 metri (Fig. 7).

Il software utilizzato per il controllo delle due macchine fotografiche dall'elicottero è il "Camera Control Pro" della Nikon. Ogni macchina viene collegata ad un computer gestito da un operatore all'interno dell'elicottero che, grazie al software prima citato, può controllare in real time le foto scattata ed appurare la qualità di esse. Oltre alle 2 macchine fotografiche il supporto alloggia anche due antenne GPS Leica™ 1200 che permettono di ricavare sia la direzione della barra ad ogni scatto sia l'esatta posizione dei centri di presa delle macchine fotografiche (Fig. 8).

Il rilievo GPS è stato effettuato in modalità RTK dopo aver montato una base di riferimento in un punto tale da garantire, per l'intera durata del rilievo, la connessione radio tra esso e i ricevitori GPS (rover) posti sulla barra nel cestello dell'elicottero. Tale base era posizionata nelle vicinanze della spiaggia di Marina Piccola.

L'intero versante è stato fotografato mediante l'acquisizione di strisciate verticali, prese in sequenza dal basso verso l'alto, con il vettore stabile in quota in manovra di "hovering" e la strumentazione fissata nel cestello sopra il pattino (Fig. 9).

Per coprire l'intera zona in esame è stato necessario utilizzare 5 strisciate ognuna delle quale composta da 5 o 6 foto. L'angolazione costante della parete rocciosa e la bravura del pilota nel mantenere lo stesso angolo rispetto al Nord in ogni strisciata, hanno permesso di poter unire le 5 strisciate in un unico blocco e di conseguenza di poter ottenere un unico Ortofotomosaico (Fig. 9).



Fig.7 – Strumentazione di rilevamento fotogrammetrico della falesia, montata su elicottero

Per risolvere le equazioni di orientamento assoluto dei fotogrammi, necessarie nella ricostruzione dei modelli stereoscopici, sono state utilizzate le coordinate di punti notevoli riconoscibili sulle foto. Nel caso della parete di “Grotta delle Felci” la rappresentazione cartografica convenzionale è molto limitata, in quanto questi fronti sono rappresentati da linee simboliche come scarpate, linee di cresta o dirupi, anche in caso di basi topografiche dettagliate. Per ovviare all’assenza di informazioni, è stato ricreato un nuovo sistema di riferimento passando da un piano di rappresentazione cartografica orizzontale, come nella cartografia tradizionale, ad un sistema verticale (X,Y,Z); in pratica vengono ruotati gli assi Y e Z mantenendo fisso l’asse X combaciante con la direzione di scatto. E’ stato quindi effettuato un rilievo topografico di dettaglio con una Stazione Totale Laser Leica™ (reflectorless) TCRP 1202 R300 (Fig. 4); sono stati individuati in campagna 150 GCP (Ground Control Point), utilizzati in seguito per l’orientamento assoluta delle 5 strisciate. La località dove si è svolto il rilievo topografico è Marina Piccola e precisamente la Stazione Totale era posizionata, nel sistema di riferimento UTM WGS84 Fuso 33N, alle coordinate E: 435219.1245 N: 4488552.8481, ricavate mediante l’utilizzo di un ricevitore GPS doppia frequenza Leicatm 1200.

2.4.1 – Elaborazione dati

L’orientamento dei fotogrammi è stato effettuato con il modulo LPS del software ERDAS™ IMAGINE 9.2. L’orientamento dei fotogrammi avviene principalmente in due fasi:

- orientamento interno
- orientamento assoluto

L'orientamento interno è quel processo che permette di associare ciascun fotogramma al sistema ottico che lo ha generato, ovvero alla camera fotografica, in funzione dei parametri geometrici fondamentali (nel caso di immagini digitali la distanza focale e la dimensione del pixel – “pixel size”).

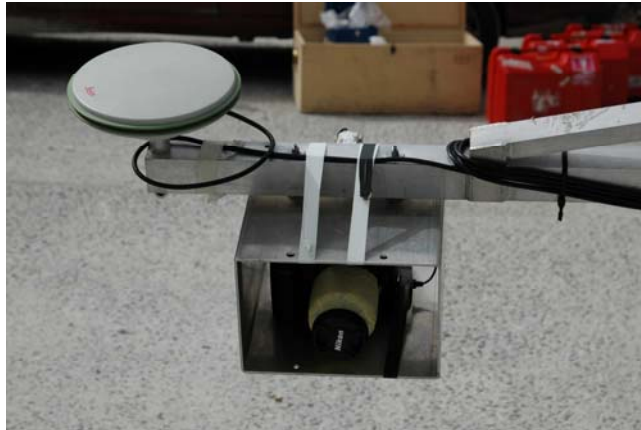


Fig. 8 – Alloggiamento delle antenne GPS in prossimità delle macchine fotografiche

L'orientamento assoluto consente invece di orientare i fotogrammi l'uno rispetto all'altro (fase dell'orientamento relativo, realizzata mediante tie points - punti di legame di coordinate ignote) ed il modello rispetto al terreno (fase dell'orientamento esterno, realizzata mediante i 150 GCP dal rilievo topografico).

Attraverso la procedura di triangolazione è stato possibile orientare tutti i fotogrammi delle 5 strisciate, determinando così i parametri incogniti di posizione ed attitudine di ogni scatto, venendo così a conoscenza delle coordinate terreno tridimensionali di ogni pixel con anche il calcolo dello scarto quadratico medio (Root Mean Square Error – RMSE) di orientamento per ognuna di esse (Fig.10). Come già detto in precedenza in questa particolare situazione è stato possibile unire tutte le strisciate in un *unico blocco fotogrammetrico*, questo ha fatto sì che tutta la zona in esame abbia un unico sistema di riferimento e RMSE per tutto il blocco. Il valore di RMSE ottenuto è 4 Pixel; considerando una dimensione dei pixel pari a $6.09 \mu\text{m}$, è stato calcolato che l'errore a terra è pari a 6,7 cm, in relazione alla distanza focale delle macchine fotografiche pari a 18 mm e alla profondità media di scatto per i singoli fotogrammi pari a circa 50 m.

A questo punto è possibile ricavare il DEM e successivamente l'ortofoto. La qualità dell'ortofoto dipende in maniera diretta dalla qualità delle DEM e, purtroppo, non sempre il DEM ricavato dalla fotogrammetria raggiunge precisioni ottimali; così per poter ottenere una ortofoto più precisa si è svolto, come detto in precedenza, un rilievo con Laser Scanner tipo “Riegel Z420i”, con una risoluzione di un punto ogni 5-7 cm, e da questo si è ottenuto il DDEM (Digital Dense Elevation Model) utilizzato per la costruzione delle ortofoto e successivamente dell'ortofotomosaico (Fig.11).

2.4.2 – Fotointerpretazione dei sistemi di discontinuità e dei giunti

Una volta terminata la fase di orientamento di tutti i fotogrammi e la costruzione dell'ortofotomosaico, è stato possibile, mediante fotointerpretazione delle strutture geologiche, individuare le superfici di discontinuità presenti nel fronte. Una volta individuata in base a criteri

geologici e geologico-strutturali una superficie di delimitazione di un blocco (es faglia, frattura, giunto, stratificazione) la determinazione della giacitura nello spazio di tale superficie (posizionamento nel sistema di riferimento adottato e angoli di direzione e inclinazione) avviene posizionando sui piani analizzati, tramite la visualizzazione stereoscopica, tre punti che costituiscono i vertici di un triangolo complanare al piano studiato. Successivamente, mediante la restituzione fotogrammetrica di tali triangoli si ottengono i ricercati parametri di attitudine geometrica (direzione di immersione ed inclinazione) che di fatto rappresentano la giacitura delle fratture in esame. La stereorestituzione manuale delle superfici di fratturazione è stata effettuata tramite il modulo StereoAnalyst di ERDAS™ IMAGE 9.2 (Fig.12).

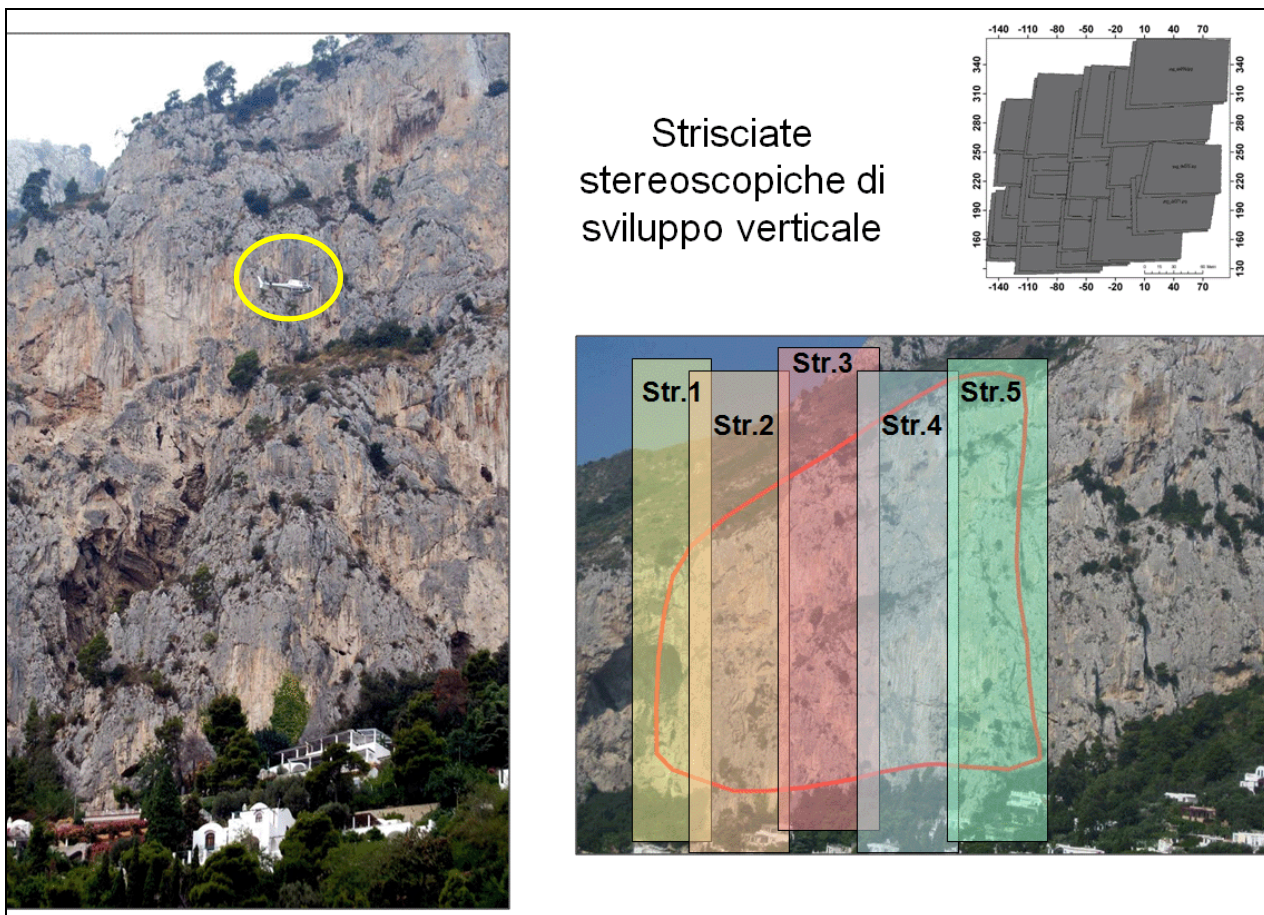


Fig.9 – Fasi del rilievo fotogrammetrico (a sinistra); a destra i fotogrammi e le strisciate acquisite

Tutte le superfici di discontinuità fotointerpretate e stereorestituite in questa fase, vengono classificate come “effettive” ovvero rappresentano dei piani di presenza certa e ben visibile in quanto è stato possibile disegnarli con 3 punti “a terra”, ovvero tre punti appoggiati sulla superficie geometrica dell’elemento analizzato (Fig.12).

Alla fase di stereorestituzione è seguita una fase di processing dei dati necessaria per ricavare le giaciture dei piani di discontinuità; si tratta di una serie di operazioni che portano alla realizzazione di un DSM (Digital Surface Model) in formato TIN (Triangular Irregular Network), il quale, analizzato tramite le funzioni Aspect e Slope del software Esri™ ArcMap, permette di

ricavare rispettivamente i dati di direzione di immersione rispetto al nord e di inclinazione rispetto al piano orizzontale (Fig.13).

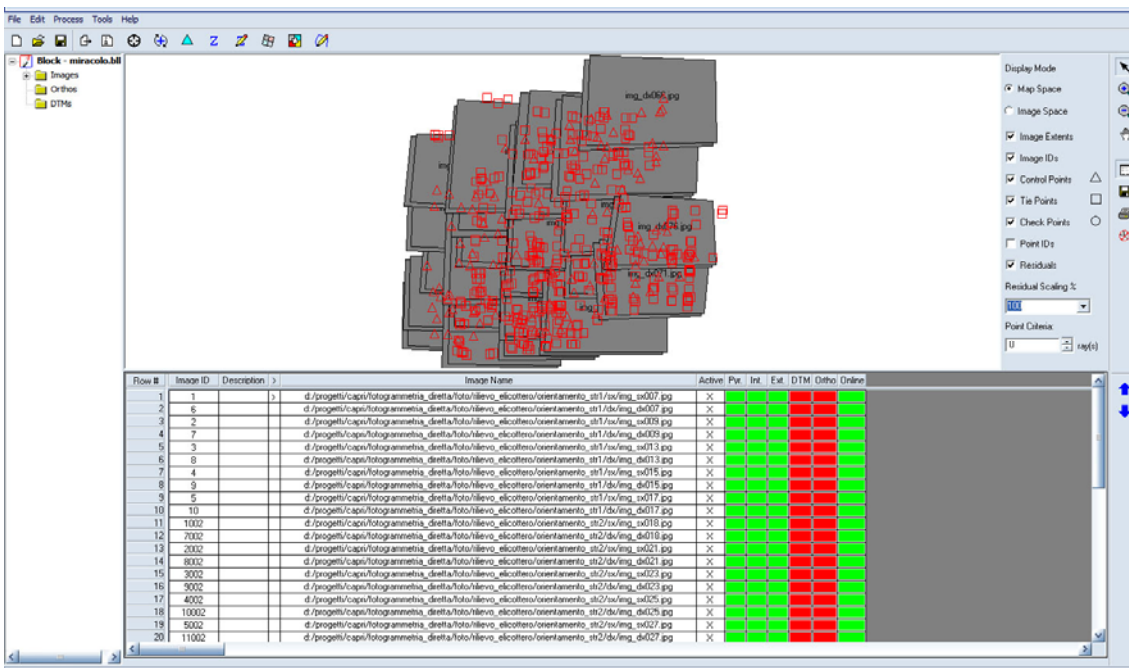


Fig.10 – L'interfaccia di ERDAS™ IMAGINE 9.2, Stereoanalyst

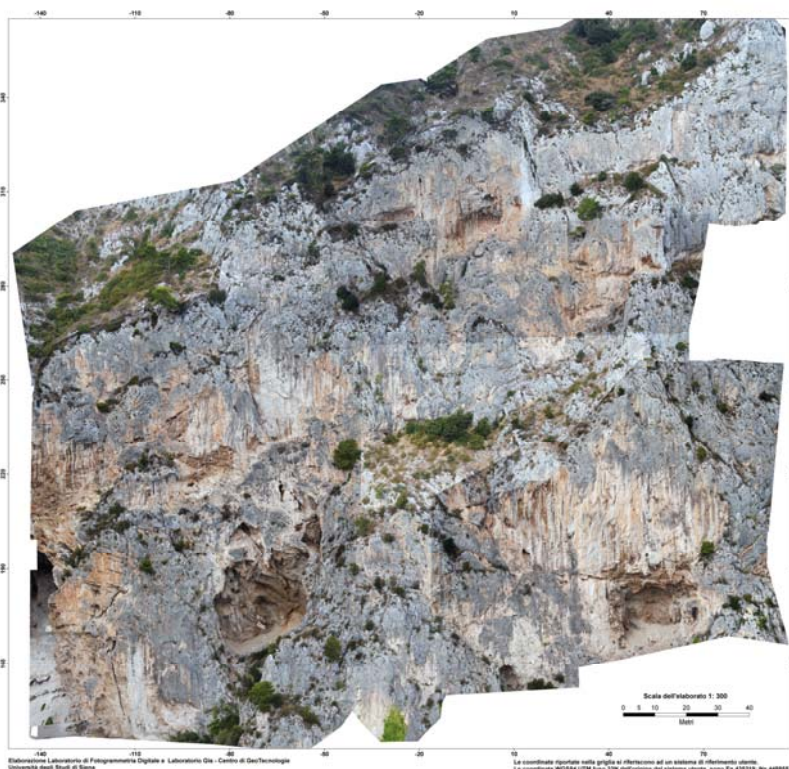


Fig.11 – Ortofotomosaico della falesia di Grotta delle Felci

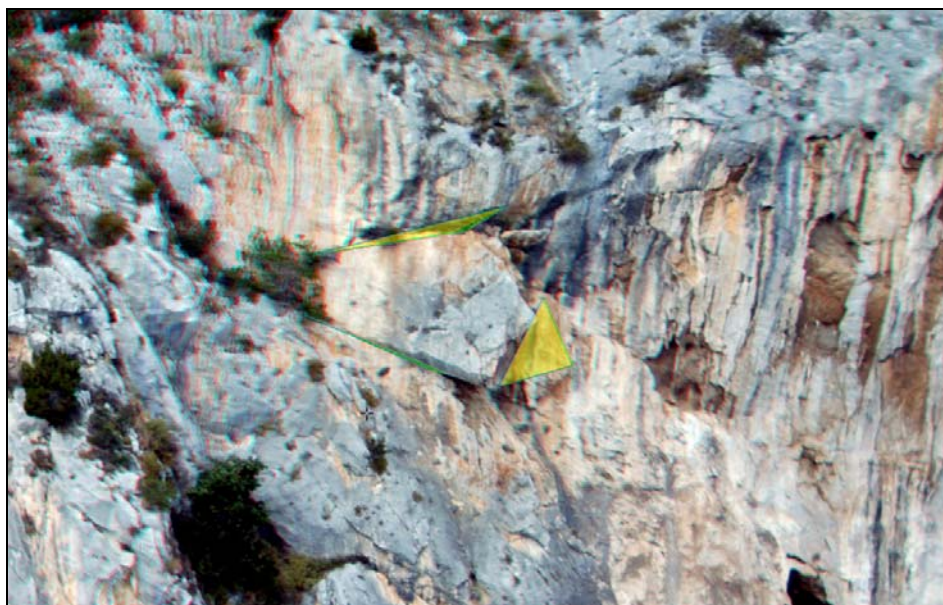


Fig.12 – Interpretazione delle superfici che delimitano un blocco

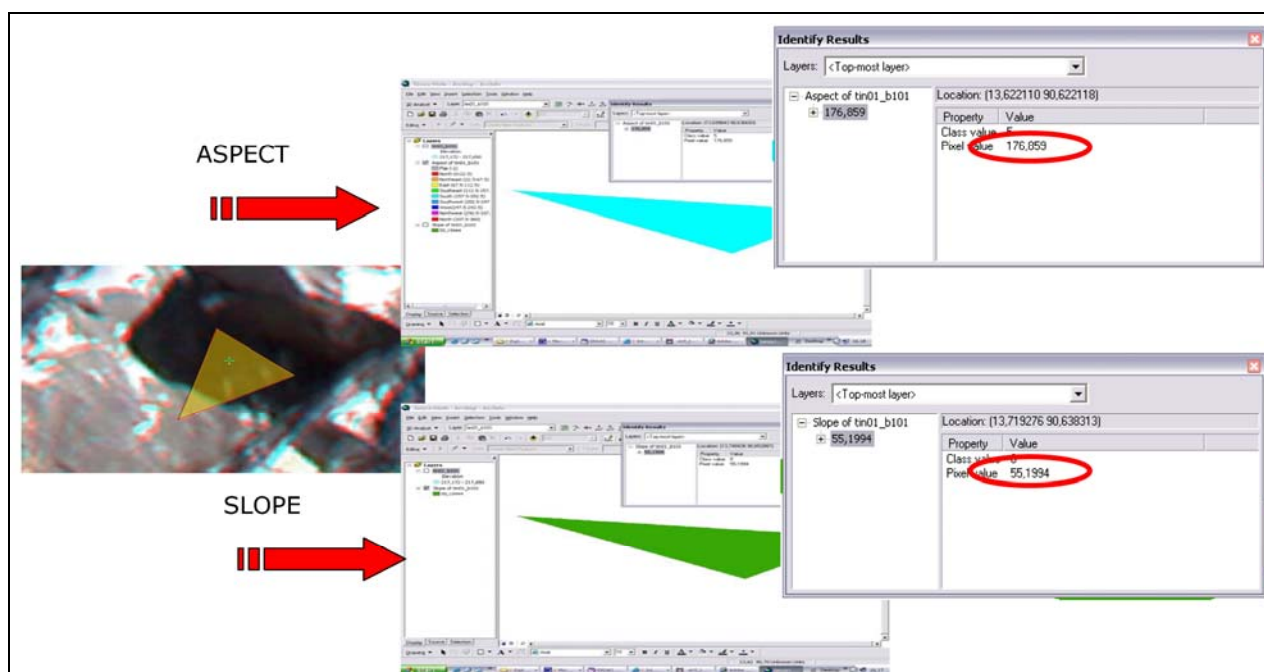


Fig.13 – Processing delle superfici che delimitano un blocco ai fini della determinazione della attitudine geometrica del piano (Direzione, Inclinazione)

2.4.3 Individuazione e caratterizzazione dei principali sistemi di discontinuità mediante analisi stereografica e confronto tra le direzioni analizzate tramite interpretazione fotogrammetrica e rilievo geostrutturale

L'insieme delle giaciture delle discontinuità ricavate dalla stereorestituzione è stato analizzato mediante il software Dips 5.1 Rock (Engineering Group) della Rosciencetm Inc. che esegue l'analisi grafica e statistica dei dati geologico-strutturali attraverso analisi stereografica.

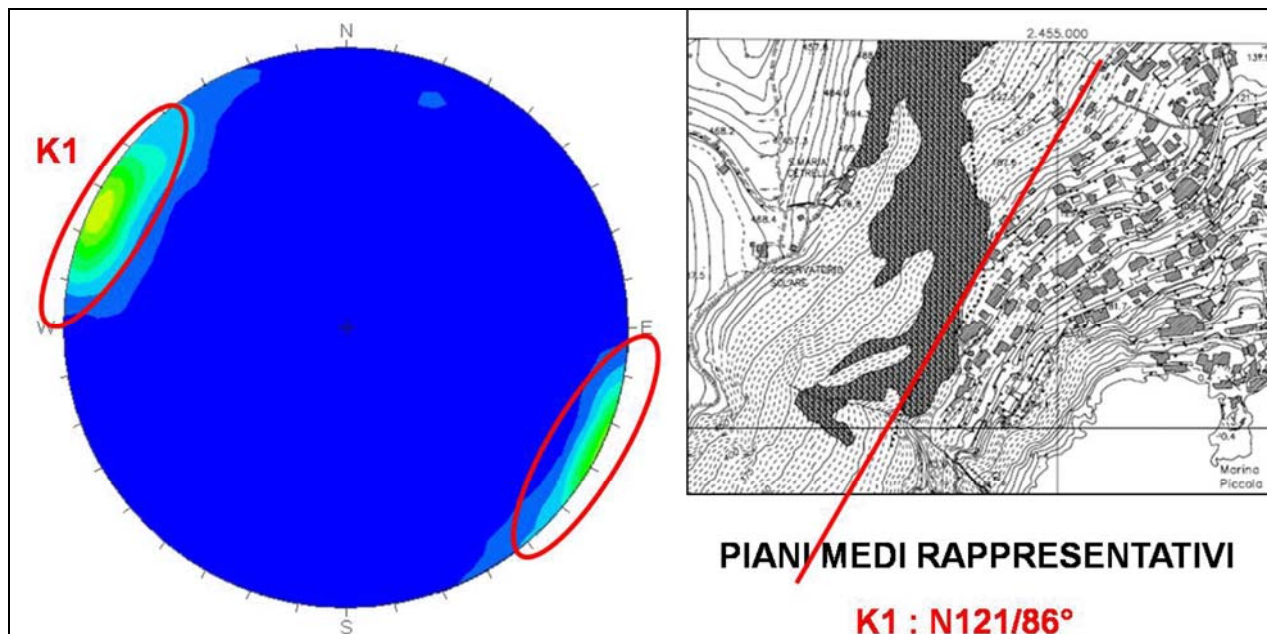


Fig. 14- Direzione strutturale principale k1: a sinistra lo stereo net (247 misure) a destra lo sketch illustrante che la direzione di allungamento della falesia è parallela a questa direzione

La rappresentazione stereografica utilizzata è quella di equiareale di Schmidt che consente di effettuare un'analisi statistica della distribuzione dei poli ai fini di individuare le principali famiglie di discontinuità, corrispondenti con le zone di massimo addensamento dei poli.

Una prima analisi ha evidenziato come il sistema prevalente sia il sistema avente direzione N30 (indicato con il nome K1) con inclinazione sub verticale; tale sistema è molto più persistente e presente rispetto agli altri sistemi e quindi si è proceduto ad un filtraggio dei dati, analizzando prima il sistema K1 (Fig.14) e separatamente gli altri sistemi (Fig.15).

Nella Fig.14 è evidente come le direzioni N30 pseudoverticali siano le responsabili della impostazione della falesia anch'essa avente nel tratto studiato la stessa orientazione.

Nella Fig.15, con l'esclusione della direzione principale K1, sono invece illustrate le diverse famiglie di direzioni strutturali, rilevate tramite l'analisi fotogrammetrica, ed è riportata una tabella con la descrizione analitica delle famiglie rappresentate nello stereonet.

Con i dati disponibili è ora possibile effettuare un confronto ed una correlazione tra i dati geostrutturali rilevati durante il rilievo geomeccanico ed il rilevamento geologico (Fig. 16 e Fig.17).

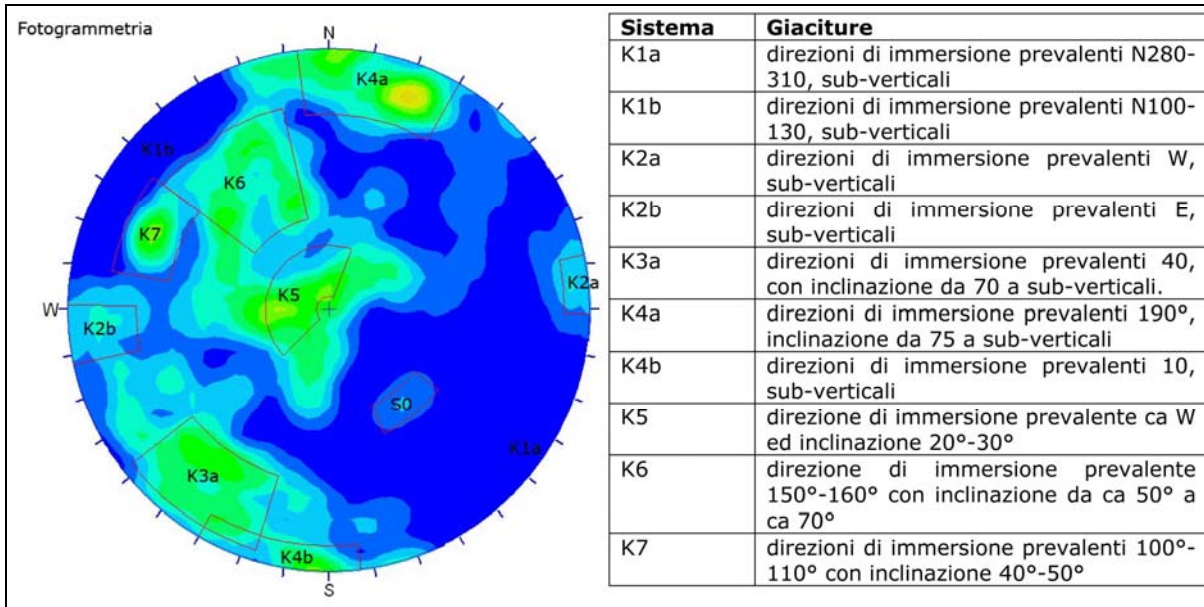


Fig. 15- Direzioni strutturali riscontrate tramite rilevamento fotogrammetrico (209 misure)

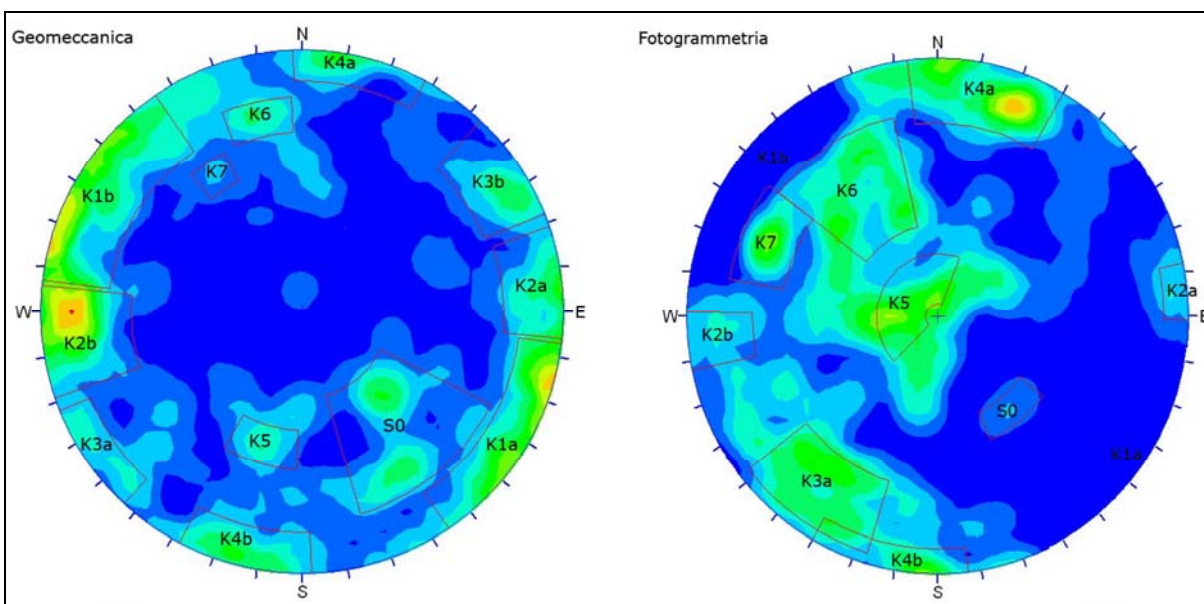


Fig. 16- Confronto tra le direzioni strutturali derivanti dai due metodi

In Fig. 16 sono riportate le due proiezioni stereografiche per i dati ricavati tramite i due diversi metodi; il confronto illustra alcune differenze per i diversi sistemi di direzione (e soprattutto per i sistemi minori K5, K6 e K7), le quali possono essere imputabili a:

1. tra i due metodi di rilievo esiste, a prescindere dalle precedenti valutazioni, una lieve differenza nella direzione d'immersione di circa $\pm 5^\circ$ (da assumere come dato di progetto), riconducibile a possibili errori di presa fotogrammetrica, connessi a problemi di deriva del sistema telaio – elicottero ed alle conseguenti difficoltà di orientamento e restituzione;
2. le misure sono state effettuate su piani diversi, caratterizzati da posizioni e quote differenti. Il rilievo Geomeccanico infatti è stato possibile, a causa dell'inaccessibilità dell'area, solo

ai piedi ed alla sommità della falesia. Di fatto questo è uno dei motivi che ci ha spinto all'utilizzo dell'elicottero per le prese fotogrammetriche.

Sistema	Geomeccanica	Fotogrammetria	Differenze tra Geomeccanica e Fotogrammetria
K1a	direzioni di immersione prevalenti 290°-310°, con inclinazione 85°	direzioni di immersione prevalenti N280-310, sub-verticali	Coincidenti
K1b	direzioni di immersione prevalenti 110°-130°, con inclinazione 85°	direzioni di immersione prevalenti N100-130, sub-verticali	Coincidenti
K2a	direzioni di immersione prevalente W, sub-verticali	direzioni di immersione prevalenti W, sub-verticali	Coincidenti
K2b	direzioni di immersione prevalenti E, sub-verticali	direzioni di immersione prevalenti E, sub-verticali	Coincidenti
K3a	direzioni di immersione prevalenti 50° con inclinazione da 75° a sub-verticale	direzioni di immersione prevalenti 40, con inclinazione da 70 a sub-verticali.	Coincidenti
K3b	direzioni di immersione prevalenti 230° con inclinazione da 75° a sub-verticale	nn	Nello stereonet fotogrammetrico il k3b è contiguo e probabilmente inglobato al K4, per cui non è stato evidenziato.
K4a	direzioni di immersione prevalenti 190°, inclinazione da 80 a sub-verticali	direzioni di immersione prevalenti 190°, inclinazione da 75 a sub-verticali	Coincidenti
K4b	direzioni di immersione prevalenti 10, inclinazione da 80° a sub-verticali	direzioni di immersione prevalenti 10, sub-verticali	Coincidenti
K5	direzioni di immersione prevalenti ca 20° con inclinazione ca 40°. Non valutato dal punto di vista geomeccanico	direzione di immersione prevalente ca W ed inclinazione 20°-30°	Si può notare come nello stereonet fotogrammetrico l'inclinazione del sistema è di circa 10°-20° minore rispetto a quella ottenuta dalla geomeccanica, questo basso valore, che pone il sistema in prossimità del centro dello stereo net, comporta evidenti variazioni della direzione di immersione che infatti è difficilmente delineabile.
K6	direzione di immersione prevalente ca 160-170° con inclinazione ca 60-70°. Non valutato dal punto di vista geomeccanico	direzione di immersione prevalente 150°-160° con inclinazione da ca 50° a ca 70°	Coincidono. Si può notare però come nello stereonet fotogrammetrico il sistema sia più esteso, probabilmente a causa del diverso numero di misure tra i due rilievi e ad un possibile inglobamento di una parte del K7.
K7	direzioni di immersione prevalenti 120°-130° con inclinazione 40°	direzioni di immersione prevalenti 100°-110° con inclinazione 40°-50°	Coincidono anche se si possono notare 10-20° di differenza nella direzione di immersione dovuti probabilmente al diverso numero di misure tra i due rilievi e ad un possibile inglobamento, nello stereonet fotogrammetrico, di una parte del K7 nel contiguo K6.
S0	direzione di immersione prevalente 320-330° ed inclinazione 50-60°.	direzione di immersione prevalente N330 ed inclinazione ca 40-50°.	Coincidono. Si può però notare come nella geomeccanica sia più evidente è con una maggiore dispersione.

Fig. 17- Confronto e analisi tra le direzioni strutturali derivanti dai due metodi

2.5- Analisi della stabilità dei volumi di roccia tramite integrazione dei dati provenienti da tecniche di interpretazione fotogeologica basata su metodi fotogrammetrici per la valutazione dei fattori di sicurezza in condizioni normali e critiche (presenza di acqua e accelerazione sismica)

Tutte le attività sopra descritte hanno concorso alla definizione dei parametri strutturali che caratterizzano il campo di fratturazione che interessa l'area di studio e conseguentemente i volumi di roccia formati dall'intersezione delle diverse fratture. La metodologia fotogrammetrica utilizzata per analizzare le discontinuità meccaniche (fratture e faglie) non direttamente accessibili perché posizionate all'interno della falesia, ha permesso una ricostruzione numerica delle caratteristiche di tali elementi, permettendo di ottenere un incremento della qualità e della quantità dei dati prodotti.

Gli elementi strutturali hanno una intensa distribuzione all'interno dell'ammasso roccioso e la loro intersezione nelle tre dimensioni delimita volumi di roccia che, con diverse scale dimensionali, rappresentano il principale elemento di pericolosità. La determinazione analitica (numerica) delle attitudini geometriche (direzione di immersione/inclinazione e posizionamento) degli elementi planimetrici è un dato essenziale per la determinazione delle dimensioni e della ubicazione spaziale dei blocchi. Inoltre, ai fini di una valutazione delle caratteristiche di stabilità della falesia che sia basata su criteri deterministici, è indispensabile una conoscenza quantitativa delle caratteristiche dimensionali dei piani di frattura e della geometria del versante relative ai suddetti blocchi; tale ricostruzione geometrica di dettaglio è ottenibile solo attraverso l'uso delle tecniche di fotogrammetria digitale e di processing integrato con tecniche di modellazione 3D dei dati fotogrammetrici. Da tale analisi fotogrammetrica risultano presenti nell'area di studio **178 blocchi** che, sulla base delle condizioni giaciture dei piani che li delimitano, mostrano una maggiore pericolosità da verificare analiticamente.

Il primo elemento di classificazione dei blocchi è in base alla loro evidenza fotogeologica; il criterio della evidenza si basa sulla chiarezza e visibilità dei piani che delimitano i blocchi e gli ammassi. In Fig. 18 è riportato un esempio di blocchi con diversa evidenza che sono stati poi interamente restituiti in banca dati sull'ortofoto (Allegato 2: ORTOFOTOMOSAICO DELLA FALESIA DI GROTTA DELLE FELCI (ISOLA DI CAPRI; Allegato 3: EVIDENZA FOTOGRAFICA DEI BLOCCHI E DEGLI AMMASSI ROCCIOSI INDIVIDUATI)) e in Fig. 19.



Fig. 18- Illustrazione di blocchi con diversa evidenza fotografica: rosso:molto evidente; giallo:evidente;verde:poco evidente

I volumi dei blocchi variano **da c.a. 0.05 m³ a 40 m³** (Allegato 4: CLASSI DIMENSIONALI DEI BLOCCHI E DEGLI AMMASSI ROCCIOSI INDIVIDUATI)

I blocchi delimitati sono stati raggruppati in 4 classi volumetriche, di seguito descritte

- Blocchi di dimensioni inferiori a 1m³;
- Blocchi di dimensioni comprese tra 1 e 5m³;
- Blocchi di dimensioni comprese tra 5 e 10m³;
- Blocchi di dimensioni superiori a 10m³.

Date le caratteristiche di intensa fratturazione della falesia, sono state inoltre delimitate 15 aree “aree caratterizzate dalla presenza di detrito di versante”, ove sono presenti anche numerosi blocchi in posto di piccole dimensioni, e per le quali l’analisi di stabilità viene effettuata qualitativamente su tutta l’area anziché sui singoli blocchi, anche in ragione delle relativamente semplici soluzioni tecniche che potrebbero essere adottate per la loro messa in sicurezza (i.e. reti - vedi Attività 6).

Talvolta, sia per l’ampiezza dei piani di fratturazione che per la complessità geometrica delle loro intersezioni, non è possibile individuare singoli blocchi, ma piuttosto dei volumi rocciosi di rilevanti dimensioni ove l’analisi è maggiormente adeguata in termini di “ammasso roccioso” piuttosto che di singolo “blocco di roccia”. Gli ammassi delimitati sono **16**.

2.5.1 - Analisi della stabilità dei blocchi

La disponibilità dei dati analitici relativi ai blocchi individuati ha permesso di utilizzare dei sistemi di calcolo basati sul “principio di analisi cinematica e dinamica di stabilità all’equilibrio limite” e per ogni blocco delimitato è stato eseguito uno specifico processing per valutarne la stabilità in termini di “Fattore di Sicurezza”. Dato che l’analisi delle attitudini geometriche (direzione di immersione ed inclinazione) dei piani di frattura che delimitano i blocchi e del versante è stata eseguita sia con criteri fotogrammetrici sia con misure dirette e considerando che in genere con entrambi i metodi citati i valori angolari dei piani sono suscettibili di una variazione dell’ordine di $\pm 5^\circ$, per ogni blocco individuato è stata eseguita un’analisi di stabilità considerando gli effettivi piani di frattura delimitanti, utilizzando come dati di input i valori di direzione di immersione e inclinazione variabili tra $\pm 5^\circ$ rispetto ai valori rilevati.

Per quanto attiene alla stima del Fattore di Sicurezza il calcolo è stato eseguito in modalità dinamica considerando sia le condizioni anidre statiche sia una percentuale di acqua all’interno delle fratture ed un valore di accelerazione del suolo come desumibile dalla classificazione del territorio in esame in base alla zonazione sismica ad esso associata (Classe 3 pari ad un coefficiente sismico variabile tra 0,05-0,15) (Fig.20). L’analisi completa dei Fattori di Sicurezza calcolati e delle classificazioni strutturali dei piani di fratti ragione è stato riportato in Allegato 5: **PROBABILITA' DI CEDIMENTO DEI BLOCCHI INDIVIDUATI** ed in Allegato 6: **UBICAZIONE E CLASSIFICAZIONE SECONDO CRITERI STRUTTURALI DEI PIANI EFFETTIVI DI FRATTURAZIONE INDIVIDUATI SULLA FALESIA DI GROTTA DELLE FELCI**).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
4	ID BLOCCO	EVIDENZA	QUOTA STR	AREA	VOLUME	PROBABILITA'	% SATURAZIONE	ID FRATTURA	RESTITUZIONE	POSIZIONE	IMMERSIONE	INCLINAZIONE	SISTEMA	Fratture		Blocchi			
5	1	evidente	314,23	305,73	37,97	13,15	molto probabile	0	4	e	r	131	69	K1b	Legenda Restituzione e = effettiva i = interpretata	Legenda Posizione t = tetto b = base r = retro d = destra s = sinistra	Blocchi		
6								5	i	d	43	64	K3a	Ammassi					
7	2	evidente	275,39	266,89	6,84	0,88	molto probabile	20	6	e	r	112	84	K1b	%SATURAZIONE				
8								7	i	b	80	32	altro	per ottenere un FS < 1,3					
9	3	olto evidenti	151,67	143,17	6,73	1,06	molto probabile	0	8	e	d	174	79	K4a	coefficiente sismico = 0,15				
10								9	e	r	114	63	K7						
11								10	i	s	48	81	K3a						
12	4	olto evidenti	169,18	160,68	4,75	0,41	molto probabile	0	11	i	b	109	64	K7					
13								12	e	r	107	86	K1b						
14								13	i	s	39	87	altro						
15	5	olto evidenti	215,64	207,14	152,01	95,65	molto probabile	50	14	e	t	235	20	altro					
16								15	e	b	31	20	altro						
17								16	e	r	285	84	K1a						
18	6	olto evidenti	174,48	165,98	192,91	89,76		1	i	r	101	85	K1b						
19								2	i	b	170	75	altro						
20								3	e	d	193	75	K4a						
21	8	occo evidenti	210,28	201,78	239,41	190,72		20	e	r	101	87	K1b						
22								21	e	b	71	27	altro						
23	9	olto evidenti	196,76	188,26	48,16	20,01		22	e	r	84	84	K2b						
24								23	e	b	134	20	K6						
25	10	evidente	259,97	251,47	191,58	129,93		24	e	r	263	62	K2a						
26								25	i	b	111	43	altro						
27								26	e	t	338	17	altro						
28	11	olto evidenti	189,96	181,46	92,42	55,71	molto probabile	0	27	e	d	168	64	altro					
29								28	e	r	280	83	K1a						
30								29	i	b	96	35	altro						
31	12	evidente	179,34	170,84	5,21	0,55	probabile	80	30	i	s	56	74	altro					
32								31	e	r	131	80	K1b						
33								32	i	s	234	80	altro						
34	13	occo evidenti	177,64	169,14	0,62	0,02	probabile	80	33	i	b	55	50	altro					
35								34	e	r	111	88	K1b						
36	14	olto evidenti	174,63	166,13	5,35	0,48	molto probabile	0	35	i	b	73	49	altro					
37								36	e	r	88	75	K2b						
38	16	occo evidenti	169,12	160,62	13,54	2,45	molto probabile	0	38	i	b	66	45	altro					
39								39	i	r	255	61	altro						
40	17	olto evidenti	169,57	161,07	25,31	7,39	molto probabile	0	40	i	d	207	62	altro					
41								41	e	r	109	59	K7						
42	18	olto evidenti	169,26	160,76	6,71	1,04	probabile	50	42	i	s	207	62	altro					
43								43	i	b	109	38	altro						
44	19	evidente	174,64	166,14	25,69	7,71	molto probabile	0	44	e	b	139	39	K6					
45								45	i	d	182	72	K4a						
46	20	occo evidenti	174,70	166,20	12,53	2,64	probabile	50	46	i	b	55	46	altro					
47								47	e	r	304	84	K1a						
48								48	e	s	48	63	K3a						
49	21	evidente	169,23	160,73	10,36	2,17	probabile	80	49	e	r	109	75	K1b					
50								53	i	d	39	87	altro						
51								54	i	b	175	27	altro						
52								50	e	s	28	76	K3a						

Fig.19 – Esempio della tabella riportata in Allegato 7 relativa ai dati geometrici di tutti i blocchi e ammassi rocciosi

Pur disponendo di dati deterministici relativi ai versanti ed ai blocchi in essi presenti, l'utilizzo del Fattore di Sicurezza nella valutazione della stabilità dei versanti in roccia rimane un elemento critico a causa della incertezza di altri parametri geomeccanici desumibili solo con onerose prove in situ o, nella pratica, ricavati in maniera empirica. Infatti, se da un punto di vista geometrico questo lavoro ha portato a risultati difficilmente ottenibili con tecniche alternative in quanto a precisione e numero, rimane limitata al rilievo geomeccanico in situ e ai dati di letteratura la scelta di parametri altrettanto importanti nell'analisi della stabilità quali il peso di volume del materiale, l'angolo di attrito lungo le superfici di discontinuità e la coesione del materiale di riempimento delle fratture delimitanti i blocchi.

Nell'analisi dinamica, come detto, si è tenuto conto anche dell'accelerazione sismica (sulla base del coefficiente sismico locale), anche se tale parametro è in assoluto di difficile determinazione, e della variabilità percentuale di saturazione di acqua nelle fratture. Da ciò si evince come sia sufficiente una modesta variazione di uno o più di tali parametri per portare ad un abbassamento anche significativo del Fattore di Sicurezza.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	N Blocco	Tipo Scorrimento	% H2O nelle fratture	FS Medio	FS Min	FS Max	FS Medio (SC=0,05)	Min (SC=0,05)	Max (SC=0,05)	Medio (SC=0,15)	min (SC=0,15)	max (SC=0,15)		%saturazione per FS<1.3 senza sisma	%saturazione per FS<1.3 con CS=0.15
2	1	Cuneo (cov4-5)	0	2,12	1,48	3,10	2,00	1,40	3	1,8	1,26	2,8			0
3			20	2,00	1,40	3,00	1,95	1,35	2,9	1,76	1,21	2,7			
4			50	1,90	1,10	2,80	1,80	1,00	2,8	1,6	0,8	2,6		50	
5	2	Piano (cov9)	0	2,49	1,85	3,00	2,27	1,68	2,75	1,92	1,42	2,28			
6			20	2,36	1,70	2,90	2,15	1,56	2,82	1,82	1,32	2,17			20
7			50	2,00	1,40	2,53	1,87	1,30	2,3	1,6	1,1	1,97			
8			80	1,56	1,00	2,00	1,45	0,94	1,86	1,26	0,81	1,6		80	
9			100	1,26	0,76	1,67	1,18	0,70	1,56	1	0,6	1,37			
10	3	Piano (cov9)	0	2,57	1,50	4,01	2,47	2,43	3,9	2,3	1,29	3,72			0
11			20	2,52	1,45	4,00	2,43	1,39	3,92	2,25	1,25	3,69			
12			50	2,40	1,30	2,93	2,30	1,24	3,8	2,14	1,12	3,5		50	
13	4	Piano (cov11)	0	2,25	1,21	3,43	2,16	1,15	3,32	1,99	1,03	3,11		0	0
14			20	2,23	1,19	3,40	2,14	1,13	3,3	1,97	1,00	3,10			
15			50	2,14	1,07	3,30	2,05	1,00	3,2	1,90	0,90	3,00			
16			80	1,92	0,80	3,13	1,70	0,60	2,83	0,50	0,00	2,00			
17	5	Piano (cov14)	0	2,67	2,08	3,56	2,30	1,85	2,98	1,8	1,49	2,22			
18			20	2,47	1,93	3,28	2,14	1,71	2,7	1,67	1,38	2,05			
19			50	2,18	1,72	2,82	1,90	1,53	2,4	1,5	1,25	1,84			50
20			80	1,75	1,40	2,22	1,56	1,26	1,94	1,27	1,05	1,54			
21			100	1,47	1,18	1,84	1,33	1,07	1,64	1,11	0,9	1,34		100	
22	11	Piano (cov27)	0	1,22	1,10	1,44	1,15	1,03	1,37	1,03	0,91	1,25		0	0
23			20	1,18	1,06	1,40	1,12	1,00	1,34	1	0,89	1,22			
24			50	1,12	1,00	1,32	1,06	0,95	1,26	0,95	0,84	1,14			
25	12	Piano (cov29)	0	2,49	2,11	2,89	2,28	1,93	2,63	1,95	1,65	2,22			
26			20	2,39	2,01	2,78	2,20	1,85	2,53	1,88	1,57	2,14			
27			50	2,28	1,87	2,64	2,10	1,71	2,04	1,79	1,46	2,03			
28			80	2,00	1,60	2,30	1,85	1,48	2,12	1,6	1,27	1,85			80
29			100	1,78	1,40	2,06	1,65	1,30	1,91	1,44	1,12	1,67		s	
30	13	Piano (cov33)	0	2,59	1,66	3,28	2,45	1,57	3,1	2,2	1,38	2,8			
31			20	2,52	1,59	3,21	2,39	1,50	3,05	2,1	1,32	2,75			

Fig.20 –Esempio della tabella riportata in Allegato 8 relativa ai Fattori di Sicurezza calcolati per tutti i blocchi

Dato che gli eventi di caduta dei blocchi nella falesia in questione si sono verificati in connessione con intensi eventi meteorici, si è cercato di valutare il comportamento generale del Fattore di Sicurezza tramite un approccio di tipo *back analysis*. Dati i sistemi di calcolo numerico adottati, per ogni blocco si è imposto un fattore di sicurezza prossimo (appena inferiore) al limite di legge (secondo il D.M. 11.03.1988 appare opportuno applicare per le verifiche un Fattore di Sicurezza $F_s=1.3$) e l'accelerazione sismica competente territorialmente all'area in esame (Classe 3 - P.C.M.n.3274-20/03/2003; coefficiente sismico variabile tra 0,05-0,15) e conseguentemente si è calcolato, per ogni singolo blocco, la percentuale di saturazione in acqua delle fratture che porterebbe il F_s a valori inferiori alla soglia critica (saturazione critica). In questo senso occorre precisare che per il 45% dei blocchi il F_s scende al di sotto della soglia critica già in condizioni anidre (0% di saturazione), poiché le condizioni geo-meccaniche e giaciture, insieme agli effetti sismici, sono di per se sufficienti a indurre le condizioni di instabilità.

Una volta eseguito il calcolo delle percentuali di saturazione critica si può ottenere il volume di acqua che è teoricamente necessario per indurre le condizioni di criticità ipotizzate nei blocchi individuati. Il calcolo del volume è stato effettuato utilizzando una correlazione statistica tra gli elementi planimetrici (faglie, fratture, etc), rilevati tramite l'analisi fotogrammetrica, ed i dati rilevati lungo gli stendimenti del rilievo geomeccanico, tra i quali risulta essere presente l'apertura delle fratture, mediamente dell'ordine di 5mm, e la loro persistenza in profondità che non scende quasi mai sotto il metro. Con quest'ultimo dato si arriva a determinare un volume di vuoti

dell'ordine di c.a.10 m³ complessivi distribuiti su tutte le fratture presenti sulla superficie analizzata.

Per valutare se le precipitazioni possono fornire un quantitativo di acqua sufficiente a saturare tale volume, si deve effettuare, anche in via qualitativa, una stima dell'infiltrazione efficace in relazione ad un evento piovoso paragonabile a quelli massimi riportati negli annali idrologici e dell'ordine di quello dell'evento franoso del dicembre 2007 (46 mm/d); per tale bilancio deve essere inoltre considerata l'area di un bacino versante strettamente pertinente alla falesia di studio e il volume totale della fratture all'interno di tutto il corpo roccioso della falesia.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	POLI							PIANI					
2	SISTEMI	MIN		MAX		MASSIMO ADDENSAMENTO		MIN		MAX		MASSIMO ADDENSAMENTO	
3		IMM	INCL	IMM	INCL	IMM	INCL	IMM	INCL	IMM	INCL	IMM	INCL
4	K1a	94	24	162	0	296	6	274	66	342	90	116	84
5	K1b	274	24	342	0	296	6	94	66	162	90	116	84
6	K2b	257	27	270	0	270	20	77	63	90	90	90	70
7	K2a	77	14	90	0	84	12	257	76	270	90	264	78
8	K3a	196	34	232	5	220	87	16	56	52	85	40	3
9	K4a	353	26	30	0	20	12	173	64	210	90	200	78
10	K4b	181	11	210	0	20	12	1	79	30	90	200	78
11	K4b	173	11	180	0	185	3	353	79	360	90	5	87
12	K6	300	74	345	28	313	47	120	16	165	62	133	43
13	K5	227	87	360	70	300	80	47	3	180	20	120	10
14	K5	0	87	13	70	300	80	180	3	193	20	120	10
15	S0	125	58	155	48	140	53	305	32	335	42	320	37
16	K7	280	40	300	20	290	30	100	50	120	70	110	60

Fig.21 –Esempio della tabella riportata in Allegato 9 relativa ai sistemi di fratture rilevati e loro classificazione

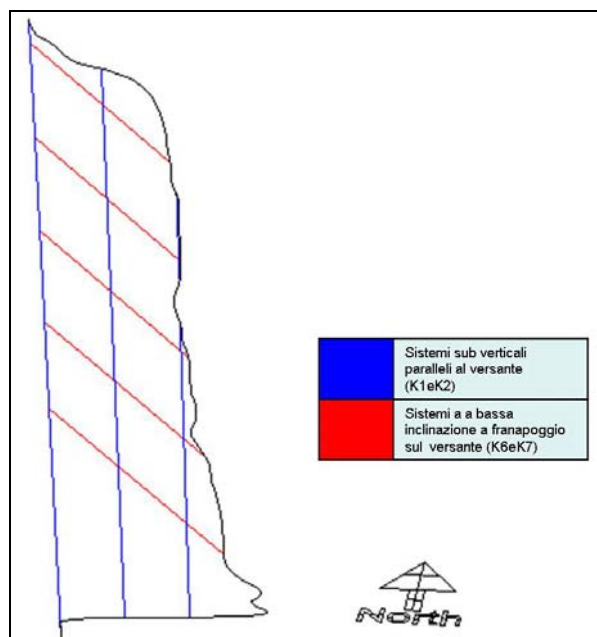


Fig.22-Proiezione schematica su una sezione W-E delle principali famiglie di fratture

Per quanto attiene alla stima dell'infiltrazione sulla base della piovosità sopra indicata, considerando la morfologia delle immediate vicinanze della sommità della parete, ove ragionevolmente per criteri morfologici si può ritenere che l'acqua precipitata si infiltre nel corpo roccioso della falesia, si può considerare una superficie di bacino versante di c.a. 5ha; conseguentemente, ipotizzando un deflusso fisiografico del 60%, ottenuto dalla stima della permeabilità locale, dell'acclività e delle coperture vegetale, si ottengono valori di infiltrazioni pari a 1200 m³/g. Dal confronto tra questo ultimo valore e la quantità di acqua necessaria a raggiungere la saturazione critica nei blocchi individuati (dell'ordine di 10 m³), si evince come lo scenario del raggiungimento della saturazione critica possa considerarsi del tutto plausibile. Occorre inoltre considerare come il livello di permeabilità complessiva del rilievo carbonatico oggetto dello studio sia molto elevato, dati anche gli evidenti fenomeni carsici che si presentano nella falesia studiata. Conseguentemente, per il raggiungimento delle suddette condizioni critiche, non devono essere considerati soltanto i volumi di acqua infiltrabili ma soprattutto la concentrazione delle precipitazioni in brevi intervalli di tempo. Come è noto nei sistemi carbonatici fortemente permeabili per fratturazione e carsismo, il raggiungimento di condizioni critiche per la stabilità degli ammassi e dei blocchi (es. eventi alluvionali delle Alpi Apuane meridionali nel 1996 e nell'area di Sarno nel 1998) viene raggiunto quando le precipitazioni sono particolarmente concentrate; in questo caso la pur elevata permeabilità del mezzo roccioso non è sufficiente a drenare l'acqua in eccesso e il raggiungimento delle saturazioni critiche viene raggiunto più facilmente.

Nel caso in esame non sono disponibili dati sulla concentrazione oraria delle precipitazioni, ma in coincidenza con gli eventi di frana del dicembre 2007, sono stati registrati in prossimità dell'area di studio (pluviometro di Napoli Ovest) picchi orari di piovosità oltre di 70 mm/h, (Prof. Ing. G. Cannata com. pers.); si tratta, quindi, di valori di precipitazioni orarie che, alla luce delle dettagliate analisi geostrukturali eseguite, possono spiegare gli eventi franosi.

Nel caso in esame un ulteriore elemento da considerare per la valutazione dell'influenza della fratturazione sulla circolazione idrogeologica e sulla possibilità di raggiungimento delle condizioni critiche, è rappresentato dalla direzione delle fratture che principalmente interessano la zona studiata, inclinate verso la falesia (sistemi K6,K7 in Fig.20 e Fig.21), oppure sub-parallele al versante con inclinazioni circa verticali (sistemi K1,K2 in Fig.22 e Fig.23); Allegato 6: UBICAZIONE E CLASSIFICAZIONE SECONDO CRITERI STRUTTURALI DEI PIANI EFFETTIVI DI FRATTURAZIONE INDIVIDUATI SULLA FALESIA DI GROTTA DELLE FELCI).

Con tali condizioni giaciture della fratturazione la circolazione idrica del sottosuolo risulta fortemente orientata verso la falesia.

In sintesi, il risultato della back analysis impostata su un Fs critico per tutti i blocchi individuati (saturazione e coefficiente sismico inclusi) conferma che un evento meteorico confrontabile con quelli presenti negli annali idrologici, o del Dicembre 2007, può essere sufficiente a permeare e saturare le fratture e determinare l'instabilità dei volumi di roccia presenti sulla falesia. Occorre infine considerare che nel Fs non sono state considerate ulteriori cause "peggiorative" delle condizioni di stabilità quali la presenza della copertura vegetale (assai diffusa sulla falesia, anche con alberi di rilevanti dimensioni) che in certi casi può fungere da elemento di innesco di fenomeni di instabilità.

Ai fini di definire delle priorità di intervento sono stati calcolati i Fs dei blocchi individuati in diverse condizioni di saturazione delle fratture delimitanti, in assenza di effetti sismici e con gli effetti sismici che caratterizzano l'area studiata. L'elenco delle caratteristiche geometriche delle

fratture è riportato in Allegato 10: DATI RELATIVI A TUTTE LE FRATTURE NON DELIMITANTI BLOCCHI RILEVATE E LORO CLASSIFICAZIONE.

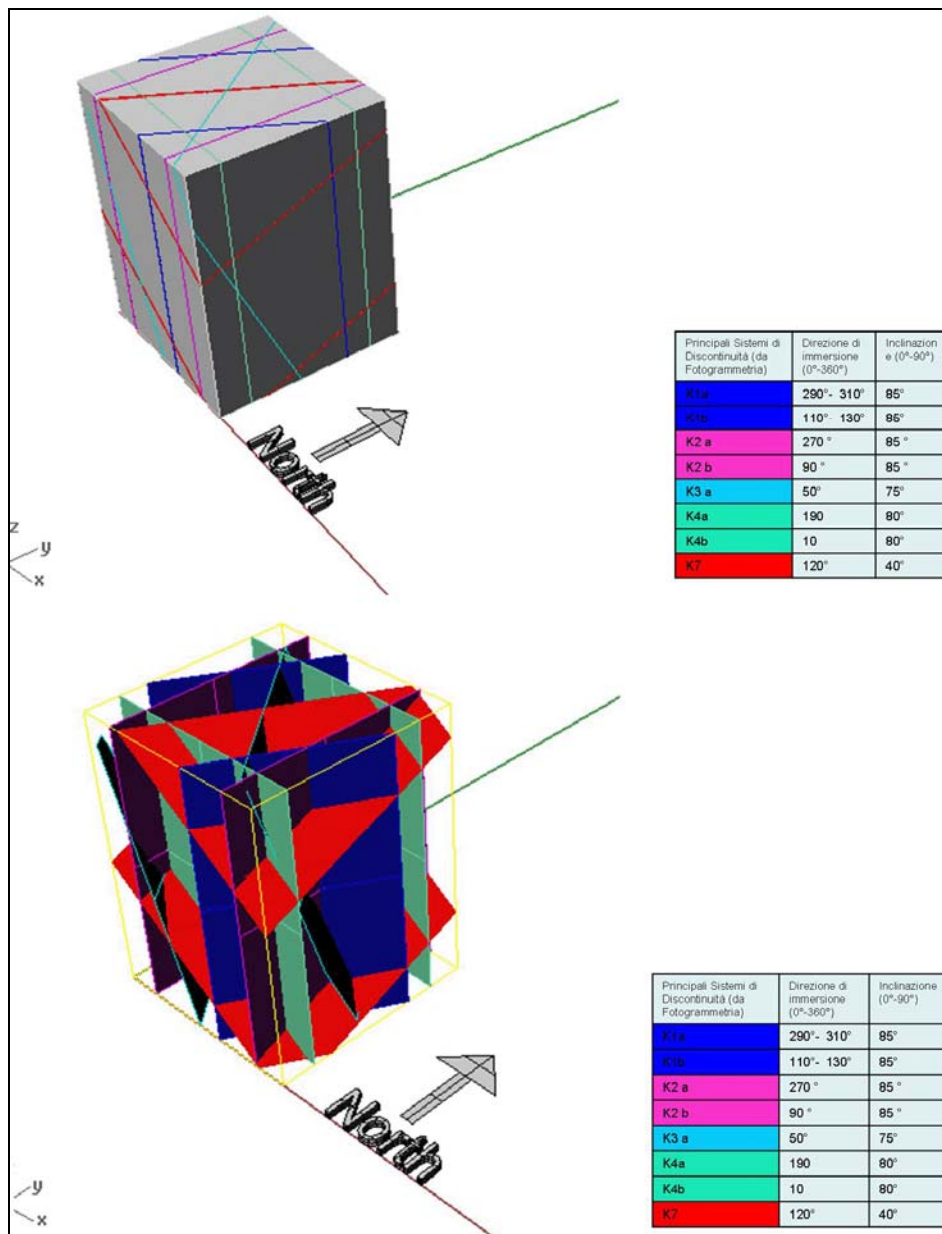


Fig.23- Modellizzazione delle principali famiglie di fratture

2.6: Individuazione delle soluzioni tecniche per la mitigazione del rischio

Una tabella sinottica (Fig.24) che riassume tali calcolo è di seguito fornita, ove sono riportate le percentuali di blocchi che al variare delle condizioni di saturazione e sismiche raggiungono la soglia critica del F_s .

% saturazione	sisma assente (%)	sc 0.15 (%)
0	23.12	45.09
20	10.40	54.34
50	18.50	71.68
80	23.70	84.39
100	11.56	93.06
Stabili	12.72	6.94

Fig. 24: Tabella riassuntiva delle % dei blocchi che assumono F_s inferiori a 1,3 al variare dei parametri di saturazione % in acqua delle fratture delimitanti tali blocchi e della presenza del sisma (coefficiente sismico)

2.6.1- Opere di bonifica e difesa

Il quadro presentato in precedenza mette in evidenza condizioni di stabilità precarie interessanti numerosi blocchi presenti in parete. Tenuto conto dello stato dell'arte relativo alle opere di bonifica e consolidamento, si è delineata in prima approssimazione una griglia di interventi.

La parete rocciosa in esame si eleva per un'altezza talvolta superiore ai 200,0 m rendendo particolarmente sfavorevole l'esclusiva esecuzione delle opere di bonifica e consolidamento con un approccio basato su lavorazioni gestite da personale alpinistico senza l'ausilio di ponteggi di servizio. Si prevede pertanto, per la porzione medio-basale, l'elevazione di un ponteggio al fine di garantire sia la diretta esecuzione degli interventi che, con tempistica differita, una sicura base di appoggio per gli operatori impegnati nelle sovrastanti lavorazioni in verticale nel settore sommitale e medio-sommitale. Tale soluzione, inoltre, consente l'esecuzione degli ancoraggi previsti alle quote inferiori, dunque più visibili, con accorgimenti tali da mascherare la piastra rendendola invisibile in parete.

Gli elementi litoidi instabili da noi individuati saranno consolidati mediante ancoraggi e chiodature, mentre le porzioni di parete caratterizzate dalla presenza di materiale detritico verranno stabilizzate con reti o pannelli di funi metalliche.

Si provvederà, inoltre, alla sottomurazione di massi in precarie condizioni di stabilità e alla formazione di murature atte a ricostruire la continuità meccanica dell'ammasso roccioso.

La porzione sommitale della falesia dovrà essere attrezzata con barriere paramassi tali da intercettare elementi litoidi provenienti dal versante sovrastante. Per minimizzare l'impatto visivo determinato dalle barriere, queste verranno collocate in posizione più arretrata rispetto al ciglio della scarpata in modo da localizzarsi tra la vegetazione di mascheramento, eliminando in tal modo l'impatto visivo sul crinale.

La fascia interposta tra le barriere ed il ciglio della parete rocciosa verrà consolidata con reti metalliche poste in aderenza al suolo.

L'intervento è essenziale per la riduzione del rischio, ma deve essere coniugato con una attività di monitoraggio (vedi punto 2.6.3, successivo) che si svolga prima degli interventi, durante la realizzazione degli stessi e dopo, per valutarne l'efficacia.

A tale proposito la strumentazione meccanica più consona per la tipologia di dissesti trattata è rappresentata dagli estensimetri. Trattasi di particolari trasduttori di spostamento lineare che permettono di misurare la distanza tra due punti anche piuttosto lontani tra di loro. Grazie ad un encoder e un dinamometro è possibile mantenere in tensione un filo in acciaio inox o Invar e nello

stesso tempo determinarne l'allungamento o l'accorciamento. Lo strumento normalmente è gestito da un sistema automatico capace di registrare le variazioni nel tempo ed i dati ottenuti potranno essere gestiti all'interno di monitoraggio.

Si prevede di distribuirne n. 15 in parete.

Il costo di un estensimetro è di € 700,00 + I.V.A. Il montaggio in parete di ogni estensimetro richiede n. 7 ore di un rocciatore per un costo totale di € 300,00.

Sulla base di quanto esposto, ai fini della mitigazione del rischio da frana di crollo per la Falesia di Grotta delle Felci si suggeriscono le seguenti attività (i costi riportati sono indicativi e devono necessariamente essere valutati previa specifica progettazione e relativa analisi dei costi).

1. Esecuzione di una bonifica del versante tramite rocciatori con disaggio degli elementi minori (previa messa in sicurezza degli elementi sensibili (manufatti, infrastrutture etc) posti al piede della scarpata) e posizionamento dei prismi, estensimetri e altri strumenti essenziali per il monitoraggio. Il costo indicativo di questa attività, suddiviso per le diverse aree della falesia, è riportato nel successivo elenco
2. Messa in opera di una rete di monitoraggio. Le caratteristiche generali di questa rete sono descritte al punto 6.2.. Il costo indicativo di questa attività (monitoraggio topografico) è stimabile attorno ai 70.000 euro escluse la messa in opera dei prismi (che sono includibili nella attività di cui al punto precedente), il costo degli estensimetri (c.a. 1000 euro/cad in opera) e la costruzione delle infrastrutture (cabina di registrazione, fornitura di impianti elettrici, rete telematica etc). Per un monitoraggio basato su tecnologie interferometriche i costi devono esser stimati, ma sulla base di interventi analoghi si stima un costo annuo, fornito in attività di service e noleggio che per il primo anno
3. Progettazione e realizzazione delle opere di messa in sicurezza sulla base dell'elenco di seguito riportato:

2.6.2 - Tipologia e computo delle opere di progetto (Fig.25)

N.B.: L'esatta ubicazione e quantificazione degli interventi sarà possibile solo una volta acquisite le risultanze del monitoraggio ed eseguiti: il diserbamento, la pulizia, l'ispezione in parete, i ponteggi di servizio e i rilievi di dettaglio in parete.

PORZIONE SOMMITALE DELLA FALESIA

Perlustrazione e bonifica della parete e dei pianori mediante l'asportazione di piccoli massi o blocchi instabili, il taglio di alberi, di arbusti e ceppaie e la rimozione della coltre detritica mediante personale specializzato in lavori in parete.

375,0 m x 30,0 m = 11.250,0 mq = x 8,00 Euro / mq = 90.000,00 Euro

Fornitura e posa in opera, a mezzo di elitransporto, di barriera paramassi ad alto assorbimento energetico certificato a 1000 KJ, per un'altezza di intercettazione di 3,0 / 4,0 m ed interasse dei montanti non superiore a 5,0 m

300,0 m x 4,00 m = 1.200,0 mq x 385,00 Euro / mq = 462.400,00 Euro

Rivestimento di parete rocciosa mediante la posa in opera di reti metalliche zincate in filo ricotto del diametro di 3 mm a maglia esagonale 80 x 100 mm, in pannelli della larghezza di 3 ml rinforzati verticalmente, lungo le giunzioni, con funi metalliche $\phi 12$ mm, con anelli metallici di giunzione ogni 50 cm e con ancoraggi intermedi di contenimento in acciaio zincato $\phi 20$ mm L = 100 cm con frequenza non inferiore a uno ogni 9,0 mq di rete. Fissaggio delle reti in sommita' e al piede a mezzo di funi in acciaio $\phi 16$ mm ancorate in parete con chiodature in acciaio zincato $\phi 20$ mm L = 150 cm e interasse 1,50 ml e irrigidite mediante funi $\phi 12$ mm poste secondo le diagonali di un quadrato di lato 3 x 3 ml. Lavoro da eseguirsi con rocciatori e con l'ausilio di elitransporto.

375,0 m x 25,0 m = 9.375,0 mq x 39,50 Euro / mq =

370.312,50 Euro

PORZIONE MEDIO - SOMMITALE DELLA FALESIA

Perlustrazione e bonifica della parete e dei pianori mediante l'asportazione di piccoli massi o blocchi instabili, il taglio di alberi, di arbusti e ceppaie e la rimozione della coltre detritica mediante personale specializzato in lavori in parete.

250,0 m x (150,0 m + 50,0 m)/2 = 25.000,0 mq = x 8,00 Euro / mq=

200.000,00 Euro

Esecuzione, mediante personale specializzato in lavori in parete, di ancoraggi passivi della lunghezza di 15,00 ml costituiti da barre in acciaio dywidag del diametro di 26,5 mm introdotte all'interno di perforazioni a distruzione di nucleo 85-145 mm iniettate con boiaccia cementizia antiritiro. Le barre saranno protette con una guaina in pvc corrugata ed iniettando a terra l'intercapedine tra barra e guaina con boiaccia cementizia, giuntate tra di loro con speciali manicotti a doppia protezione e dotate di piastra e bullone di testa.

200,0 n. x 15,0 m = 3.000,0 m x 115,50 Euro / m =

346.500,00 Euro

Esecuzione, mediante personale specializzato in lavori in parete, di chiodature della lunghezza media di 6,00 m costituite da barre in acciaio $\phi 24$ mm introdotte all'interno di perforazioni $\phi 50-80$ mm iniettate con boiaccia cementizia antiritiro.

400,0 n. x 6,00 m = 2.400,0 m x 67,50 Euro / m =

162.000,00 Euro

Fornitura e posa in opera di pannelli metallici in fune 8/12 con maglia 250 x 250 mm rinforzata ad ogni incrocio da semigusci galvanizzati comprendenti chiusi a pressione. Ogni pannello delle dimensioni di 3,00 x 3,00 m è fornito di fune di bordo perimetrale in acciaio zincato diam.12 mm fissata alla rete tramite manicotti chiusi a pressione. I pannelli vengono posati in aderenza alla parete ed ancorati alla stessa agli angoli e nella parte centrale (maglia 3,00 x 3,00 m), mediante legatura ad ancoraggi in barre FeB44K diam. 24 mm, lunghezza 3,00 m dotate di golfari passafune in acciaio zincato M24. I pannelli contigui vengono cuciti fra loro mediante fune in acciaio zincata del diametro uguale alla fune di orditura della rete, passata lungo il perimetro dei pannelli, all'interno dei golfari e chiusa con idonea morsetteria. Per evitare la caduta di piccoli sassi o altro materiale attraverso le maglie dei pannelli, è prevista la posa, sotto gli stessi, di una rete zincata a doppia torsione tipo "Maccaferri" cm.8 x 10 con filo diam. 2,7mm. Lavoro eseguito a qualsiasi altezza e con qualsiasi inclinazione da parte di personale altamente specializzato (rocciatori).

600,00 mq = x 90,00 Euro / mq =

54.000,00 Euro

Rivestimento di parete rocciosa mediante la posa in opera di reti metalliche zincate in filo ricotto del diametro di 3 mm a maglia esagonale 80 x 100 mm, in pannelli della larghezza di 3 ml rinforzati verticalmente, lungo le giunzioni, con funi metalliche ϕ 12 mm, con anelli metallici di giunzione ogni 50 cm e con ancoraggi intermedi di contenimento in acciaio zincato 20 mm L = 100 cm con frequenza non inferiore a uno ogni 9,0 mq di rete. Fissaggio delle reti in sommità e al piede a mezzo di funi in acciaio ϕ 16 mm ancorate in parete con chiodature in acciaio zincato ϕ 20 mm L = 150 cm e interasse 1,50 ml e irrigidite mediante funi ϕ 12 mm poste secondo le diagonali di un quadrato di lato 3 x 3 ml. Lavoro da eseguirsi con rocciatori e con l'ausilio di elitransporto.

6.250,0 mq x 39,50 Euro / mq =

246.875,00 Euro

PORZIONE MEDIO - BASALE DELLA FALESIA

Perlustrazione e bonifica della parete e dei pianori mediante l'asportazione di piccoli massi o blocchi instabili, il taglio di alberi, di arbusti e ceppaie e la rimozione della coltre detritica mediante personalòe specializzato in lavori in parete.

18.000,0 mq = x 8,00 Euro / mq =

144.000,00 Euro

Montaggio di ponteggi metallici in elevazione costituiti da struttura tubolare in acciaio r = 52 tipo dalmine della profondità minima di 3,60 ml per i piani di lavoro, conformi alle previsioni di carico e alla normativa vigente

18.000,0 mq = x 55,00 Euro / mq = 990.000,00 Euro

Esecuzione di ancoraggi passivi della lunghezza di 18,00 ml costituiti da barre in acciaio dywidag del diametro di 26,5 mm introdotte all'interno di perforazioni a distruzione di nucleo ϕ 85-145 mm iniettate con boiaccia cementizia antiritiro. Le barre saranno protette con una guaina in pvc corrugata ed iniettando a terra l'intercapedine tra barra e guaina con boiaccia cementizia, giuntate tra di loro con speciali manicotti a doppia protezione e dotate di piastra e bullone di testa.

75,0 n. x 20,0 m = 1.500,0 m x 98,00 Euro / m = 147.000,00 Euro
75,0 n. x 15,0 m = 1.125,0 m x 98,00 Euro / m = 110.250,00 Euro

Esecuzione di nicchie per l'alloggio delle teste degli ancoraggi con chiusura con tassello in roccia.

150,0 n. = x 150,00 Euro / m = 22.500,00 Euro

Esecuzione di chiodature della lunghezza media di 6,00 m costituite da barre in acciaio ϕ 24 mm introdotte all'interno di perforazioni ϕ 50-80 mm iniettate con boiaccia cementizia antiritiro.

400,0 n. x 6,00 m = 2.400,0 m x 57,50 Euro / m = 138.000,00 Euro

Sottomurazione di blocchi instabili mediante la realizzazione di paramento murario in muratura di scapoli di pietra e malta cementizia dello spessore minimo di 30 cm con riempimento a tergo di calcestruzzo non armato avente una $r_{ck} = 250\text{kg} / \text{cm}^2$

500,0 mc = 380,0 Euro / mc = 90.000,00 Euro

Sigillature e stilature di fessure e fratture dell'ammasso roccioso mediante malta cementizia dosata a q.li 3.00 di cemento R 325.

2.400,0 m = x 22,50 Euro / m = 54.000,00 Euro

Fornitura e posa in opera di pannelli metallici in fune 8/12 con maglia 250 x 250 mm rinforzata ad ogni incrocio da semigusci galvanizzati comprendenti chiusi a pressione. Ogni pannello delle dimensioni di 3,00 x 3,00 m è fornito di fune di bordo perimetrale in acciaio zincato

diam.12 mm fissata alla rete tramite manicotti chiusi a pressione. I pannelli vengono posati in aderenza alla parete ed ancorati alla stessa agli angoli e nella parte centrale (maglia 3,00 x 3,00 m), mediante legatura ad ancoraggi in barre FeB44K diam. 24 mm, lunghezza 3,00 m dotate di golfari passafune in acciaio zincato M24. I pannelli contigui vengono cuciti fra loro mediante fune in acciaio zincata del diametro uguale alla fune di orditura della rete, passata lungo il perimetro dei pannelli, all'interno dei golfari e chiusa con idonea morsetteria. Per evitare la caduta di piccoli sassi o altro materiale attraverso le maglie dei pannelli, è prevista la posa, sotto gli stessi, di una rete zincata a doppia torsione tipo "Maccaferri" cm.8 x 10 con filo diam. 2,7mm. Lavoro eseguito a qualsiasi altezza e con qualsiasi inclinazione da parte di personale altamente specializzato (rocciatori).

550,00 mq = x 90,00 Euro / mq =	49.500,00 Euro
QUADRO ECONOMICO	
Importo opere:	3.677.337,50 Euro
Oneri per la sicurezza:	298.190,00 Euro
Somme a disposizione dell'Amministrazione	1.474.472,50 Euro
<u>Totale generale:</u>	<u>5.450.000,00 Euro</u>
<u>(cinquemilioni-quattrocento-cinquanta-mila/00)</u>	

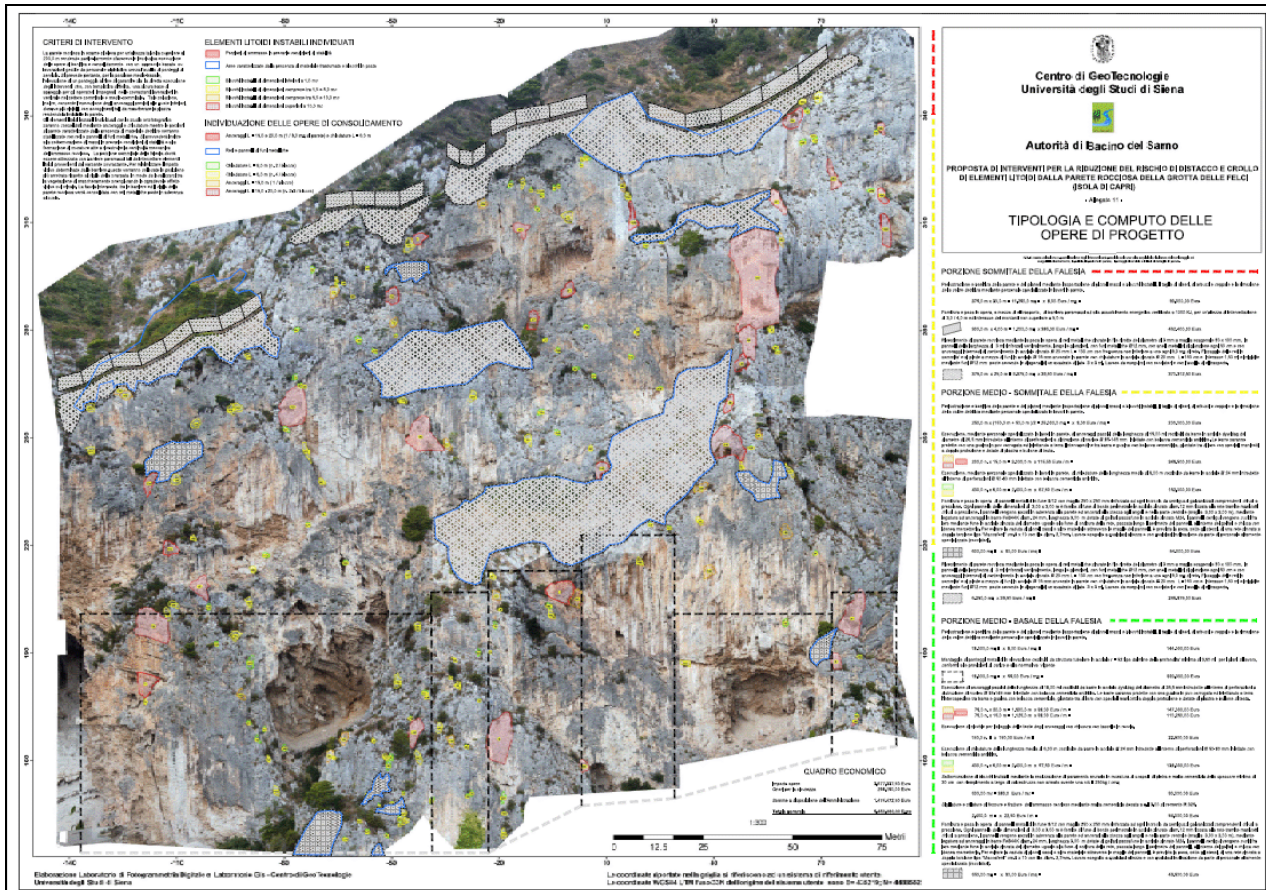


Fig.25 – Proposta di interventi per la mitigazione del rischio e loro distribuzione nell’area studiata (Allegato 11: TIPOLOGIA E COMPUTO DELLE OPERE DI PROGETTO)

2.6.3 Rete di monitoraggio

In aggiunta al quadro degli interventi suggeriti, sulla base delle priorità indicate, si propone inoltre l’installazione di un sistema di monitoraggio degli elementi instabili individuati. Il monitoraggio suggerito prevede l’installazione di un sistema di rilievo topografico automatico mediante l’allestimento di un centralina dotata di stazione totale robotizzata di altissima precisione con dispositivo automatico di collimazione. La postazione permanente della strumentazione, alimentata e collegata a PC dotato di sistema software per monitoraggio, dovrà essere collocata, in accordo con l’AdB, all’interno di un’apposita capannina protettiva da atti vandalici e da agenti atmosferici posta nella zona antistante la falesia. Sulla falesia dovranno essere installati estensimetri, fessurimetri e prismi ottici, di misura ed altri di riferimento, quest’ultimi caratterizzati da buona visibilità rispetto alla stazione totale. La collocazione ed il numero dei prismi (circa 200) verrà decisa sulla base dei risultati di questo studio. Le coordinate dei punti di riferimento verranno misurate per 2 giorni consecutivi all’inizio della sperimentazione: tutte le misure sui prismi, a partire da quel momento, saranno riferite a quelle misure.

Dovrà anche essere installato un PC di gestione sistema, collegato ad una linea telefonica dedicata per consentire la gestione da remoto. Il software permetterà, con precisioni millimetriche, la produzione di grafici real-time tempo-spostamenti utili nella valutazione dei fenomeni in atto.

D’accordo con l’AdB, al termine di un periodo di installazione, verranno stabilite le soglie da inserire via software di gestione per i valori di allerta, pre-allarme ed allarme. Le varie soglie

verranno utilizzate per l'invio automatico da parte del sistema di SMS ai cellulari degli incaricati scelti come riferimento. Sempre d'accordo con l'AdB verrà nominato un delegato amministratore del sistema di monitoraggio che, d'accordo con l'Università di Siena, sarà responsabile della gestione e manutenzione della centralina e della elaborazione dei dati. Il sistema proposto, comprensivo della sola dotazione strumentale e software, ad esclusione della edificazione della capannina, delle spese di personale e dell'intervento di sistemazione dei sensori in parete da parte di rocciatori (si propone che la messa in opera sia effettuata durante le prime fasi di attività di messa in sicurezza) presenta un costo quantificabile in circa 100.000,00 euro. Tale indicazione si intende da verificare previa presentazione di preventivi da parte delle ditte che operano nel settore. Al fine di estendere il monitoraggio alle aree non dotate di prismi, estensimetri e fessurimetri, l'intera falesia potrebbe essere monitorata attraverso un interferometro da terra basato sulla tecnologia radar ad apertura sintetica. Il sistema permette di fornire informazioni sulle deformazioni del terreno, emettendo onde radar ed analizzando l'eco riflessa dalla zona investita. Ripetendo questa procedura, tramite il movimento delle antenne su un binario lungo alcuni metri, il sistema produce un'immagine radar della zona in studio ad intervalli di tempo pre-fissati (i.e. minuti), giorno e notte ed in qualunque condizione atmosferica e di visibilità. Confrontando immagini acquisite in tempi diversi, è possibile ricostruire con precisione millimetrica la mappa degli spostamenti verificatisi in tutto l'area osservata. Utilizzando un sistema di collegamento dedicato, i dati acquisiti (decine/centinaia di immagini al giorno), devono essere trasferiti al "centro operativo" ad intervalli di tempo pre-fissati (i.e. minuti). I dati prodotti dall'interferometro devono essere successivamente elaborati ed analizzati per fornire i risultati definitivi. In questa fase potrebbe essere proposta una soluzione che prevede il noleggio/acquisto dell'interferometro da parte dell'AdB e l'elaborazione dei dati da parte del "centro operativo" composto da tecnici specializzati del Centro di Geotecnologie dell'Università di Siena. I costi relativi a questa seconda proposta dovranno essere verificati e discussi con l'AdB e con le ditte che operano nel settore. La proposta di tale sistema è intesa secondariamente al monitoraggio con stazione totale robotizzata sia per motivi economici (l'interferometria terrestre per le soluzioni di noleggio/acquisto ed interpretazione dati mediante il lavoro del "centro operativo" è molto più costosa) sia per motivi tecnici (i soli dati interferometrici senza misure topografiche o dirette in parete non sempre sono attendibili). In conclusione si ritiene quindi che la fase di monitoraggio possa avere inizio con il controllo dei movimenti dei blocchi individuati per i quali non sono stati realizzati interventi e la verifica della stabilità raggiunta dagli elementi litoidi messi in sicurezza.

ELENCO ALLEGATI

Allegato 1 : CARTA GEOLOGICA

Allegato 2: ORTOFOTOMOSAICO DELLA FALESIA DI GROTTA DELLE FELCI (ISOLA DI CAPRI)

Allegato 3: EVIDENZA FOTOGRAFICA DEI BLOCCHI E DEGLI AMMASSI ROCCIOSI INDIVIDUATI

Allegato 4: CLASSI DIMENSIONALI DEI BLOCCHI E DEGLI AMMASSI ROCCIOSI INDIVIDUATI

Allegato 5: PROBABILITA' DI CEDIMENTO DEI BLOCCHI INDIVIDUATI

Allegato 6: UBICAZIONE E CLASSIFICAZIONE SECONDO CRITERI STRUTTURALI DEI PIANI EFFETTIVI DI FRATTURAZIONE INDIVIDUATI SULLA FALESIA DI GROTTA DELLE FELCI

Allegato 7: DATI GEOMETRICI RELATIVI A TUTTI I BLOCCHI E AMMASSI ROCCIOSI.

Allegato 8: DATI RELATIVI A FATTORI DI SICUREZZA CALCOLATI PER TUTTI I BLOCCHI

Allegato 9: DATI RELATIVI AI SISTEMI DI FRATTURE RILEVATI E LORO CLASSIFICAZIONE

Allegato 10: DATI RELATIVI A TUTTE LE FRATTURE NON DELIMITANTI BLOCCHI RILEVATE E LORO CLASSIFICAZIONE

Allegato 11: TIPOLOGIA E COMPUTO DELLE OPERE DI PROGETTO