

CITTA' METROPOLITANA DI PALERMO

S.P. 37 "di Gibilrossa"

Progetto definitivo degli interventi di mitigazione del rischio geomorfologico per il tratto della SP 37 che si sviluppa lungo a galleria artificiale danneggiata dal crollo del 1° novembre 2021

PROGETTO DEFINITIVO



R1

Relazione generale

Il R.U.P.

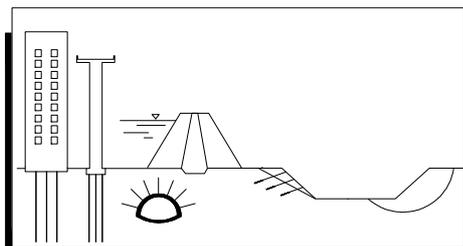
Il Progettista
Prof. Ing. Fabio Cafiso



Collaborazione
Geol. Riccardo Ferraro



REV. DICEMBRE 2022
Palermo, aprile 2022
Lav. n. 202130



PRO - GEO progettazione geotecnica

studio di ingegneria in associazione fra ingg.: Angelo Bruccheri, Fabio Cafiso, Guido Umiltà, Pietro Umiltà
Via Valdemone n. 57, 90144 Palermo - Tel. 091.519860, Fax 091.524782

INDICE

1 - PREMESSA ED OGGETTO	2
2 - INQUADRAMENTO GENERALE	3
3 - DESCRIZIONE DEI LUOGHI.....	5
4 - CONSIDERAZIONI DI CARATTERE GEOLOGICO	8
5 - POSIZIONE DEL PROBLEMA	11
6 - INDAGINI E RILIEVI ESEGUITI	15
6.1 Generalità	15
6.2 Rilievo con sistema S.A.P.R.....	15
6.3 Ispezioni in parete.....	16
6.4 Rilievo geostrutturale	16
7 - STATO DI FATTO	21
7.1 Generalità	21
7.2 Crollo del giorno 1 novembre 2021	21
7.3 Cause del crollo del giorno 1 novembre 2021	29
7.4 Condizioni di stabilità del costone lapideo in studio.....	31
7.5 Elementi lapidei in equilibrio instabile individuati nel costone lapideo.....	36
8 - INTERVENTI PREVISTI	41
8.1 Strategia generale	41
8.2 Interventi di carattere esteso	43
8.3 Interventi di carattere puntuale.....	46
8.4 Considerazioni di carattere generale	51
9 - VINCOLI GRAVANTI NELL'AREA IN STUDIO	54
10 - FATTIBILITA' AMBIENTALE	55
11 - OCCUPAZIONI TEMPORANEE.....	57
12 - CAVE E DISCARICHE	57
13 - COSTO DEGLI INTERVENTI	57
14 - TEMPI PREVISTI PER LA REALIZZAZIONE DEGLI INTERVENTI.....	57

1 - PREMESSA ED OGGETTO

In data 1 novembre 2021, dopo giorni caratterizzati da eventi meteorici parossistici con piogge di grande intensità e durata, sulla S.P. 37 "di Gibilrossa", strada provinciale che collega la città di Palermo con l'abitato di Gibilrossa e con il paese di Belmonte Mezzagno, si è verificato il crollo di un elemento lapideo di grandi dimensioni. In particolare, nel tratto investito dalla frana l'infrastruttura viaria corre all'interno di una galleria paramassi, al piede di un costone lapideo di roccia carbonatica di altezza pari a circa 115 m. Malgrado l'ingente volume del materiale crollato, che ha raggiunto l'opera di difesa passiva, la galleria complessivamente ha resistito all'impatto, ma ha riportato significativi danni strutturali ai pilastri e alla soletta di copertura. Di conseguenza, è stato necessario interdire alla pubblica fruizione il tratto della S.P. 37 interessato dal crollo, con grave disagio per i residenti di Gibilrossa e di Belmonte Mezzagno, costretti a percorsi molto più lunghi per raggiungere la città di Palermo. La Città Metropolitana di Palermo, ente proprietario della strada provinciale, ha quindi attivato le iniziative finalizzate a ripristinare il traffico nel tratto che è stato interessato dalla frana. In particolare, dal momento che gli interventi di ripristino e consolidamento della galleria paramassi danneggiata dovranno essere realizzati operando al piede del costone lapideo sorgente dei crolli, la Città Metropolitana ha ritenuto indispensabile verificare preliminarmente le condizioni di stabilità del costone lapideo e progettare gli interventi indispensabili a garantire la sicurezza delle maestranze che saranno impegnate nella riparazione della galleria artificiale. Di conseguenza ha incaricato lo scrivente di predisporre:

1. una relazione sullo stato di fatto (condizioni di stabilità del costone carbonatico incombente sulla galleria paramassi), da redigere una volta completati i rilievi topografici, mediante drone, e geostrutturali, da eseguire con metodi di progressione su corda, affidati ad altri professionisti;
2. il progetto di fattibilità tecnico-economica degli interventi di mitigazione del rischio geomorfologico per il tratto della SP 37 che si sviluppa lungo a galleria artificiale danneggiata dalla caduta massi in data 1 novembre 2021;
3. il progetto definitivo degli interventi di cui al punto precedente.

Come già evidenziato al punto 1, per sviluppare le attività professionali commissionate allo scrivente sono necessari specifici rilievi del fronte lapideo sorgente del crollo del novembre scorso, da realizzare mediante drone di ultima generazione e con ispezioni

diretta del costone lapideo, operando con metodi di progressione su corda, affidati dall'Amministrazione ad altri professionisti. Inoltre, nel disciplinare di incarico dello scrivente viene evidenziato che i citati progetti di fattibilità tecnico-economica e definitivo non riguarderanno gli interventi di ripristino della galleria paramassi danneggiata dal crollo del 1 novembre 2021 (il cui progetto è stato affidato ad altro professionista), ma gli interventi di tipo attivo di mitigazione del rischio di caduta massi, da realizzare sul fronte roccioso sorgente dei crolli.

L'iter progettuale si è sviluppato per fasi successive: dopo un sopralluogo necessario a prendere visione del problema e a pianificare i rilievi necessari ad acquisire i dati da porre a base del progetto degli interventi, sono stati effettuati il rilievo del costone lapideo sorgente dei crolli con il drone (a cura dell'ing. Antonino Barone) e le ispezioni in parete con metodi di progressione su corda, da rocciatori coordinati dal dott. Angelo Leotta. Sulla base dei risultati di tali rilievi, che sono stati forniti allo scrivente dai professionisti innanzi citati, lo scrivente ha individuato lo stato dei luoghi e redatto il progetto di fattibilità tecnico-economica sopra indicato. Tale progetto è stato approvato dalla committenza in data 4 aprile 2022 e, pertanto, è stato redatto il progetto definitivo, di cui il presente elaborato costituisce la Relazione generale.

Nel seguito, dopo un inquadramento di carattere generale sull'area in studio, si descrivono i luoghi, facendo riferimento alla documentazione fotografica raccolta in situ; si riporta, quindi, un cenno geologico e si riferisce sulle problematiche generali di stabilità dei costoni lapidei e sul relativo iter di studio, evidenziando i rilievi e le indagini eseguiti nel caso specifico. Si illustra, poi, lo stato di fatto, mettendo in risalto le gravissime condizioni di stabilità del fronte roccioso in studio, dedotte dall'elaborazione dei dati acquisiti con i citati rilievi. Nel capitolo successivo si descrivono gli interventi finalizzati a ridurre la pericolosità del costone lapideo sorgente del crollo citato e, quindi, a mitigare le condizioni di rischio per la sottostante S.P.37. In ultimo si riportano indicazioni relative ai vincoli gravanti sull'area in studio, agli espropri, all'utilizzo di cave e discariche, al costo degli interventi e ai tempi esecutivi. Infine, nel dicembre 2022, come richiesto dalla committenza con nota prot. 0087142 del 30/12/2022, il progetto è stato adeguato al Prezzario Regionale vigente.

2 - INQUADRAMENTO GENERALE

L'area in studio ricade all'interno del foglio n°595 denominato "Palermo" e nella sezione n°595100 della Carta Tecnica Regionale in scala 1:10.000 (fig. 1). Essa è

Progetto definitivo degli interventi di mitigazione del rischio geomorfologico per il tratto della SP 37 che si sviluppa lungo a galleria artificiale danneggiata dal crollo verificatosi in data 1 novembre 2021
R1 - Relazione generale

ubicata tra Monte Grifone ed il passo di Gibilrossa, a sud-ovest dell'abitato di Villabate (fig. 2).

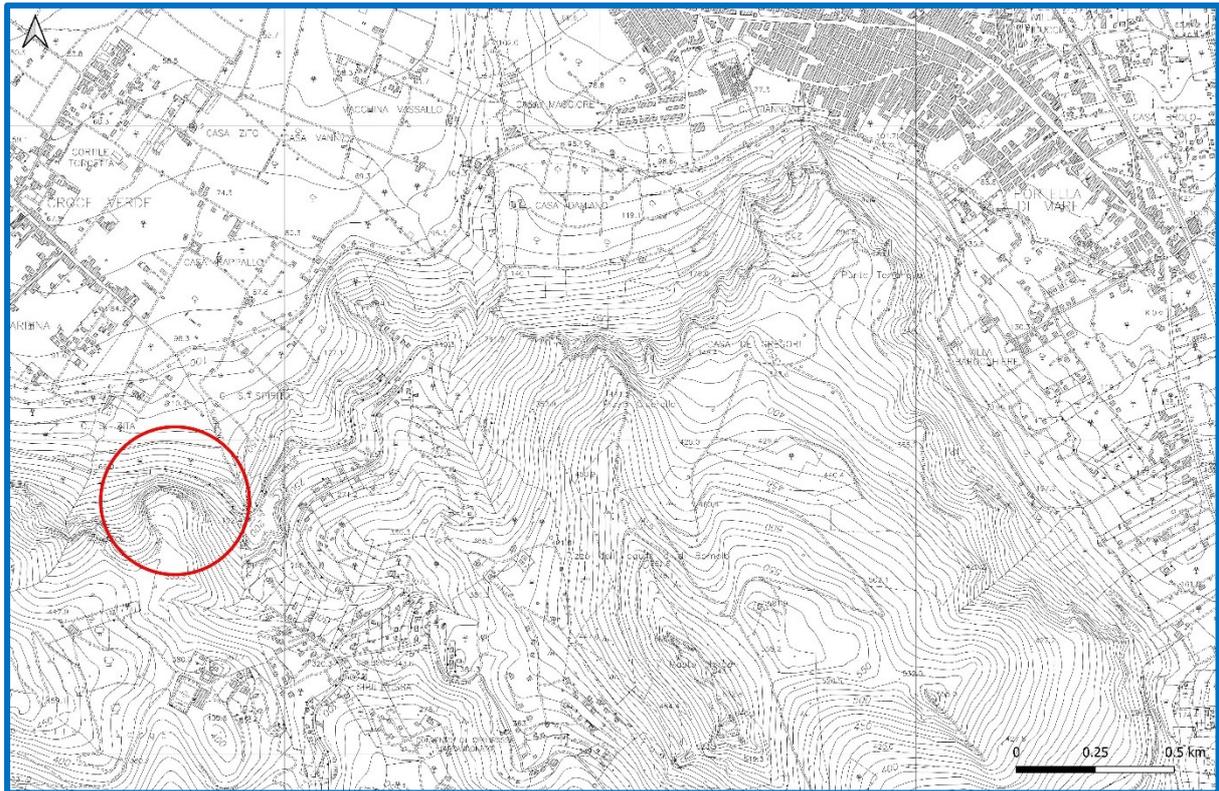


Fig. 1 - CTR n°595100 con ubicazione dell'area in studio



Fig. 2 - Foto aerea con ubicazione dell'area in studio

In particolare, l'area in studio comprende un costone lapideo, che si sviluppa orientativamente tra le quote 200 m s.l.m. e 300 m s.l.m., e la sottostante S.P. 37, che collega la città di Palermo all'abitato di Gibilrossa e al paese di Belmonte Mezzagno. Nel tratto sul quale incombe il citato costone, la strada provinciale corre all'interno di una galleria paramassi della lunghezza di circa 300 m mentre per ulteriori 70 m (lato Palermo) è priva di protezione dal crollo di blocchi (fig. 3)

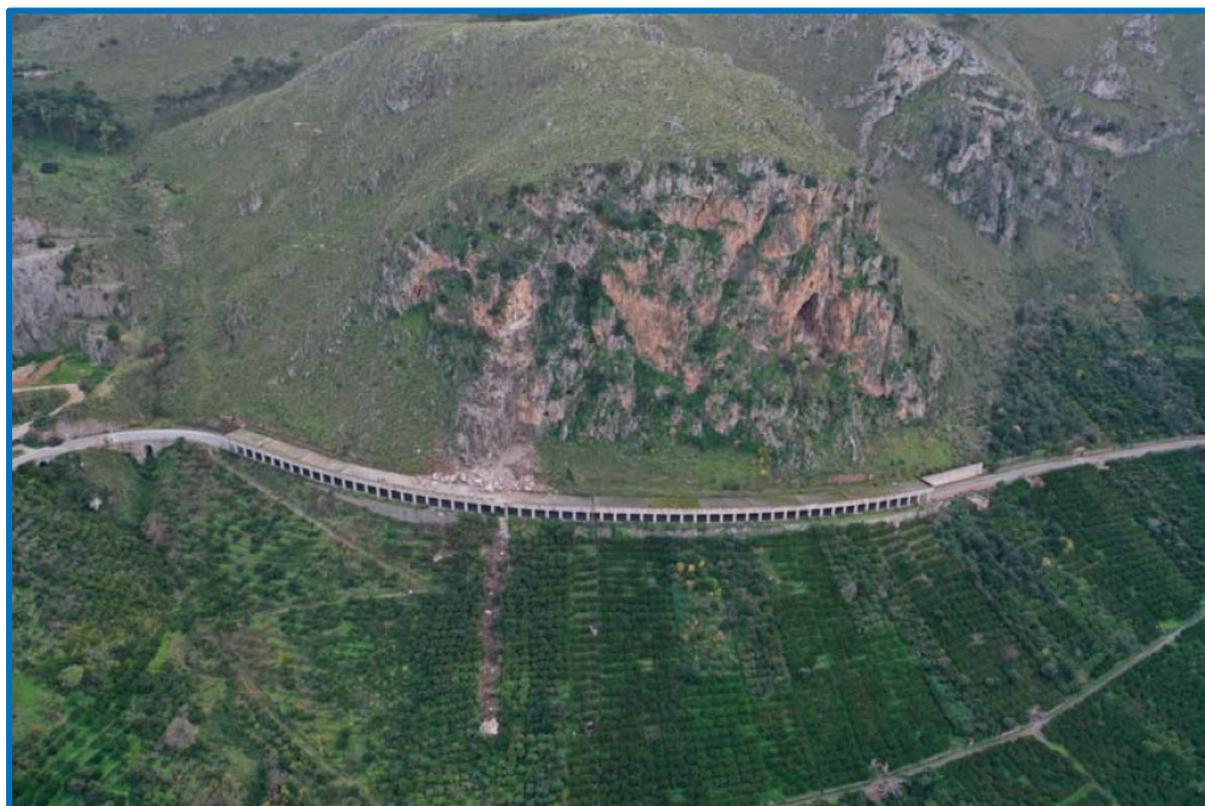


Fig. 3 - Vista panoramica dell'area in studio

3 - DESCRIZIONE DEI LUOGHI

Come visibile nella già citata fig. 3 e come si evince dalla fig. 4, i luoghi in studio sono caratterizzati da un costone roccioso dell'altezza media pari a circa 110 m, che incombe direttamente sulla S.P. 37 per un tratto di circa 370 m. Come già anticipato, per circa 300 m la strada provinciale corre all'interno di una galleria paramassi costituita da una soletta in c.a. sorretta, sul lato di monte, da un muro in c.a., su quello di valle da pilastri a sezione circolare posti ad interasse di circa 5 m (fig. 5); sulla soletta non è presente materasso smorzante.

All'estremità lato Palermo, per circa 70 m, il tratto della S.P. 37 sottostante il costone carbonatico in oggetto è sprovvisto della protezione della galleria paramassi.

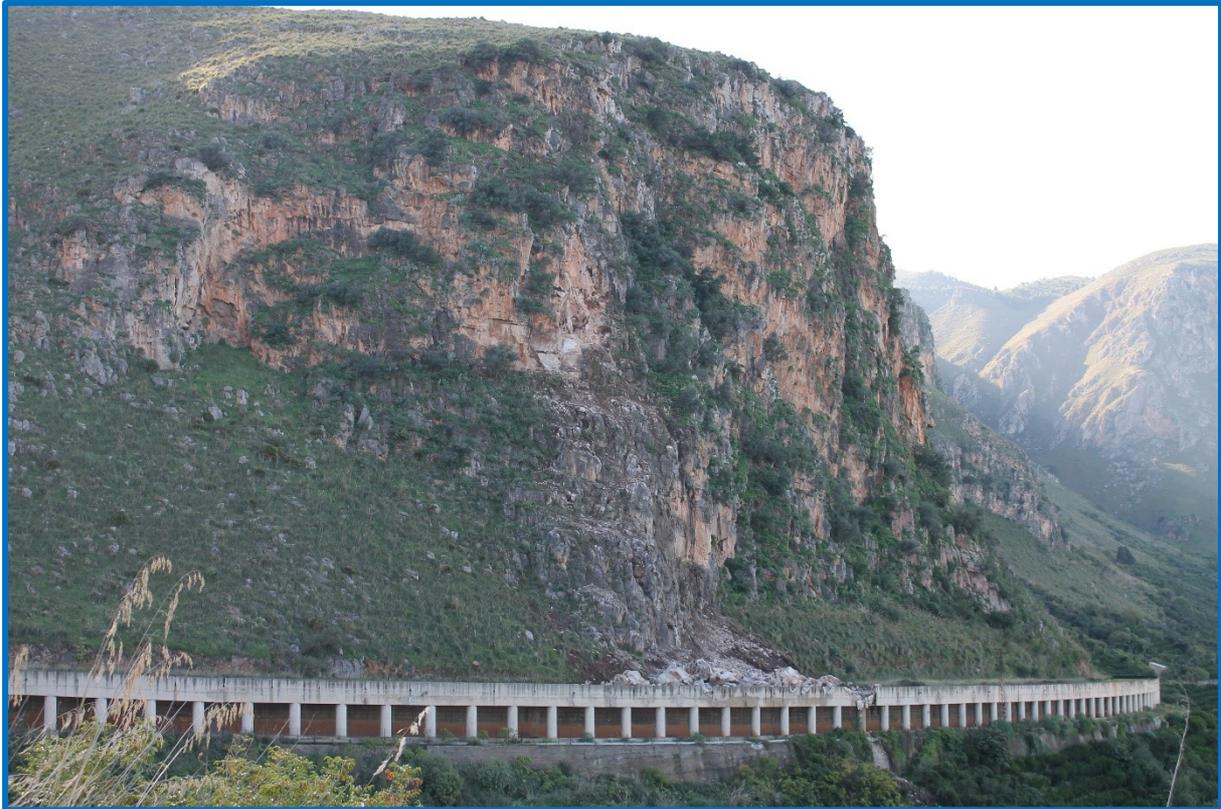


Fig. 4 - Vista del costone roccioso incumbente sulla sottostante S.P. 37

Come risulta dai rilievi effettuati in situ nell'ambito delle indagini prodromiche alla presente progettazione, sui quali si riferisce in dettaglio nel seguito, e come ben visibile nella fig. 4 e nel particolare della foto di fig. 6, l'ammasso roccioso che costituisce il costone in studio è solcato da diversi sistemi di discontinuità di origine sedimentaria (piani di stratificazione) e tettonica (giunti e faglie), che gli conferiscono una configurazione "a blocchi": le discontinuità, cioè, interagendo le une con le altre delimitano singoli elementi lapidei che, in condizioni di carico particolari, possono crollare.

Già da un esame a distanza dei luoghi risulta che il costone carbonatico è puntellato da numerosi blocchi lapidei di dimensioni assai variabili, dal metro cubo alle centinaia di metri cubi, in equilibrio precario. Appare evidente che, per la breve distanza tra il fronte roccioso e la sottostante S.P. 37, nel caso di crollo, il blocco raggiungerebbe con sicurezza la strada provinciale, come accaduto lo scorso 1 novembre. Peraltro, a causa delle grandi dimensioni dei blocchi in equilibrio instabile e per l'altezza del costone roccioso, la difesa passiva costituita dalla galleria paramassi non può ritenersi esaustiva ad eliminare il rischio geomorfologico per la strada provinciale.



Fig. 5 - Interno della galleria paramassi della S.P. 37

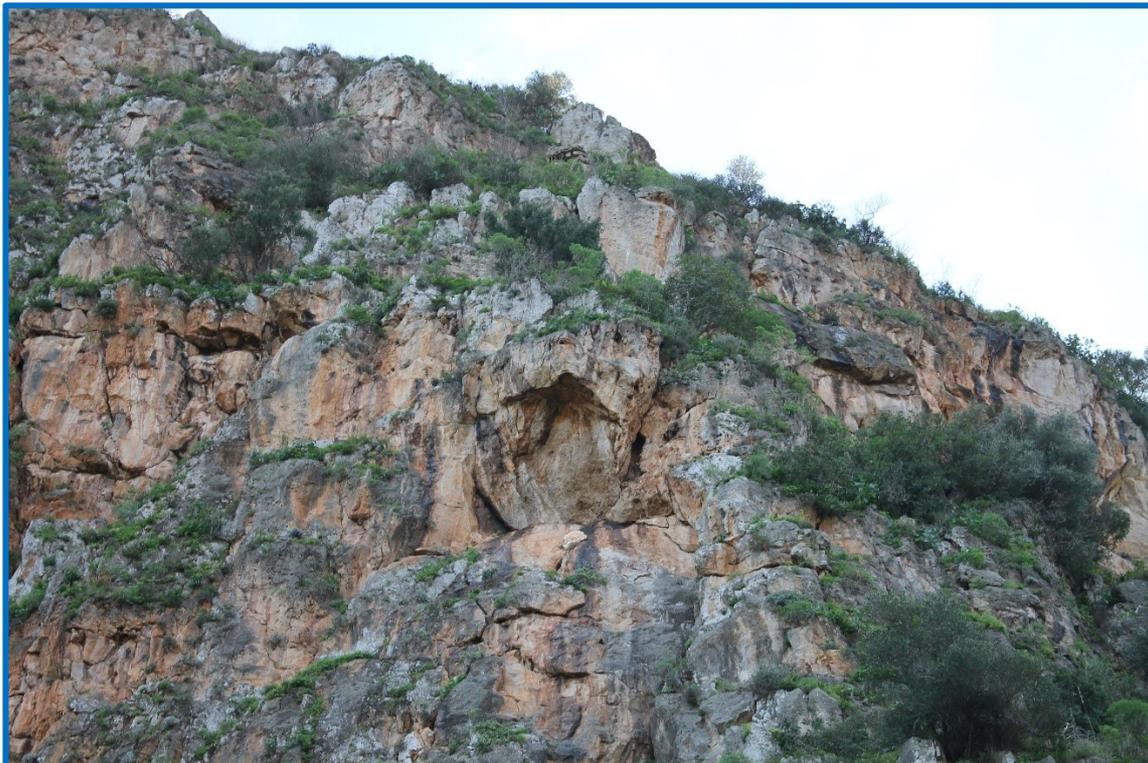


Fig. 6 - Particolare del costone lapideo incombente sul tratto in studio della S.P. 37

4 - CONSIDERAZIONI DI CARATTERE GEOLOGICO

Occorre premettere che la committenza ha dichiarato che lo studio geologico verrà redatto da personale interno alla stessa. Cionondimeno, al presente studio ha collaborato il geologo dott. Riccardo Ferraro per conto dello scrivente; inoltre, il geologo dott. Angelo Leotta è stato incaricato dalla Città Metropolitana delle ispezioni in parete, sui risultati delle quali egli riferisce nella Relazione geomeccanica che si allega al presente progetto. Di conseguenza, vista l'urgenza del presente progetto, con l'ausilio dei due professionisti citati è stato predisposto il presente capitolo, necessario per acquisire gli elementi di specifica competenza prodromici alla presente progettazione.

I "Monti di Palermo" costituiscono un segmento della catena appennino-maghrebide, estesa dall'Appennino al Nord-Africa, caratterizzato da uno stile tettonico effetto della sovrapposizione per sovrascorrimento di unità carbonatiche e terrigeno-carbonatiche deposte negli originari domini di età Mesozoico-Terziaria note in letteratura come Panormide ed Imerese. Le principali successioni stratigrafiche mappate nello stralcio della carta geologica d'Italia Foglio 595 "Palermo" (fig. 7) sono rappresentate, infatti, dalle successioni Panormide ed Imerese, sulle quali si sono deposte in discordanza le successioni Numidiche.

I movimenti compressivi più importanti registrati in questo settore della catena sono legati alla rotazione antioraria del blocco sardo-corso. Questa rotazione, che si sviluppò a partire dall'Oligo-Miocene, ha portato alla collisione del blocco sardo-corso con il margine continentale africano.

In particolare, i "Monti di Palermo" sono il risultato di due eventi deformativi a carattere compressivo e trascorrente:

- **Evento 1** - deformazione superficiale (*Shallow Seated*), che si sviluppa dopo il Miocene inferiore con superfici di *thrust* a basso angolo, che determina la sovrapposizione delle unità tettoniche di primo ordine. Nell'area di studio, l'evento *Shallow Seated* causa la sovrapposizione dell'Unità del Bacino Imerese, in affioramento, sulle Unità del Bacino Imerese sepolte (Catalano et al., 2000);
- **Evento 2** - deformazione profonda (*Deep Seated*), che si esplica nel Plio-Pleistocene con *thrust* ad alto angolo e faglie trascorrenti, che inducono la ri-deformazione delle unità tettoniche messe in posto durante l'evento 1.

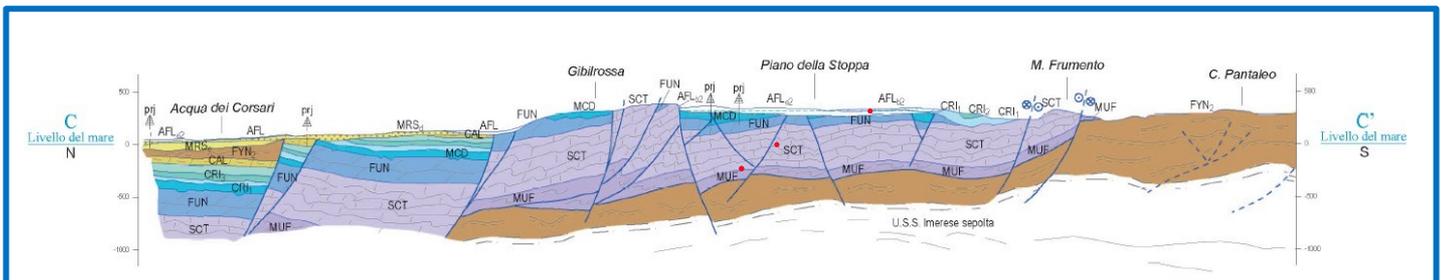
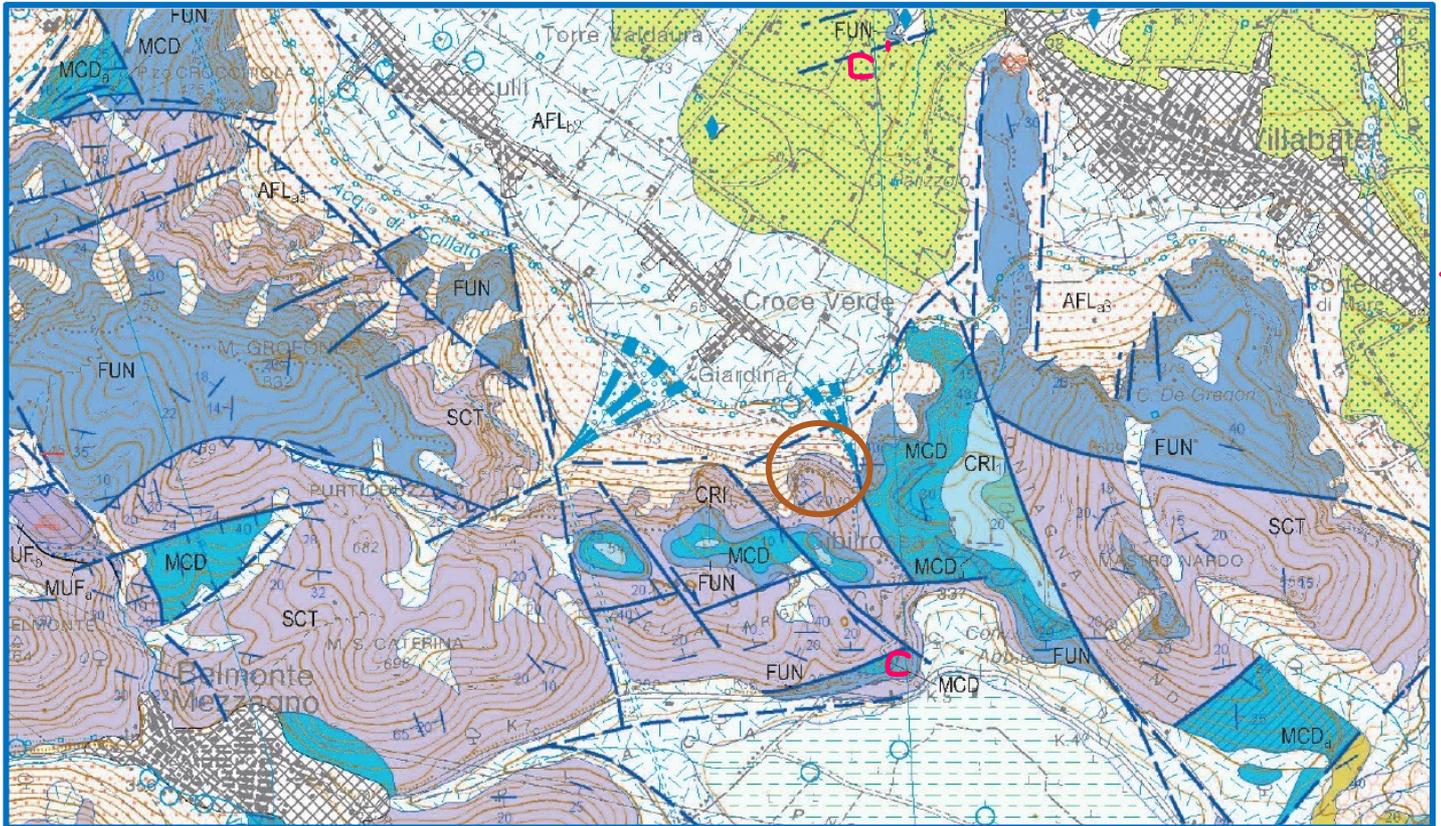


Fig. 7 - Stralcio del foglio 595 del CARG con ubicazione dell'area in studio e sezione CC'

L'assetto tettonico complessivo è caratterizzato da una **fase tettonica distensiva**, che si esplica dopo il Pleistocene inferiore, e ribassa verso costa le successioni carbonatiche imeresi che costituiscono il costone roccioso in studio.

Come risulta nella fig. 7, nell'area oggetto di studio affiora la successione Imerese, comprendente:

CRI, Formazione Crisanti

Calcolititi a radiolari, radiolariti, calcari selciferi e marne cui si intercalano livelli di breccie carbonatiche risedimentate, derivanti dalla frammentazione di corpi di piattaforma carbonatica e del suo margine (Panormide). Suddivisa in 4 membri, membro delle radiolariti, membro delle breccie ad Ellipsactinie, membro marnoso-

spongolitico, membro delle breccie a rudiste e orbitoline (*Liassico superiore-cretacico superiore*);

MCD, Calcari a Crinoidi e Breccie di Altofonte

Biocalcareniti ad articoli di crinoidi laminate e marne argillose grigio verdastre a cui si intercalano o seguono verso l'alto breccie carbonatiche e calciruditi risedimentate plurimetriche ad elementi di piattaforma carbonatica e scogliera (breccie di altofonte MCD_a). Spessori dai 15 ai 100 m, il limite inferiore è discordante ed erosivo sulla Formazione Fanusi. Ambiente sedimentario di scarpata e base scarpata (*Liassico medio- Liassico superiore*);

FUN, Formazione Fanusi

Breccie dolomitiche e doloruditi bianche o grigie, stratificate in banchi dallo spessore metrico e decametrico, alternate ciclicamente a doloareniti e dolosiltiti gradate e laminate in strati centimetrico-decimetrici. Localmente, dolomie massive, farinose e vacuolari. Il corpo litologico, racchiuso stratigraficamente tra i calcari triassici della Formazione Scillato e i livelli Liassico medio-superiore dei Calcari a crinoidi e breccie di Altofonte, viene attribuito unicamente per posizione stratigrafica al *Liassico inferiore*. Corpo risedimentato da un'adiacente area di piattaforma carbonatica, depositatosi ai piedi della scarpata a costruire un "apron carbonatico" (Basilone, 2000);

SCT, Formazione Scillato

Calcari con selce, dolomitizzati nella parte alta della serie. La successione è costituita da calcilutiti grigie in strati sottili, superiormente passano a calcilutiti cristalline, calcareniti e calciruditi in grossi banchi, nella parte più alta della successione si rinvencono calcari nodulari e calcari bianchi e rosati. Lo spessore può variare da 650 m fino a 100 m. Sono presenti radiolari, conodonti e lamellibranchi calcari, che permettono di datare la formazione tra il *Carnico superiore* e il *Retico*. Il limite inferiore è netto e concordante con le argille e marne della Formazione Mufara. Il limite superiore può essere erosivo e con rapporti discordanti con le dolomie della formazione Fanusi o in *onlap* con le radiolariti giurassiche della Formazione Crisanti. Nel dettaglio, **il fronte roccioso è costituito dai calcari con selce della Formazione Scillato**, dislocati da un sistema di faglie trascorrenti destre a direzione NO-SE. Ad est del settore in cui si è verificato il crollo si sviluppa una faglia ad alto angolo a

direzione NNO-SSE che ribassa la Formazione Fanusi ed i Calcari a Crinoidi e Breccie di Altofonte affioranti lungo la valle denominata Discesa dei Mille.

5 - POSIZIONE DEL PROBLEMA

Come segnalato nel cap.1, scopo dell'incarico affidato allo scrivente dalla Città Metropolitana di Palermo è di:

1. individuare la **pericolosità** del fronte lapideo sorgente del crollo verificatosi in data 1 novembre 2021, ossia le relative condizioni di stabilità, e, conseguentemente, valutare le condizioni di **rischio** per le maestranze che dovranno essere impegnate nell'intervento di ripristino e consolidamento della galleria paramassi danneggiata dal citato crollo;
2. nel caso di pericolosità e rischio significativo, progettare gli interventi di che consentano di effettuare in sicurezza i citati interventi di ripristino e consolidamento e, se necessario, integrare le strutture esistenti a protezione della S.P.37.

Occorre premettere che il vigente P.A.I. (*Piano per l'Assetto Idrogeologico della Regione Siciliana*) è molto esplicito sulle condizioni di stabilità del costone lapideo in argomento, nel quale viene identificato il **dissesto 038-6PM-012** (fig. 8). Inoltre, tutta l'area alla base del fronte roccioso, nella quale si sviluppa il tratto della S.P.37 in studio, viene identificata a **pericolosità molto elevata P4** (fig. 9). Il tratto della strada provinciale ricadente in tale area non protetto dalla galleria artificiale viene considerato a **rischio elevato R3**, mentre non viene segnalato rischio per la S.P.37 che si sviluppa all'interno della galleria paramassi proprio per la presenza dell'opera di difesa passiva. E', appena il caso di evidenziare che le previsioni del P.A.I. relative alla pericolosità trovano conferma nell'ingente frana del novembre 2021; quelle inerenti al rischio per il tratto della S.P.37 all'interno della galleria paramassi sono, invece, poco cautelative, visti i danni subiti dalla stessa galleria a seguito del crollo e i risultati del presente studio, su cui si riferisce nel seguito.

Progetto definitivo degli interventi di mitigazione del rischio geomorfologico per il tratto della SP 37 che si sviluppa lungo a galleria artificiale danneggiata dal crollo verificatosi in data 1 novembre 2021
R1 - Relazione generale

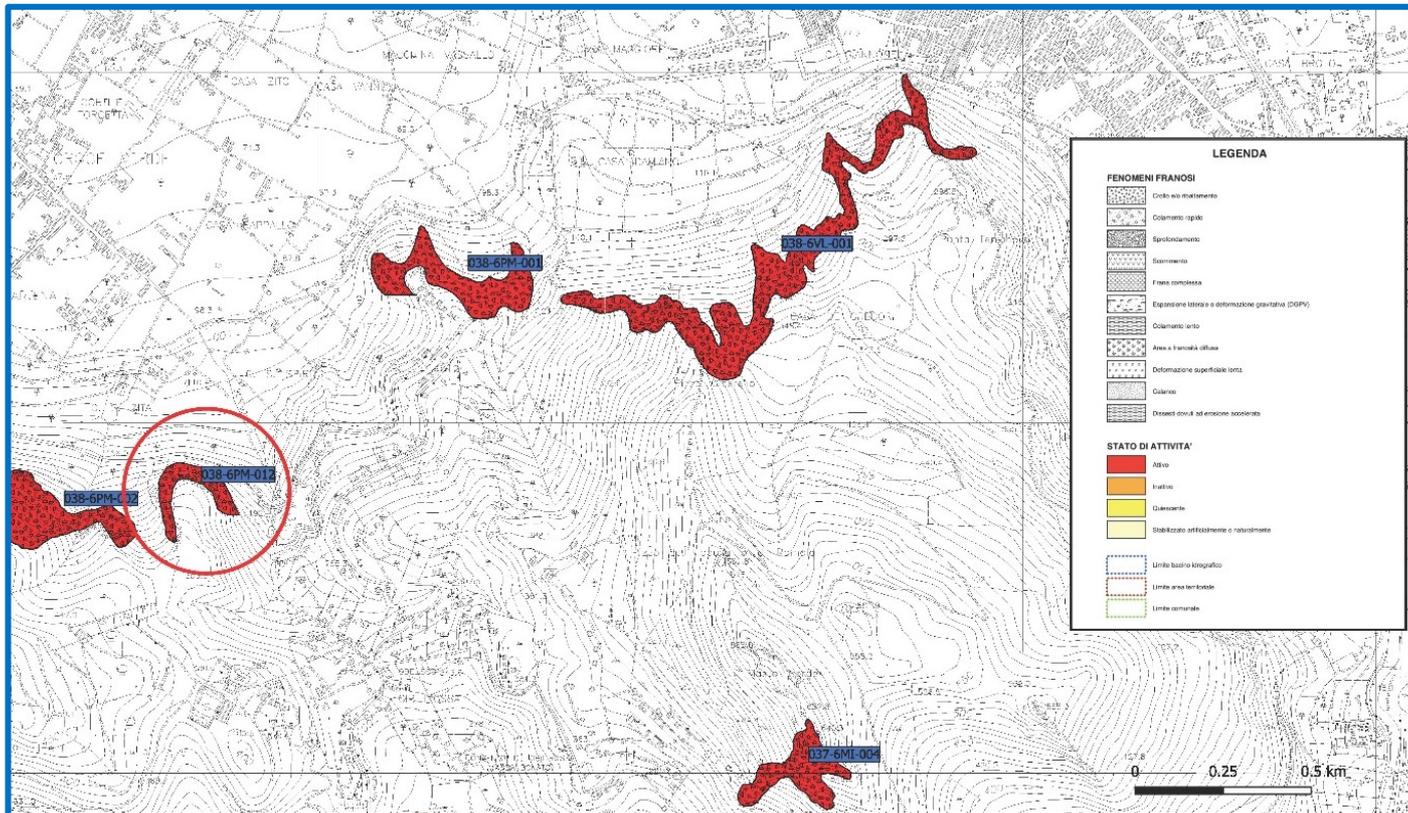


Fig. 8 - Stralcio della carta dei dissesti del P.A.I. n°595100

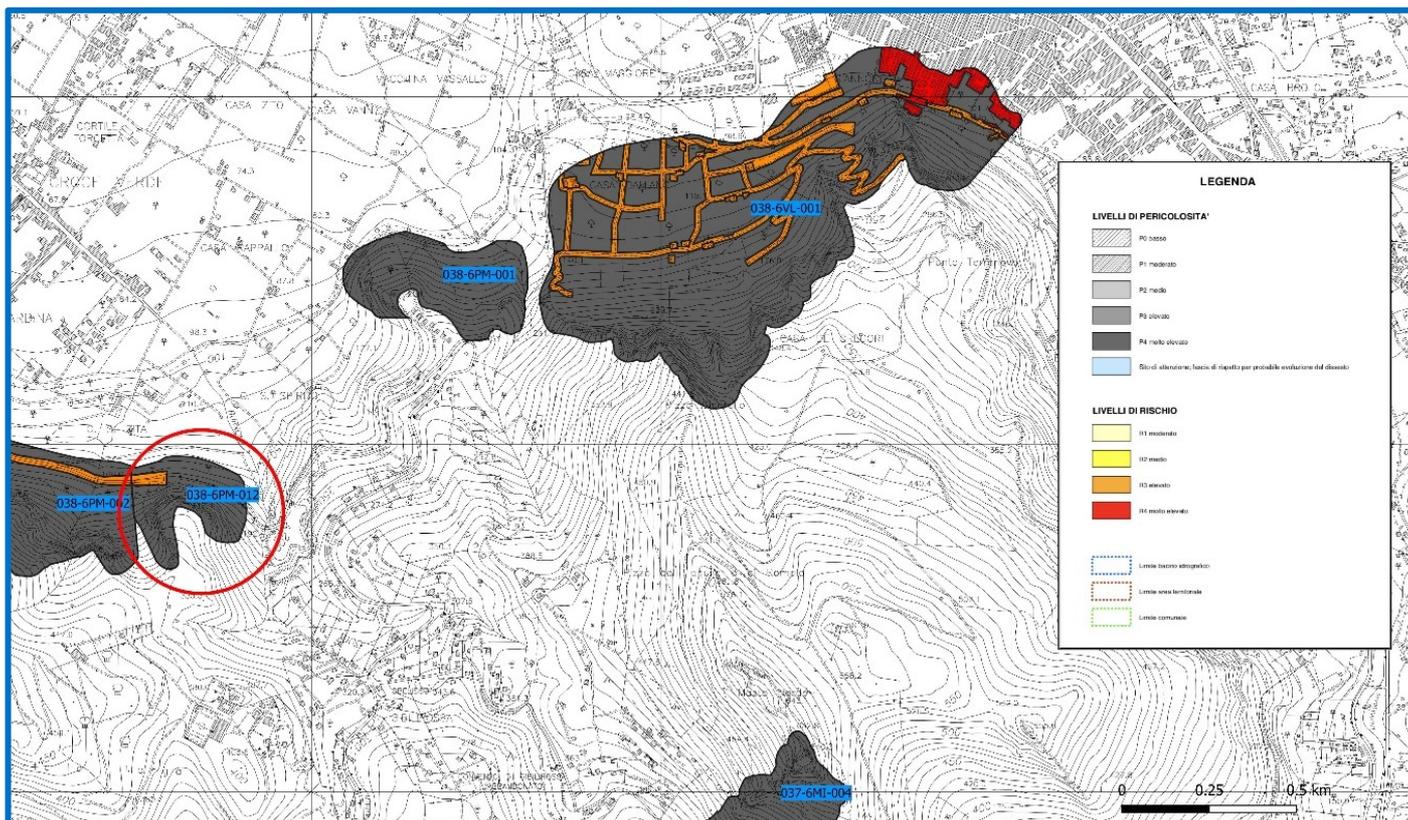


Fig. 9 - Stralcio della carta della pericolosità e del rischio del P.A.I. n°595100

In ogni caso, tenuto conto che le maestranze che saranno impegnate nei lavori di ripristino e consolidamento della galleria paramassi, comprensivi dell'asportazione del materiale crollato il giorno 1 novembre 2021 su di essa posizionato, opereranno all'esterno dell'opera di difesa passiva e/o, comunque, all'interno di un'opera significativamente danneggiata, sulla base di quanto sopra indicato risultano evidenti le condizioni di rischio elevato per gli operai in assenza di adeguati interventi da realizzare prima delle lavorazioni.

Evidentemente le previsioni del P.A.I. sono di carattere generale e non basate su una puntuale conoscenza dello stato dei luoghi né prima del crollo né dopo lo stesso, intendendo per "stato dei luoghi" le effettive condizioni di stabilità del costone roccioso in argomento. Per approfondire tale aspetto, occorre riferire dapprima sui fattori che determinano le frane da crollo e ribaltamento, quindi sui rilievi pianificati per risalire alle effettive condizioni di stabilità della parete carbonatica in studio.

Al cap. 3 si è evidenziato che, come la quasi totalità degli ammassi rocciosi, anche quello in affioramento nel costone lapideo in studio è interessato da una fitta rete di discontinuità di natura tettonica (giunti e faglie) e sedimentaria (piani di stratificazione), che ne condizionano le caratteristiche meccaniche e la stabilità. In particolare, il comportamento degli ammassi rocciosi fessurati è ben rappresentato dal "**modello rigido discontinuo**", in base al quale eventuali dissesti possono verificarsi per fenomeni di rottura lungo le discontinuità che individuano singoli blocchi disarticolati gli uni dagli altri e ciascuno dall'ammasso roccioso, come indicato in fig. 10.

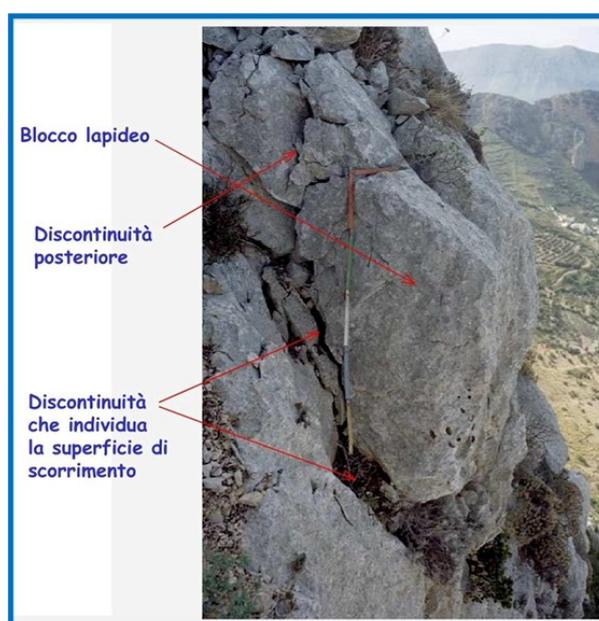


Fig. 10 - Blocco lapideo delimitato da superfici di discontinuità

I possibili cinematismi dei massi dipendono dall'orientazione delle superfici di discontinuità che li delimitano in relazione a quella del fronte roccioso sul quale sono ubicati. Le possibilità meccaniche dipendono dalle forze agenti sui blocchi, tra le quali si citano la forzante sismica, la spinta dell'acqua di saturazione del materiale che talora si trova all'interno delle superfici di discontinuità, e la forza di attrito che dipende dalla resistenza al taglio della roccia lungo i giunti.

Infine, la scelta della tipologia di un intervento di mitigazione del rischio geomorfologico (passivo, attivo, misto) e l'entità delle forze stabilizzanti da trasmettere agli elementi lapidei in equilibrio instabile per assicurarne la stabilità con opportuno coefficiente di sicurezza sono funzioni, oltre che del meccanismo di rottura, anche delle dimensioni dei blocchi rocciosi.

In definitiva, soltanto con rilievi puntuali e specifici è possibile acquisire tutte le informazioni indispensabili per individuare le condizioni di stabilità di un fronte lapideo e per la progettazione e per il dimensionamento degli interventi di consolidamento e/o di difesa passiva dei manufatti che si intende salvaguardare. Di conseguenza, lo studio degli ammassi rocciosi fessurati si articola per fasi successive:

1. rilievo fotografico e topografico con sistema SAPR (*Sistema Aeromobile a Pilotaggio Remoto*, nome tecnico del drone) dell'area in studio e restituzione di un modello 3D;
2. ispezione diretta dei fronti rocciosi in cui si è reso necessario approfondire i dati acquisiti con il drone e rilievo geometrico e geostrutturale dei blocchi in equilibrio instabile;
3. elaborazione dei dati acquisiti in sito, comprendente: la caratterizzazione geostrutturale dell'ammasso roccioso; la definizione dei possibili cinematismi relativi ai blocchi in equilibrio instabile e le conseguenti verifiche di stabilità;
4. scelta della tipologia di intervento e relativo dimensionamento.

Sulla base delle considerazioni sopra illustrate, è stato pianificato dallo scrivente il programma dei rilievi e delle indagini, affidati dall'Amministrazione a professionisti competenti, su cui si riferisce nel capitolo seguente; i risultati ottenuti, elaborati dallo scrivente, sono stati posti a base della valutazione delle attuali condizioni di stabilità del fronte roccioso in studio (cap. 7) e della scelta e del dimensionamento degli interventi previsti (cap. 8).

6 - RILIEVI ED INDAGINI

6.1 Generalità

Al fine di acquisire tutti gli elementi indispensabili per gli approfondimenti di carattere geologico, geotecnico e geomeccanico e per individuare e dimensionare gli interventi da porre in opera per la mitigazione del rischio geomorfologico per la zona a valle del costone sorgente del crollo del 1 novembre 2021, nella quale ricade il tratto della S.P.37 in studio, sono stati eseguiti i rilievi e le indagini appresso elencati:

1. **rilievo foto/topografico mediante l'utilizzo di S.A.P.R.**, finalizzato alla acquisizione del modello tridimensionale dei luoghi, eseguito dall'ing. Antonino Barone;
2. **ispezioni in parete** dei fronti lapidei effettuate con metodi di progressione su corda da rocciatori coordinati dal geol. Angelo Leotta, con individuazione di blocchi in equilibrio instabile e relativi rilievi geometrici e geostrutturali;
3. **rilievo geostrutturale dell'ammasso roccioso** in varie stazioni di misura, con acquisizione delle caratteristiche delle superfici di discontinuità codificate dall'ISRM (*International Society of Rock Mechanics*), eseguite dal dott. Leotta sul fronte lapideo in argomento.

Sul rilievo con il sistema S.A.P.R. riferisce in una specifica relazione l'ing. Barone; i risultati acquisiti con le ispezioni e con il rilievo geostrutturale sono raccolti nella Relazione geomeccanica redatta dal dott. Leotta. Entrambi gli elaborati sono allegati al presente progetto.

6.2 Rilievo con sistema S.A.P.R.

Il rilievo foto/topografico è stato eseguito con il drone "*HIGHONE 4HSE PRO*", dotato di fotocamera *SONY Alpha 7R* con sensore full-frame da 35 mm (35,9 × 24 mm), 36,4 megapixel (effettivi), sensibilità iso 50-25600, obiettivo *Zeissfe 35mm f/2.8* e di Software di reality modeling *Contex Capture* della Bentley.

Mediante tale rilievo è stato acquisito il Modello Digitale del Fronte roccioso in studio (DTM); in particolare, nella fig. 11 si riporta il modello 3D ricavato dall'elaborazione della nuvola di punti acquisita con il drone.

Per ulteriori dettagli si rinvia alla citata relazione redatta dall'ing. Barone, allegata al presente progetto.

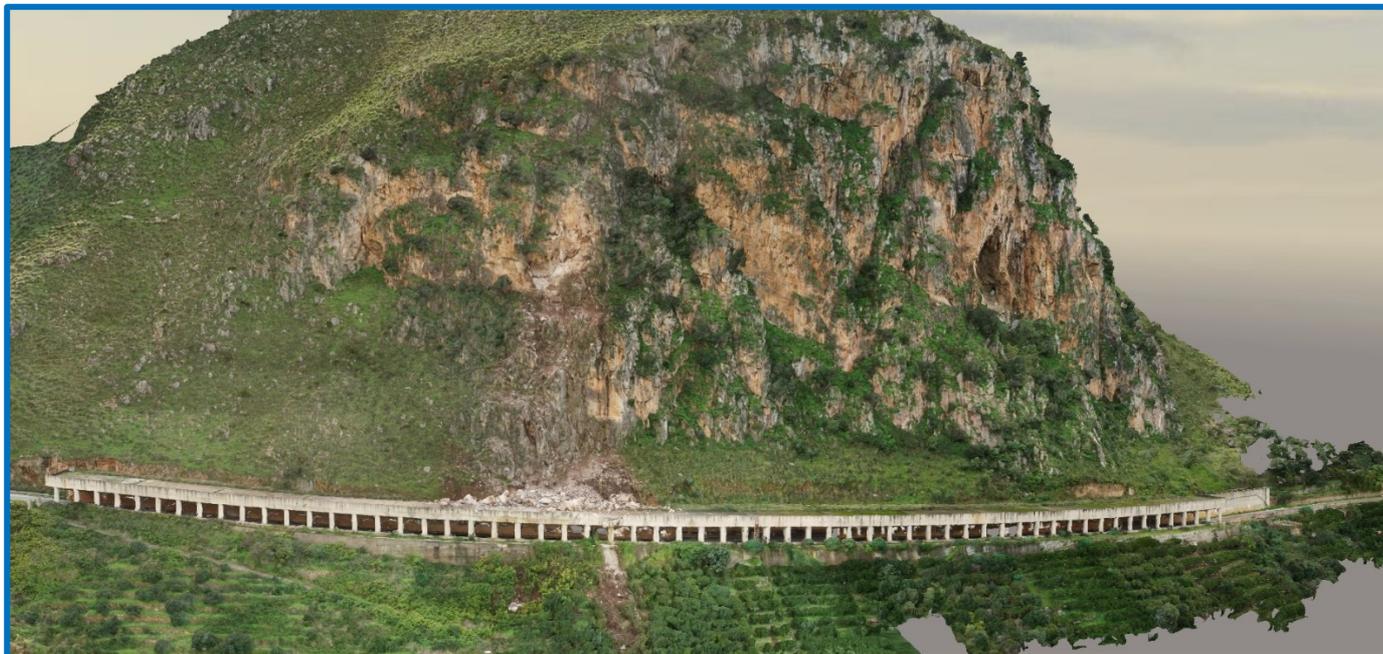


Fig. 11 - Modello 3D del fronte roccioso in studio

6.3 Ispezioni in parete

Le ispezioni sono state condotte da rocciatori coordinati dal dott. Leotta, che hanno operato con metodi di progressione su corda. Essi hanno individuato e rilevato n°8 elementi lapidei in equilibrio instabile, identificati con le sigle M1, ..., M8, di cui hanno fornito specifiche monografie contenenti la relativa ubicazione sul fronte roccioso, la documentazione fotografica, le dimensioni e indicazioni sui possibili cinematismi. Per ulteriori dettagli si rinvia alla Relazione geomeccanica citata.

6.4 Rilievo geostrutturale

Per l'analisi della stabilità di costoni lapidei fessurati è necessario conoscerne *la struttura orientata*: si tratta di ricostruire *il modello geomeccanico* dell'ammasso roccioso sorgente dei crolli, che consiste nell'individuare le *"famiglie"* di discontinuità in esso presenti. A tal fine si procede in situ con il cosiddetto rilievo geostrutturale dell'ammasso roccioso, mediante il quale si acquisiscono i dati di orientazione spaziale di un campione rappresentativo di discontinuità: ciascuna discontinuità, infatti, è univocamente posizionata nello spazio mediante due angoli (fig. 12), l'inclinazione α (*dip*) e l'azimut β (*dip direction*).

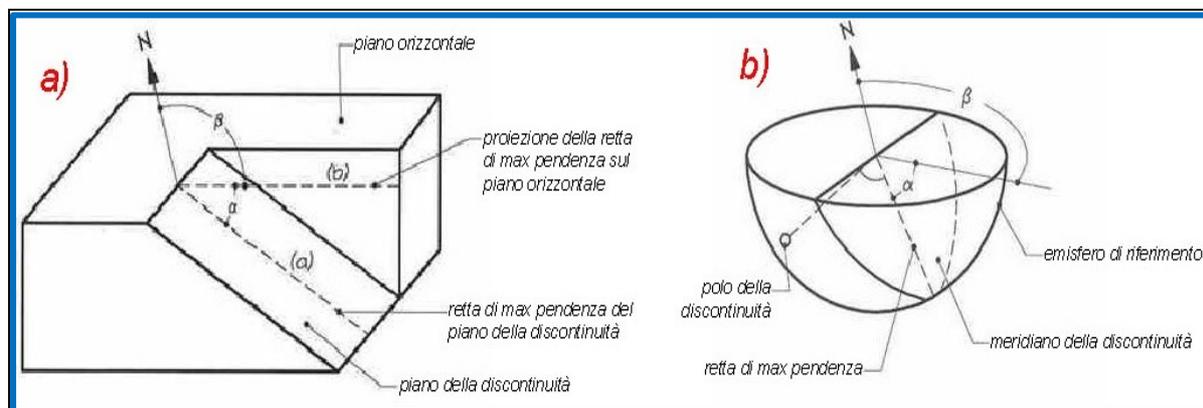


Fig. 12 - Orientazione delle discontinuità (Cafiso F., Corso di meccanica delle rocce – UNIPA)

Nel caso specifico, il dott. Leotta ha effettuato rilievi geostrutturali dell'ammasso roccioso in varie stazioni misurando le caratteristiche di orientazione di n° 117 superfici di discontinuità, i cui valori sono riportati nelle tabb. Ia e Ib. Inoltre, sono stati rilevati le altre grandezze delle discontinuità indicate dall'ISRM (*International Society of Rock Mechanics*) secondo le prescrizioni indicate in "Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses" (Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 15, pp. 319-368, 1978) e, precisamente:

- l'apertura **a**, ossia la distanza tra le due pareti della medesima discontinuità;
- la spaziatura **s**, definita come la distanza tra due discontinuità consecutive subparallele;
- l'eventuale presenza e le caratteristiche del materiale di riempimento;
- la persistenza **p**, ossia la lunghezza della traccia della discontinuità sul fronte;
- la terminazione, che individua le caratteristiche delle estremità della traccia della discontinuità sul fronte;
- la resistenza del materiale che costituisce le pareti della discontinuità, che viene indicata con la sigla **JCS** ("Joint wall Compressive Strength");
- la scabrezza del profilo, misurata tramite il coefficiente **JRC** ("Joint Roughness Coefficient" – indice della scabrezza delle superfici delle discontinuità).

Progetto definitivo degli interventi di mitigazione del rischio geomorfologico per il tratto della SP 37 che si sviluppa lungo a galleria artificiale danneggiata dal crollo verificatosi in data 1 novembre 2021

R1 - Relazione generale

N. discontinuità	α (°)	β (°)	S (cm)	P(m)	a (mm)	RUG	JRC	Riempimento	JCS	FILTRAZ	terminazione	FRONTE
1	87	233	53	7	6	7	3	inc	2	2	x	86/015
2	70	58	50	9	120	8	2	ass	3	2	x	
3	40	48	80	1,1	8	1	18	ass	3	2	d	
4	77	75	31	4	4	5	7	ass	3	2	x	
5	75	58	43	1,38	7	7	3	inc	3	2	d	
6	65	61	28	1,37	7	8	1	ass	3	2	d	
7	82	62	57	2,6	3	7	4	inc	3	2	x	
8	84	268	74	0,38	1	5	7	inc	3	2	d	
9	72	275	43	0,4	2	1	19	ass	3	2	d	
10	30	73	71	1,4	2	7	2	inc	3	2	d	
11	72	74	25	1,1	7	4	9	ass	3	4	x	
12	30	40	27	1,3	6	4	8	inc	3	2	d	
13	65	263	49	0,53	3	7	2	inc	3	3	d	
14	80	70	54	2,5	10	4	9	ass	3	3	x	
15	72	40	51	2,5	19	5	7	ass	3	3	x	
16	35	235	47	1,3	1	7	3	inc	3	2	d	
17	40	223	65	1,2	3	7	3	ass	3	4	d	
18	85	135	43	0,98	4	7	2	inc	3	2	d	
19	90	300	22	1,5	3	1	19	inc	3	2	x	
20	72	292	43	1,23	8	8	1	inc	3	3	d	
21	52	264	76	1,13	9	8	2	inc	3	3	x	84/020
22	88	63	77	4	9	4	9	inc	3	2	x	
23	67	140	41	0,9	3	4	8	ass	2	2	d	
24	70	120	33	1,07	6	4	9	inc	3	3	d	
25	47	330	37	1,57	3	7	3	inc	3	3	d	
26	54	329	38	0,8	1	7	4	inc	3	3	d	
27	38	328	90	20	3	7	4	cem	3	2	x	
28	34	348	59	20	2	7	2	ass	2	2	x	
29	84	92	79	3,4	4	2	15	inc	3	3	d	
30	72	30	63	3	5	1	20	inc	3	3	x	
31	75	14	41	1,42	20	7	3	inc	3	3	d	
32	62	100	33	0,52	11	1	18	ass	3	3	d	
33	70	120	17	1,43	5	5	7	ass	3	3	x	
34	47	158	47	1,18	2	2	15	ass	5	3	d	
35	34	358	50	1,8	1	7	3	inc	3	3	x	
36	57	245	31	0,7	1	7	4	ass	3	3	d	
37	80	240	51	7	5	8	1	inc	3	3	x	
38	35	333	84	1,43	2	8	1	ass	3	3	x	
39	62	58	51	1,63	18	8	2	inc	3	3	x	
40	35	13	1,83	1,67	22	6	5	inc	3	2	d	
41	58	234	167	1,62	8	7	3	ass	3	3	d	
42	88	48	57	2,1	30	5	7	ass	3	3	d	
43	86	83	108	12	30	8	1	ass	3	3	x	82/023
44	22	324	58	20	8	8	2	ass	3	3	x	
45	72	240	68	4	12	8	1	inc	3	3	x	
46	28	348	50	20	7	8	1	inc	3	3		
47	65	194	42	1,75	7	5	7	ass	3	3		
48	34	358	110	20	1	7	4	inc	3	3	x	
49	80	115	72	1,87	3	4	9	ass	3	2	d	
50	86	102	75	2,4	20	2	14	inc	3	3	x	
51	64	227	120	2,4	11	7	2	inc	3	3	x	
52	82	331	82	2,7	3	1	20	ass	2	2	d	
53	82	228	91	2,2	3	2	15	ass	2	3	d	
54	47	332	53	25	7	8	4	inc	3	3	x	
55	88	74	37	1,17	3	5	7	inc	3	3	x	
56	73	165	49	0,41	3	1	18	inc	3	3	d	
57	80	71	57	1,82	4	7	4	inc	3	3	x	
58	90	358	54	1,6	7	7	4	ass	3	2	d	
59	88	257	35	8	7	5	7	ass	3	3	x	
60	35	336	55	25	3	8	2	ass	3	3	x	
61	86	73	53	1,8	3	7	2	inc	3	4	x	
62	82	140	37	0,52	4	1	18	inc	3	3	d	

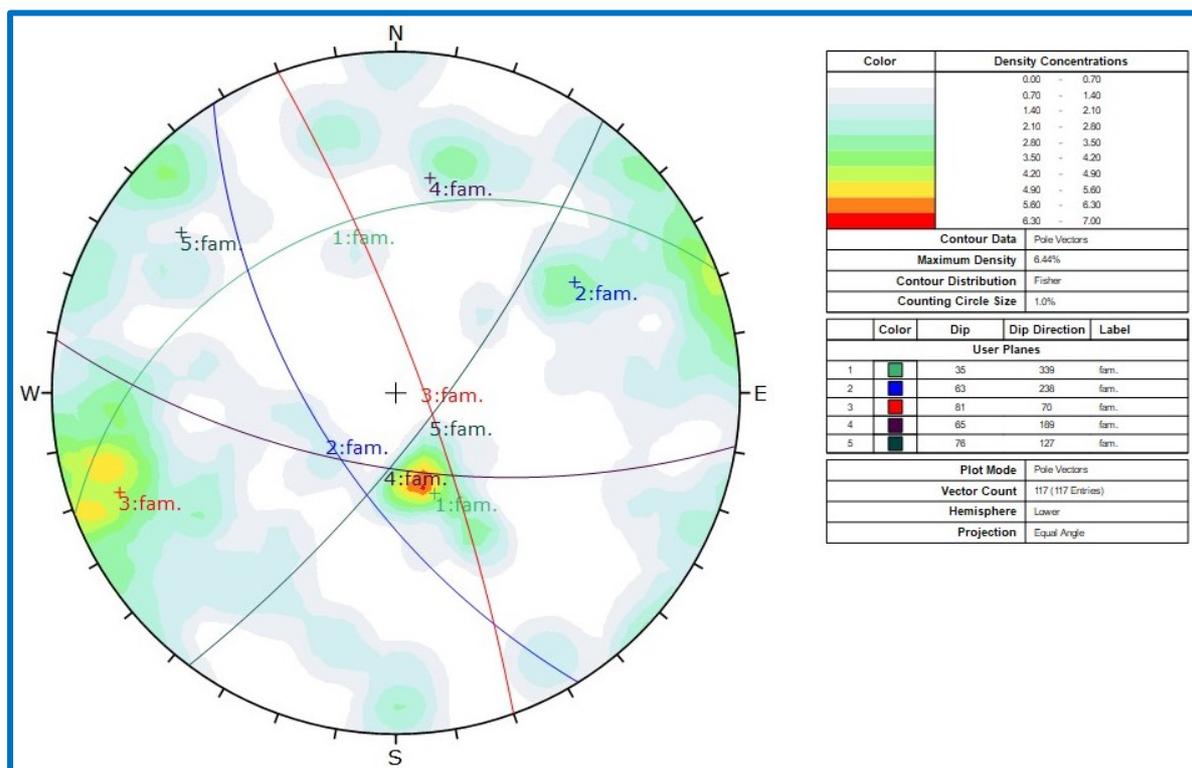
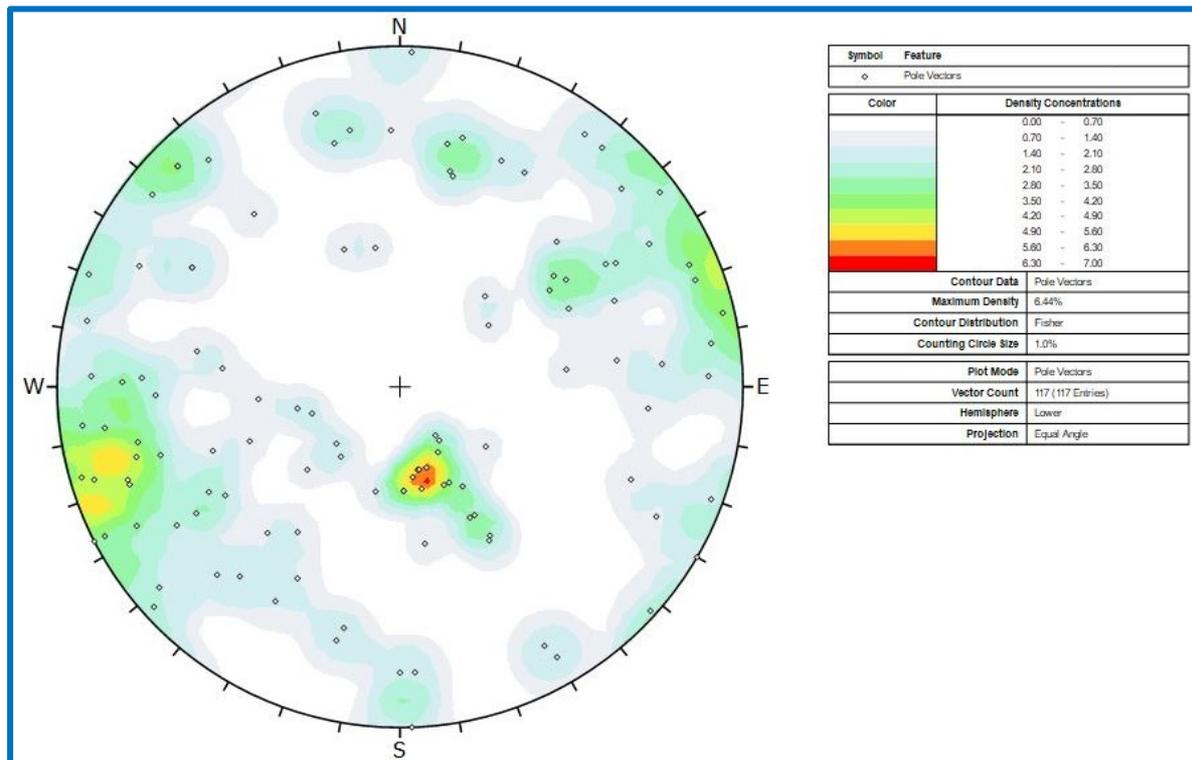
Tab. Ia - Risultati del rilievo geostrutturale

63	88	290	40	5	4	1	18	ass	3	3	x	86/345
64	74	194	30	0,88	1	4	8	cem	3	3	d	
65	89	182	61	1,77	1	7	4	ass	3	2	x	
66	88	110	81	15	12	7	3	inc	3	3	x	
67	28	48	200	5	3	8	2	inc	3	3	x	
68	66	193	37	2,5	30	5	8	ass	3	2	x	
69	80	297	49	1,78	3	7	4	ass	3	3	x	
70	68	248	55	0,97	0,5	5	6	cem	2	2	d	
71	34	78	108	2,5	3	7	4	inc	3	3	d	
72	28	342	80	25	3	8	2	ass	3	5	x	
73	72	210	52	1,8	1	8	2	inc	3	5	x	
74	78	91	73	3	3	7	4	cem	3	2	x	
75	28	347	74	1,7	2	8	2	ass	3	4	x	
76	50	351	82	3,3	3	5	7	inc	3	3	x	
77	74	92	47	1,18	2	7	2	ass	3	2	d	
78	71	88	101	15	8	8	1	inc	3	4	d	
79	80	357	49	1,7	10	4	10	ass	3	3	d	
80	25	330	70	25	1	7	4	cem	3	4	x	
81	76	78	53	2,7	3	5	7	ass	2	2	x	
82	74	178	67	2,7	1	5	7	inc	2	2	d	
83	34	305	500	2,5	7	8	2	inc	3	6	x	80/330
84	72	204	250	2	20	2	14	ass	3	3	d	
85	89	312	200	5	40	1	19	ass	3	3	x	
86	85	128										85/216
87	75	265										
88	65	28										
89	85	220										
90	80	0										
91	85	247										
92	55	237										
93	60	237										
94	85	330										
95	90	63										
96	50	70										
97	70	239										
98	55	35										
99	75	44										
100	85	135										
101	85	50										
102	20	324										
103	85	262										
104	75	169										
105	82	82										
106	85	216										
107	85	250										
108	80	163										70/191
109	72	191										
110	30	352										
111	60	71										
112	60	42										
113	55	330										
114	45	170										
115	45	85										
116	72	13										
117	55	96										

Tab. Ib - Risultati del rilievo geostrutturale

I dati relativi alle discontinuità rilevate sono stati, quindi, elaborati statisticamente utilizzando le proiezioni emisferiche, individuando, in tal modo, il numero e le caratteristiche di orientazione delle principali famiglie di discontinuità presenti nell'ammasso roccioso, come indicato nelle figg. 13 e 14. Nella prima è rappresentato il cerchio equatoriale di Wulf con i poli delle discontinuità rilevate e le curve isofrequenziali, che contornano le aree del diagramma ove ricadono fissate percentuali di poli. Nella fig. 14, oltre le curve isofrequenziali sono riportati i meridiani rappresentativi delle famiglie di discontinuità presenti nell'ammasso roccioso, i cui valori medi statistici di α e β corrispondono alle coordinate dei baricentri delle curve

di isodensità a massima frequenza.



Figg. 13 e 14 - Elaborazione statistica delle misure di orientazione

In definitiva, è risultato che nel costone lapideo in studio sono presenti n°5 famiglie di discontinuità, i cui valori medi statistici di orientazione sono pari a: $\alpha_1 = 35^\circ$, $\beta_1 = 339$; $\alpha_2 = 63^\circ$, $\beta_2 = 238$; $\alpha_3 = 81^\circ$, $\beta_3 = 70$; $\alpha_4 = 65^\circ$, $\beta_4 = 189$; $\alpha_5 = 75^\circ$, $\beta_5 = 127$.

7 - STATO DI FATTO

7.1 Generalità

Le effettive condizioni di stabilità del costone lapideo in studio sono state dedotte attraverso l'elaborazione dei dati acquisiti con le indagini e i rilievi illustrati nel capitolo precedente. Di seguito si riferisce, dapprima, sul crollo verificatosi in data 1 novembre 2021; quindi si illustrano le considerazioni relative alle condizioni di stabilità del fronte lapideo, evidenziando le conseguenti condizioni di rischio geomorfologico sia per le maestranze che dovranno riparare la galleria paramassi danneggiata, sia per la stessa S.P. 37 nel tratto in cui essa si sviluppa alla base del fronte lapideo ma senza la protezione della galleria (estremità lato Palermo), ma anche laddove la strada provinciale corre all'interno dell'opera di difesa passiva, come appresso evidenziato.

7.2 Crollo del giorno 1 novembre 2021

Al crollo verificatosi il giorno 1 novembre 2021, già visibile nelle figg. 3, 4 e 11, si riferiscono le foto delle figg. 15, ..., 18.



Fig. 15 - Nicchia di distacco del crollo del 1 novembre 2021

In particolare, in fig. 15 è visibile la nicchia di distacco dell'elemento lapideo crollato, caratterizzata da un'altezza massima pari a 25 m, una larghezza massima pari a 12 m e uno spessore massimo di circa 7 m (misure acquisite elaborando il rilievo effettuato con il drone), per un volume complessivo massimo pari a 2.100 m³. Per quanto il volume della roccia realmente crollata sarà un po' inferiore a quello innanzi indicato (ottenuto con riferimento alle dimensioni massime del vuoto lasciato dall'elemento lapideo), verosimilmente è superiore a circa 1.500 m³.



Figg. 16 e 17 - Materiale crollato depositatosi sulla galleria paramassi e a valle della stessa



Fig. 18 - Particolare del materiale crollato depositatosi sulla galleria paramassi

L'elemento lapideo, probabilmente costituito da singoli blocchi, ha subito un fenomeno di rottura di tipo complesso, quasi certamente causato dal ribaltamento (*toppling*) di singoli massi che ne costituivano la base, che nel loro spostamento hanno coinvolto l'intero elemento lapideo, divenuto privo dell'appoggio al piede. In ogni caso l'elemento lapideo, distaccatosi da un'altezza media di 60 m rispetto alla sommità della galleria paramassi (quota del baricentro della nicchia di distacco), prima di raggiungere l'opera di difesa passiva, ha impattato più volte sulla fascia del costone roccioso compresa tra la nicchia di distacco e la S.P. 37, dove è rimasto parte del materiale crollato, come si evince dalle figg. 15 e 16. Del resto, se l'elemento lapideo fosse stato monolitico e avesse impattato direttamente sulla galleria, la sua energia, sarebbe stata pari a $W \times \Delta H = 2.430.000 \text{ kJ}$ e avrebbe distrutto completamente la galleria ($W = \gamma \times V = 27 \times 1.500 = 40.500 \text{ kN}$ = peso dell'elemento lapideo; $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$ = peso dell'unità di volume della roccia calcarea, $\Delta H = 60 \text{ m}$ = differenza di quota tra il baricentro dell'elemento lapideo e la soletta della galleria paramassi).

Si rileva, infine, che alcuni massi sono andati ben più a valle della galleria artificiale, come si evince dalle figg. 16 e 17 e, soprattutto, dalla fig. 3, nella quale è visibile un

grosso blocco distante un centinaio di metri dalla galleria e la relativa traccia lasciata sul terreno.

L'impatto dei blocchi ha danneggiato sensibilmente la galleria paramassi; rinviando allo specifico progetto di consolidamento e ripristino a cura di altro professionista per i dettagli, in questa sede ci si limita a commentare le figg. 19, ..., 24.

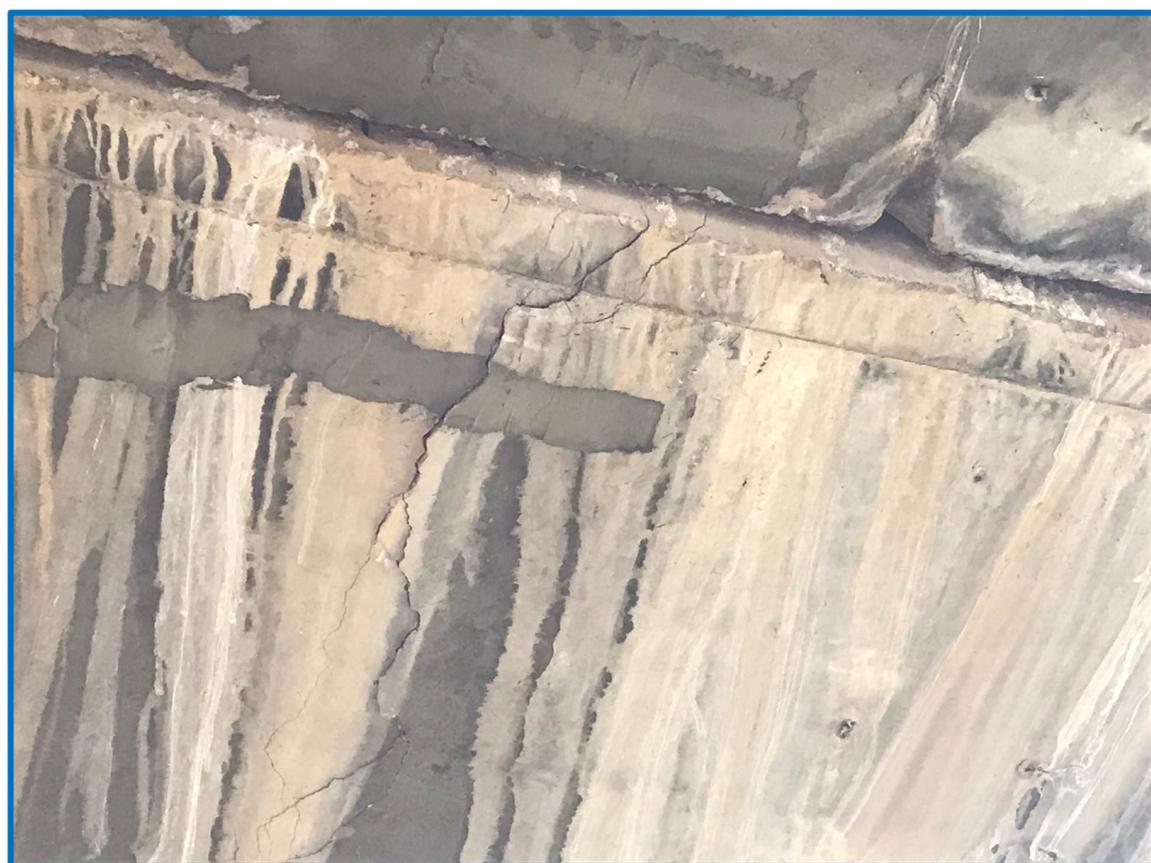


Fig. 19 - Tratti distrutti della soletta di copertura

Come si evince dalle foto citate, all'incirca per un tratto di 40 m le strutture della galleria paramassi hanno subito danni significativi non soltanto in corrispondenza della soletta di copertura, ove è avvenuto l'impatto dei blocchi, ma anche nei pilastri che la sostengono sul lato di valle. In particolare, nel tratto ove è avvenuto l'impatto con il maggior quantitativo di materiale la soletta è stata in parte distrutta (figg. 19, 20 e 21), mentre in corrispondenza dei tratti di estremità della zona di impatto essa ha subito uno spostamento verso valle e si è lesionata (figg. 22 e 23). Diversi pilastri presentano lesioni a 45° (figg. 21 e 24) e le strutture di quelli in prossimità dell'impatto principale hanno anche subito una traslazione relativa (fig. 24).



Figg. 20, 21 - Tratti distrutti della soletta di copertura e lesioni nei pilastri di sostegno



Figg. 22 e 23 - Spostamento di un concio di soletta e lesioni



Fig. 24 - Traslazione verso valle della parte superiore di un pilastro rispetto a quella inferiore

Per concludere si citano le figg. 25 e 26, riprese orientativamente dalla medesima angolazione, nelle quali è visibile il costone lapideo in studio prima del crollo in argomento e nella attuale configurazione dei luoghi: l'elemento lapideo prima del crollo e la nicchia lasciata dopo il fenomeno franoso sono indicati in rosso.



Fig. 25 - Configurazione dei luoghi prima del crollo verificatosi in data 1 novembre 2021

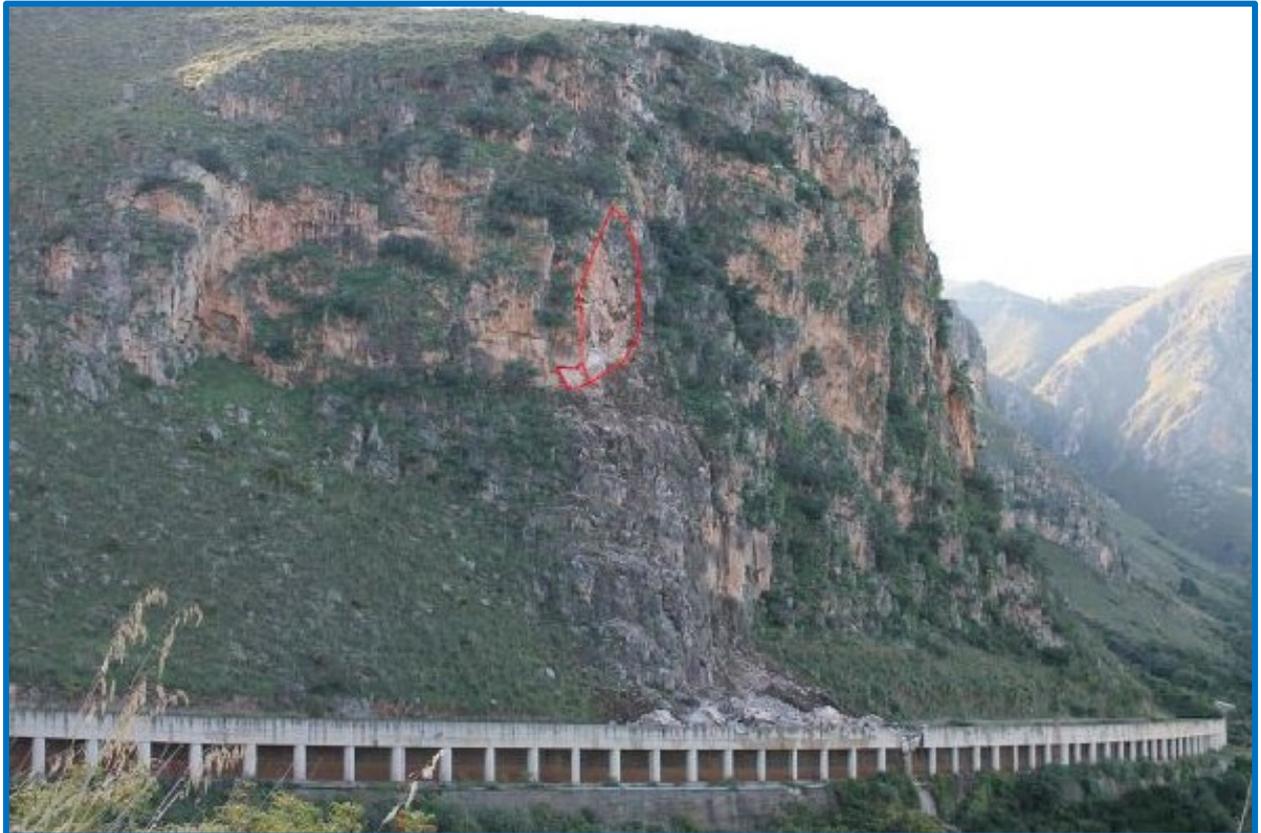


Fig. 26 - Attuale configurazione dei luoghi

7.3 Cause del crollo del giorno 1 novembre 2021

La principale causa predisponente al fenomeno franoso è costituita dalla suscettibilità del costone carbonatico in studio ai fenomeni di rottura; tale suscettibilità dipende dalla struttura dell'ammasso roccioso, nel quale sono presenti n°5 famiglie di discontinuità che, come evidenziato in dettaglio nel paragrafo seguente, rendono cinematicamente possibili fenomeni di *toppling* e di *sliding*.

Per quanto riguarda le cause di innesco (scatenanti), si è fatto riferimento alle principali forzanti destabilizzanti che possono agire improvvisamente sui blocchi lapidei: il sisma e la spinta esercitata dall'acqua di saturazione del materiale di riempimento delle discontinuità.

Dalla consultazione dell'INGV è risultato che nei giorni precedenti il crollo si sono verificati n°3 eventi sismici (fig. 27) nella zona epicentrale Tirreno Meridionale (costa Settentrionale della Sicilia):

- evento registrato in data 13/10/21 con una magnitudo 2,4 ad una profondità di 10 km;
- evento registrato in data 18/10/21 con una magnitudo 2,6 ad una profondità di 1 km;
- evento registrato in data 24/10/21 con una magnitudo 2,4 ad una profondità di 5 km;

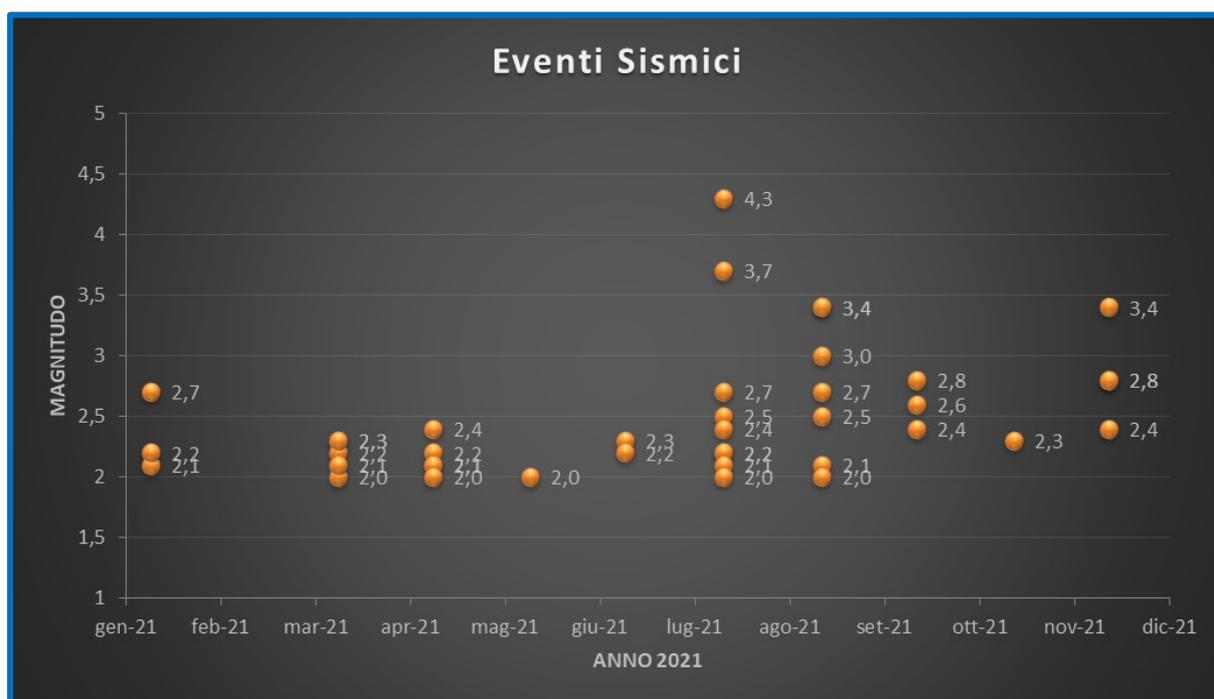


Fig. 27 - Eventi sismici catalogati dall'INGV nel Tirreno meridionale (costa settentrionale della Sicilia)

Si tratta di tre eventi sismici con una magnitudo molto bassa; pertanto, non è possibile concludere che siano stati la causa di innesco del crollo del 1 novembre 2021, ma potrebbero avere influito nella predisposizione all'evento franoso.

Più significativa, ai fini della individuazione della causa che ha innescato il crollo in studio, è risultata l'analisi dei dati pluviometrici effettuata in corrispondenza delle tre stazioni più vicine all'area in studio (Misilmeri, Monreale e Palermo), basata sui dati acquisiti dal SIAS. In particolare, sono stati presi in considerazione i dati pluviometrici relativi al mese di ottobre relativi all'ultimo ventennio (fig. 28).

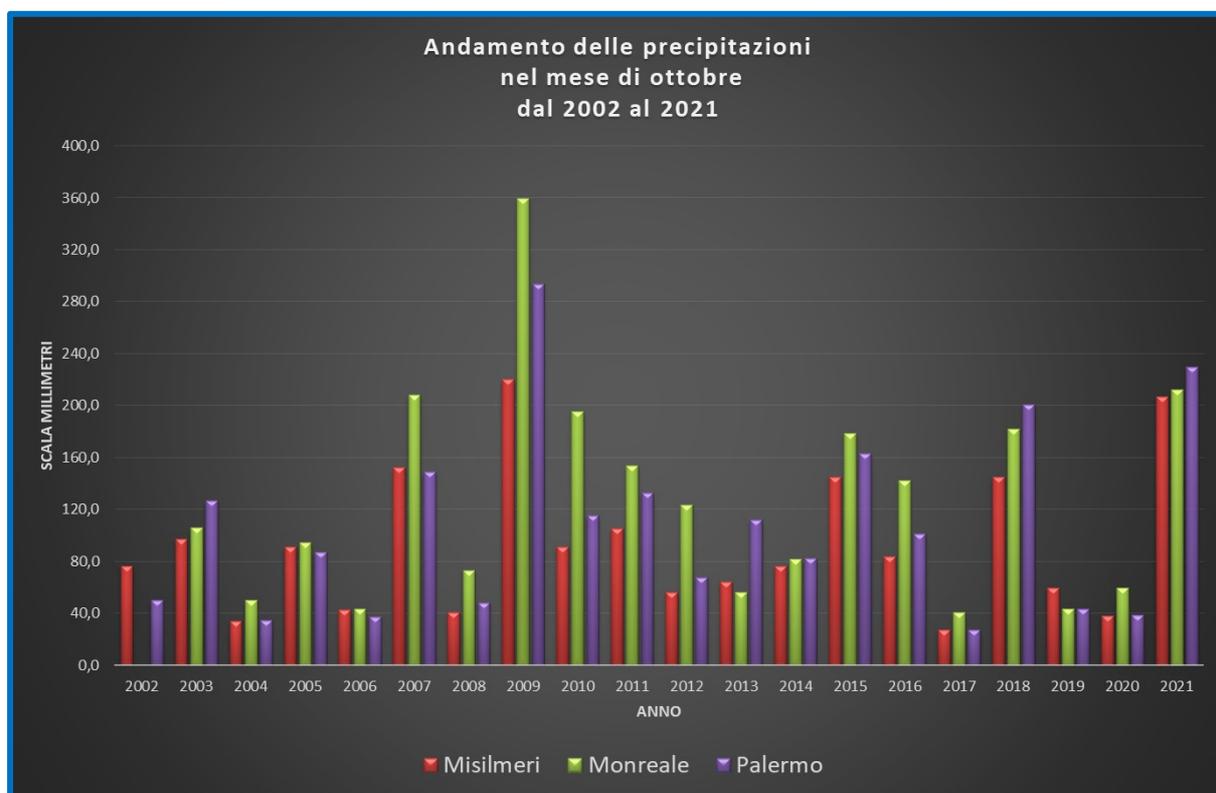


Fig. 28 - Istogrammi rappresentativi dell'intensità di pioggia relativa al mese di ottobre

Il dato relativo al mese di ottobre 2021 risulta molto significativo, sia in termini assoluti che statistici. Infatti, il valore assoluto della piovosità di ottobre 2021, superiore a 200 mm (Stazione di Palermo: 229,6 mm; Stazione di Misilmeri: 207,2 mm; Stazione di Monreale: 212,6), risulta molto elevato; ed ancora più significativo è il confronto con gli altri dati del campione, in quanto tale piovosità mensile è superata soltanto da quella registrata nel 2009 ed è pari a circa il doppio del valore medio del campione esaminato, pari a:

- 107,3 mm, per la Stazione di Palermo;

- 92,8 mm, per la Stazione di Misilmeri;
- 120,3 mm, per la Stazione di Monreale.

Solo per inciso si evidenzia che le straordinarie piogge dell'autunno 2009 provocarono in tutta la Sicilia Settentrionale gravissimi e diffusi eventi franosi, che causarono anche vittime (Giampileri e Scaletta Zanclea), la distruzione di interi quartieri e la perdita delle abitazioni per diverse centinaia di residenti (San Fratello, Caronia, Sfaranda, Ucria).

In definitiva, sulla base dell'analisi dei dati pluviometrici è possibile concludere che è assai possibile una relazione eziologica tra gli eventi meteorici parossistici verificatisi nell'ottobre 2021 e il crollo del giorno 1 novembre 2021.

7.4 Condizioni di stabilità del costone lapideo in studio

Come già evidenziato nei capitoli 3 e 5, le pareti rocciose in argomento sono caratterizzate da litologie carbonatiche: la genesi delle rocce sedimentarie fa sì che in esse siano presenti superfici che interrompono la continuità della deposizione (piani di stratificazione). Inoltre, queste rocce sono state “*trasportate*” in luoghi differenti dai loro ambienti di formazione attraverso movimenti dovuti ai processi tettonici, che hanno contribuito alla formazione di ulteriori interruzioni della continuità interna alla roccia (giunti e faglie). Infine, nelle rocce possono esplicarsi processi di alterazione e degradazione, ad opera di agenti esogeni, che esaltano la presenza e gli effetti delle superfici di discontinuità.

Per tale ragione, nello studio di problemi di stabilità di versanti lapidei si fa riferimento al cosiddetto *ammasso roccioso*, inteso come matrice lapidea solcata da superfici di discontinuità (struttura). Queste ultime determinano un comportamento meccanico di tipo prevalentemente anisotropo e, per il fatto di essere spesso costituite da roccia degradata o riempite con materiale di scadenti proprietà di resistenza e deformabilità, costituiscono zone di debolezza meccanica dell'ammasso roccioso, in quanto in loro corrispondenza la roccia presenta resistenza a trazione bassa o nulla. In particolare, la presenza di superfici di discontinuità all'interno di un ammasso roccioso ne condiziona in maniera significativa il comportamento meccanico; infatti esse, interagendo le une con le altre, gli conferiscono una configurazione “*a blocchi*” (fig. 10) come indicato nei capitoli precedenti. In tali condizioni, il comportamento a rottura dell'ammasso roccioso è “*rigido-discontinuo*”, ossia i fenomeni di rottura, riguardanti

singoli massi indeformabili, possono verificarsi esclusivamente lungo le discontinuità. I possibili cinematismi dei blocchi lapidei dipendono dall'orientazione mutua tra i giunti presenti nell'ammasso roccioso, riconducibili a un numero limitato di "famiglie" principali, le cui caratteristiche di orientazione nello spazio sono legate alle vicissitudini geologiche che le hanno generato. I cinematismi che i singoli blocchi possono subire sono evidenziati nella fig. 29, dove vengono posti in relazione ai diagrammi isofrequenziali ed ai meridiani rappresentativi delle superfici di discontinuità presenti nell'ammasso roccioso.

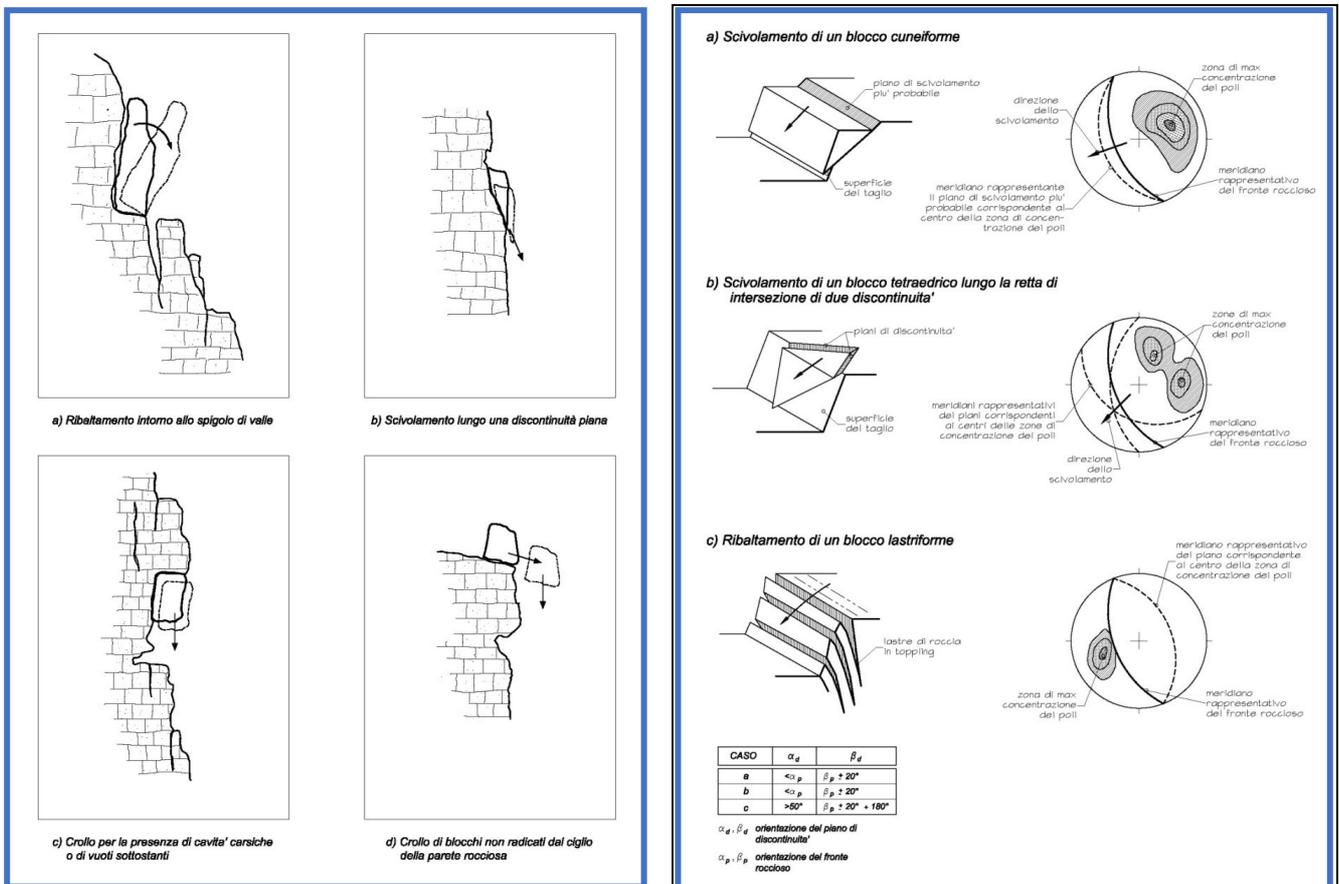


Fig. 29 - Cinematismi in relazione all'orientazione delle discontinuità rispetto al fronte

Va, tuttavia, specificato che in letteratura il cinematismo di "toppling" viene considerato soltanto nel caso in cui la forza peso sia squilibrante, come nel primo schema della fig. 30, fenomeno associato alla presenza di superfici di discontinuità subverticali, subparallele al fronte ed inclinate a "reggipoggio" rispetto al fronte medesimo. Nella realtà, per la presenza di altre forze squilibranti, quali la forzante sismica e/o la spinta dell'acqua di saturazione dell'eventuale materiale di riempimento del giunto che delimita posteriormente il masso, anche superfici di

discontinuità subverticali inclinate a “*frapoggio*” rendono cinematicamente e meccanicamente possibile il ribaltamento del masso (secondo schema di fig. 30). Tale meccanismo è ancora più probabile in presenza di rocce con livelli meno cementati: in questi casi, infatti, i fenomeni di erosione selettiva sviluppati dagli agenti esogeni proprio in corrispondenza dei livelli meno resistenti possono determinare scavarnamenti sotto i blocchi, che rimangono in una configurazione “*a sbalzo*”, modificando l’azione della forza peso, al punto che il suo momento rispetto all’asse di rotazione diviene squilibrante (terzo schema di fig. 30).

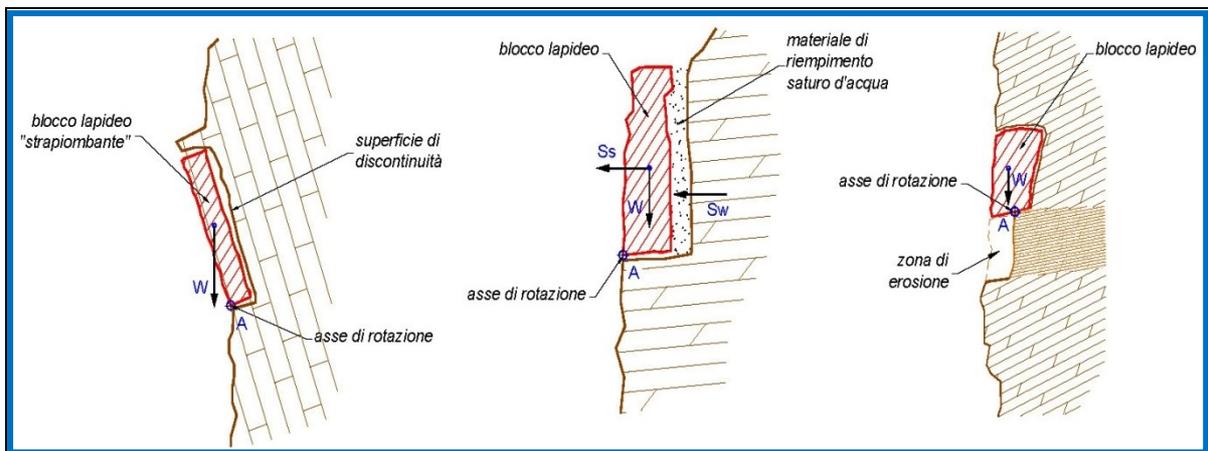


Fig. 30 - Toppling in ammassi rocciosi fessurati (Cafiso F. – Corso di geotecnica – UNIPA)

Inoltre, il cinematicismo di scorrimento (*sliding*) può verificarsi lungo una superficie di discontinuità (*plane failure* - fig. 31) ovvero lungo la retta di intersezione di due giunti (*wedge failure* - fig. 32).

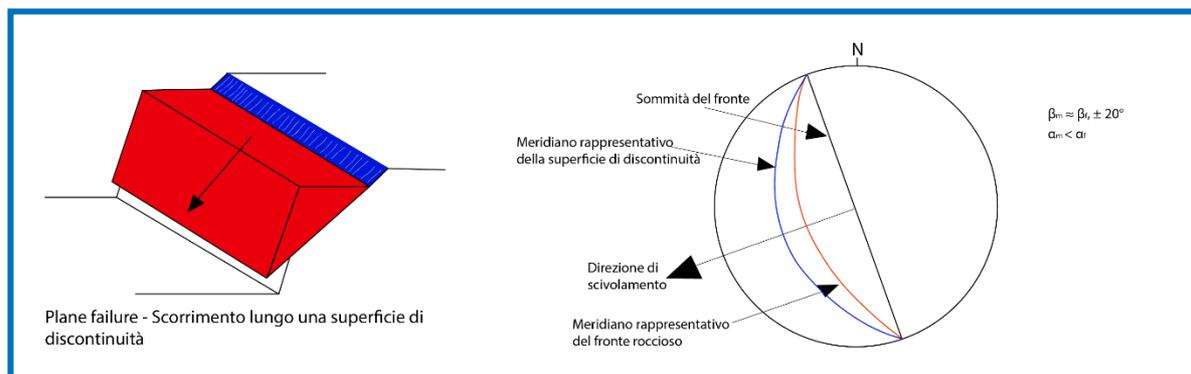


Fig. 31 - Cinematismo di plane failure

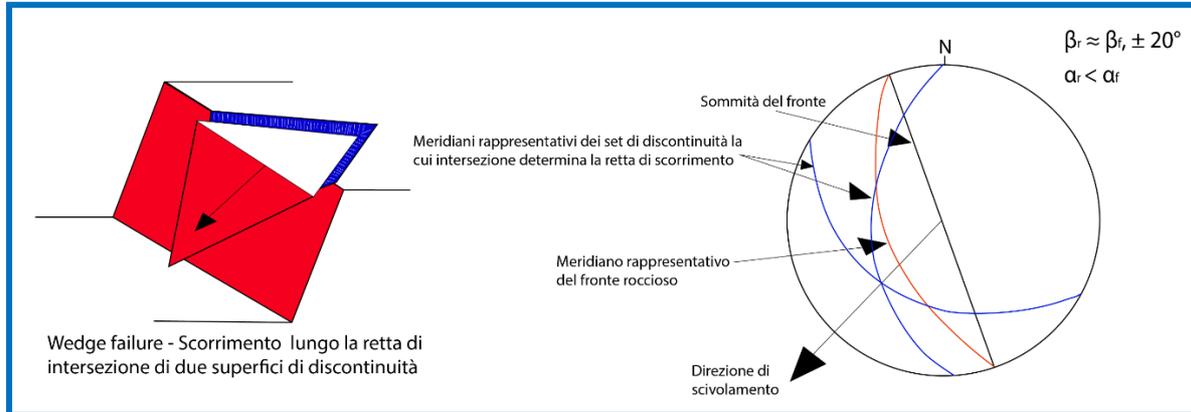


Fig. 32 - Cinematismo di wedge failure

Per quanto attiene il cinematismo di crollo, rigorosamente inteso come traslazione del masso lungo una discontinuità subverticale (*falling*), esso è possibile per i blocchi “a sbalzo”, privi delle base di appoggio; tale configurazione si può verificare per la presenza di cavità, per gli effetti dei citati fenomeni di erosione selettiva ovvero per il crollo del masso sottostante (schemi di fig. 33).

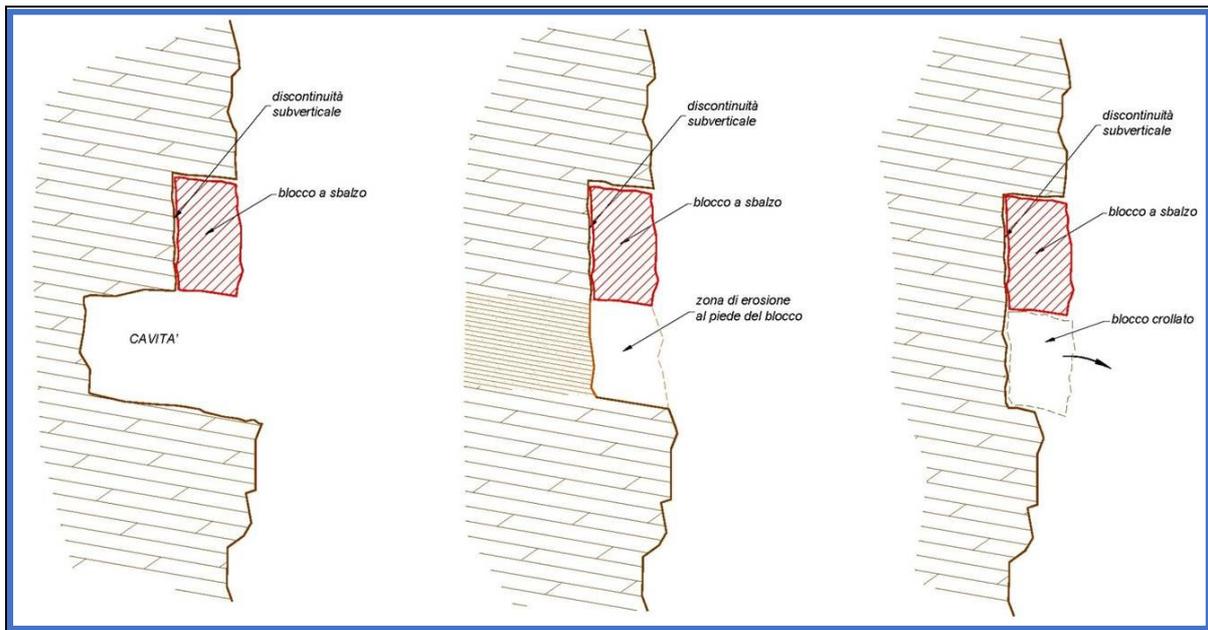


Fig. 33 - Falling in ammassi rocciosi fessurati (Cafiso F. – Corso citato)

Infine, nella tab. II sono evidenziate le possibilità cinematiche in funzione delle caratteristiche di orientazione delle discontinuità (con pedice *d*) rispetto a quelle del fronte (con pedice *f*), mentre con il pedice *r* si indicano le caratteristiche di orientazione della retta di intersezione di due giunti.

Cinematismo	Condizione cinematica
Sliding plane failure (fig. 31)	$\alpha_d \leq \alpha_f$; $\beta_d = \beta_f \pm 20^\circ$
Sliding wedge failure (fig. 32)	$\alpha_r \leq \alpha_f$; $\beta_r = \beta_f \pm 20^\circ$
Toppling da letteratura (fig. 30a)	$\alpha_d \geq 60^\circ$; $\beta_d = \beta_f \pm 180^\circ \pm 20^\circ$
Toppling non da letteratura (fig. 30b,c)	$\alpha_d \geq 75^\circ$; $\beta_d = \beta_f \pm 20^\circ$

Tab. II - Condizioni cinematiche

Nel caso specifico, per individuare i cinematismi possibili nel costone carbonatico in studio, i meridiani rappresentanti le n°5 famiglie di discontinuità presenti nell'ammasso roccioso individuate con il rilievo geostrutturale (v. paragrafo 6.4) sono stati messi a confronto, nel diagramma circolare di Wulf di fig. 34, con quelli rappresentativi dei n°3 differenti fronti che inviluppano il costone, caratterizzati dai parametri di orientazione appresso indicati:

- **fronte a:** $\alpha = 85^\circ$ $\beta = 325^\circ$ (tratto di costone lapideo che si affaccia a nord-ovest);
- **fronte b:** $\alpha = 85^\circ$ $\beta = 35^\circ$ (tratto di costone lapideo che si affaccia a nord);
- **fronte c:** $\alpha = 85^\circ$ $\beta = 70^\circ$ (tratto di costone lapideo che si affaccia a nord-est).

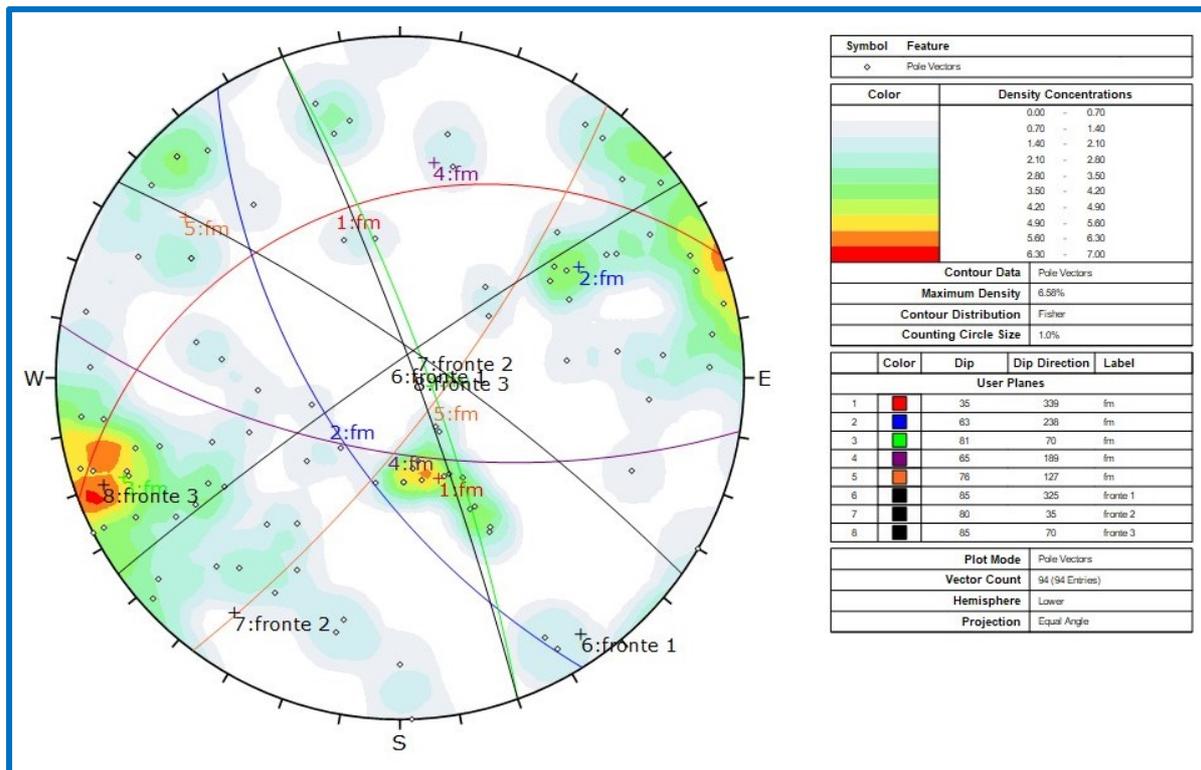


Fig. 34 - Stereogramma di Wulf con i meridiani rappresentativi delle famiglie di discontinuità e dei fronti

Tenendo conto delle condizioni cinematiche riportate nella tab. II, delle caratteristiche di orientazione dei n°3 fronti, innanzi indicate e dei parametri di orientazione delle n°5 famiglie di discontinuità, riportate nel paragrafo 6.4, nel costone lapideo in studio risultano possibili i cinematismi appresso evidenziati:

1. fronte a

- *sliding plane failure* (fig. 31), di blocchi cuneiformi o prismatici lungo i piani di stratificazione della famiglia 1;
- *toppling da letteratura* (fig. 30a) di elementi lapidei lastriformi delimitati posteriormente da giunti della famiglia 5.

2. fronte b

- *sliding wedge failure* (fig. 32), di blocchi tetraedrici lungo la retta di intersezione di superfici di discontinuità appartenenti alle famiglie 1 e 5;
- *toppling da letteratura* (fig. 30a) di elementi lapidei lastriformi delimitati posteriormente da giunti della famiglia 2.

3. fronte c

- *sliding plane failure* (fig. 31), di blocchi cuneiformi o prismatici lungo i piani di stratificazione della famiglia 3;
- *toppling da letteratura* (fig. 30a) di elementi lapidei lastriformi delimitati posteriormente da giunti della famiglia 2;
- *toppling non da letteratura* (fig. 30b, c) di elementi lapidei lastriformi delimitati posteriormente da giunti della famiglia 3.

In corrispondenza di tutti i fronti, inoltre, può verificarsi il *falling* di blocchi lapidei a sbalzo. Va rilevato che il *plane failure* sul *fronte a* e il *wedge failure* sul *fronte b* non sono meccanicamente possibili per via della modesta inclinazione del piano di scivolamento potenziale ($\leq 35^\circ$) in relazione alla resistenza al taglio della roccia lungo le discontinuità. Tutti gli altri cinematismi sopra indicati, in presenza di particolari condizioni di carico (sisma; spinta dell'acqua di saturazione del materiale di riempimento presente nelle discontinuità) sono meccanicamente possibile e, pertanto, sul costone lapideo in argomento possono verificarsi fenomeni di rottura, come del resto avvenuto in data 1 novembre 2021 e come previsto nel P.A.I. che, come già osservato, individua una pericolosità P4 per il costone lapideo in argomento e per l'area in studio in generale.

7.5 Elementi lapidei in equilibrio instabile individuati nel costone lapideo

Le considerazioni precedentemente illustrate riguardanti i cinematismi e meccanismi di rottura possibili nel costone roccioso in studio e, quindi, la relativa pericolosità intesa come probabilità di crollo, trovano riscontro con quanto ottenuto mediante i rilievi effettuati con le ispezioni dirette dei fronti rocciosi e con il drone.

In particolare, come già anticipato al paragrafo 6.3, i rocciatori hanno individuato n°8 elementi lapidei in equilibrio instabile, ai quali sono state attribuite le sigle M1, ..., M8; ulteriori n°19 elementi lapidei in equilibrio instabile, identificati con le sigle B1, ..., B19, sono stati individuati dallo scrivente esaminando le immagini acquisite mediante il drone. Va rilevato che la ricerca ha riguardato massi di volume superiore ai 2 m³, in quanto il costone lapideo è puntellato da moltissimi blocchi di volume inferiore a quello innanzi indicato. Inoltre, si mette in evidenza che, nel caso dei gruppi di blocchi, le volumetrie complessive superano anche i 1.000 m³ e ciò è in linea con il fenomeno franoso del giorno 1 novembre 2021. Nella fig. 35 è indicata l'ubicazione dei n°27 elementi lapidei (costituiti da un unico blocco roccioso o da gruppi di massi) sul costone lapideo in studio; la diversa colorazione distingue gli elementi lapidei individuati con le ispezioni dirette (in giallo) e con il drone (in rosso).

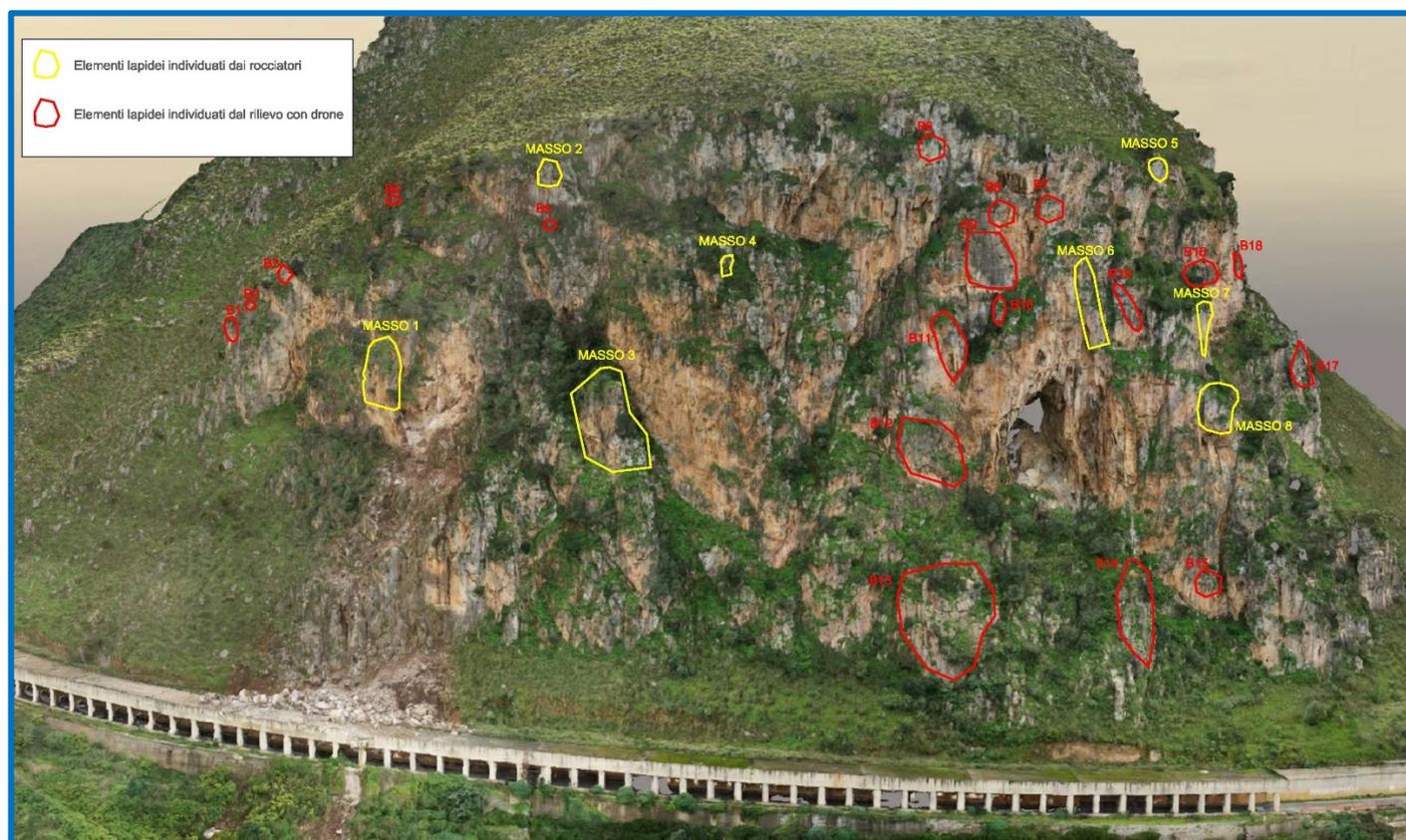


Fig. 35 - Ubicazione degli elementi lapidei di volume superiore a 2 m³ sul costone roccioso

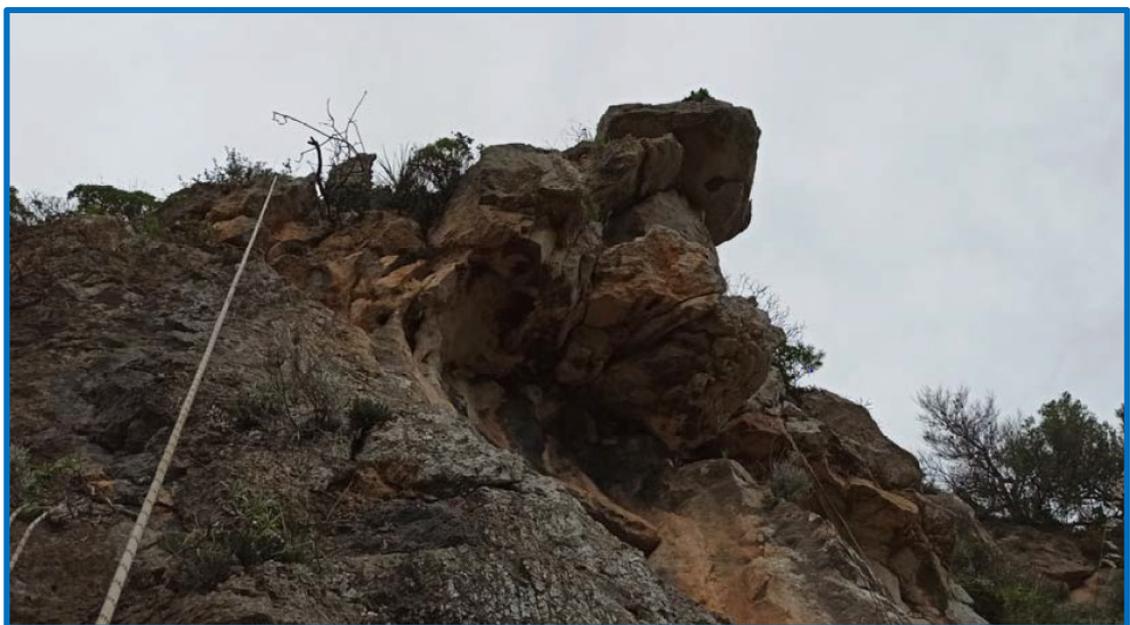
Nella tab. III sono riportate le caratteristiche geometriche e geostrutturali degli elementi lapidei indicati nella fig. 35. In particolare, in tale tabella, in corrispondenza di ciascun elemento lapideo, sono indicati:

- le dimensioni medie altezza H, larghezza L e spessore s (dimensione ortogonale al fronte);
- il volume V e il peso $W = \gamma \times V$, con $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$ = peso dell'unità di volume della roccia carbonatica;
- il possibile cinematismo;
- l'inclinazione α delle superfici di discontinuità lungo le quali può avvenire lo scorrimento.

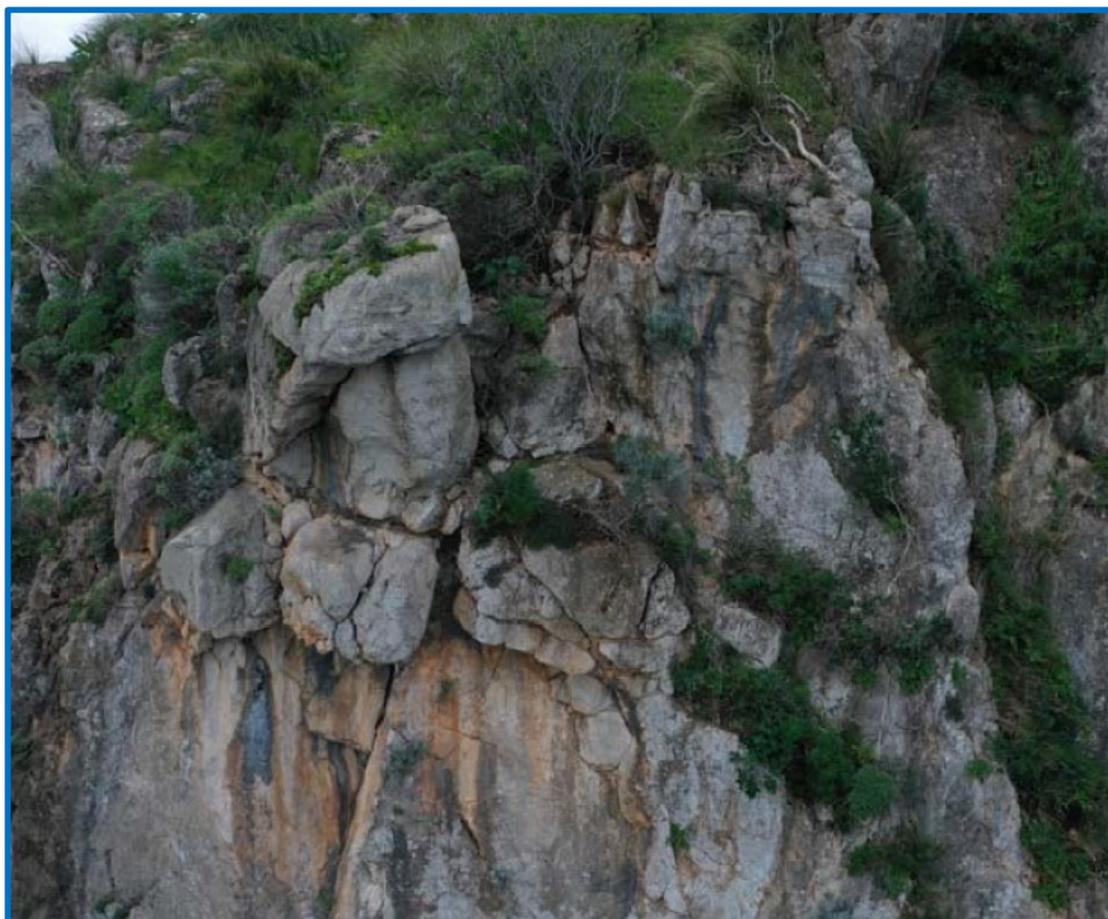
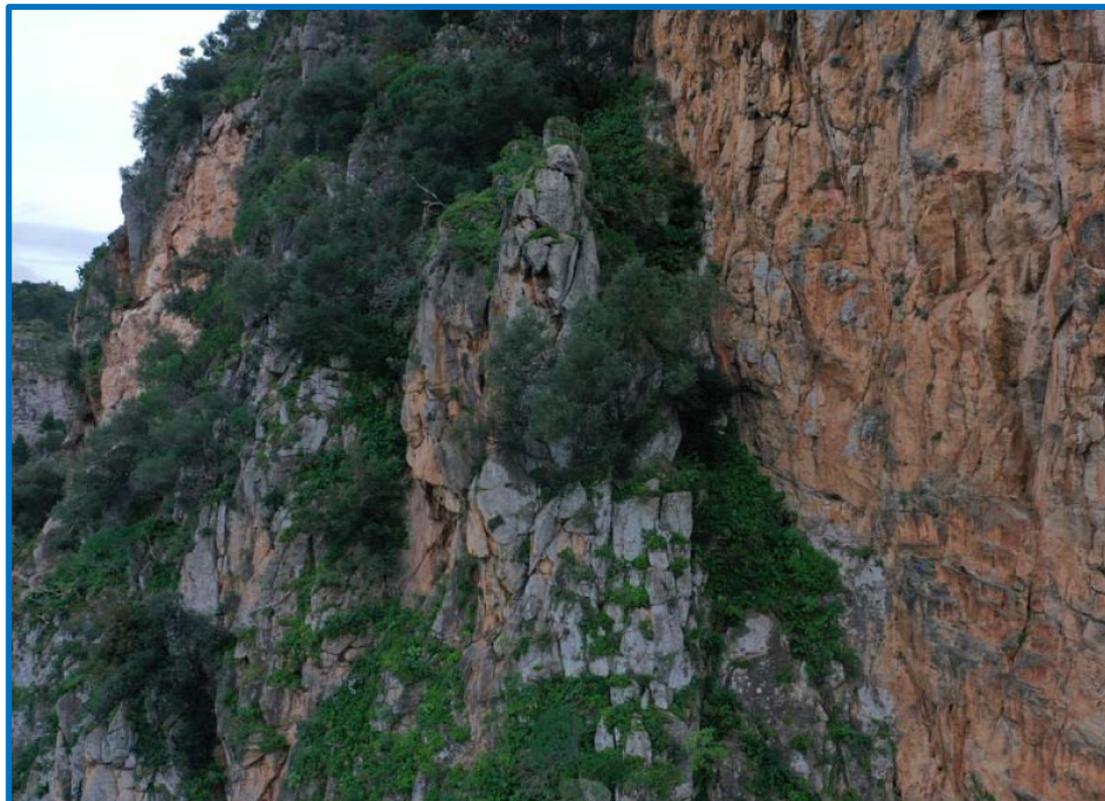
Elemento Lapideo	H (m)	L (m)	s (m)	V (m ³)	W (kN)	Cinematismo
B1	4,5	5,0	2,8	63,0	1701,0	crollo singoli massi - toppling
B2	2,0	1,4	0,7	2,0	52,9	toppling
B3	3,2	5,0	0,5	8,0	216,0	toppling
B4	5,0	4,0	1,0	20,0	540,0	sliding $\alpha = 65^\circ$
B5	3,0	4,0	1,6	19,2	518,4	toppling
B6	5,0	2,0	1,5	15,0	405,0	toppling
B7	5,0	2,5	1,4	17,5	472,5	toppling
B8	2,4	3,8	0,9	8,2	221,6	toppling
B9	10,0	10,0	1,0	100,0	2700,0	toppling
B10	5,0	2,0	2,0	20,0	540,0	toppling
B11	12,0	5,0	3,0	180,0	4860,0	crollo singoli massi - toppling
B12	9,4	7,5	1,7	119,9	3236,0	sliding $\alpha = 65^\circ$
B13	22,0	13,0	4,0	1144,0	30888,0	crollo singoli massi
B14	21,3	9,0	5,0	958,5	25879,5	crollo singoli massi
B15	3,9	1,5	1,0	5,9	158,0	toppling
B16	3,8	7,5	1,0	28,5	769,5	toppling
B17	8,2	6,2	5,0	254,2	6863,4	crollo singoli massi
B18	5,8	3,5	1,8	36,5	986,6	toppling
B19	13,3	2,4	1,8	57,5	1551,3	toppling
M1	10,0	5,0	2,0	100,0	2700,0	crollo singoli massi - toppling
M2	4,0	2,5	2,0	20,0	540,0	crollo singoli massi - toppling
M3	20,0	10,0	7,0	1400,0	37800,0	crollo singoli massi - toppling
M4	4,0	2,4	2,1	20,2	544,3	crollo singoli massi - toppling
M5	5,0	3,8	5,0	95,0	2565,0	toppling - sliding $\alpha = 55^\circ$
M6	20,0	2,0	1,7	68,0	1836,0	toppling
M7	9,3	4,2	2,8	109,4	2952,9	toppling
M8	10,0	5,5	3,5	192,5	5197,5	toppling

Tab. III - Caratteristiche geometriche e cinematismi degli elementi lapidei

Nelle figg. 36, ..., 41 si riportano immagini relative ad alcuni degli elementi lapidei in argomento, dalle quali risultano evidenti le precarie condizioni di equilibrio e i grandi volumi in gioco.



Figg. 36, 37 - Elementi lapidei in equilibrio instabile sul costone roccioso



Figg. 38, 39 - Elementi lapidei in equilibrio instabile sul costone roccioso



Figg. 40, 41 - Elementi lapidei in equilibrio instabile sul costone roccioso

8 - INTERVENTI PREVISTI

8.1 Strategia generale

Nel capitolo precedente sono state illustrate le gravissime condizioni di stabilità del costone lapideo in studio, nel quale sono presenti moltissimi massi in equilibrio precario di cui n°27 di notevoli dimensioni, anche di volume dell'ordine delle centinaia di metri cubi e, nel caso degli elementi lapidei costituiti da gruppi di massi, addirittura di volume superiore a 1.000 m³, esattamente come l'elemento lapideo crollato in data

1 novembre 2021 (v. tab. III). Inoltre, è stato verificato che un tratto della S.P.37 della lunghezza di circa 70 m, ubicato all'estremità della zona in studio lato Palermo, è sotteso al costone lapideo in studio ma sprovvisto dell'opera di difesa passiva costituita dalla galleria paramassi.

Premesso quanto innanzi, sono stati progettati interventi con la finalità di:

1. garantire la sicurezza delle maestranze che saranno impegnate nei lavori di ripristino e consolidamento del tratto di galleria paramassi danneggiato dal recente crollo;
2. incrementare il grado di sicurezza per i fruitori della S.P.37 nel tratto in cui essa si sviluppa alla base del costone lapideo in studio rispetto alla condizione prima del crollo del giorno 1 novembre 2021.

L'obiettivo di cui al punto 1. è evidente, in quanto le maestranze opereranno senza la protezione della galleria paramassi, sia per asportare il materiale depositatosi sulla stessa a seguito del crollo, sia in quanto nel tratto da ripristinare e consolidare la galleria paramassi allo stato attuale non è in grado di esercitare una reale protezione a causa dei danni subiti. Del resto, è principalmente per tale ragione che la Città Metropolitana di Palermo ha affidato incarico allo scrivente di redigere il presente progetto.

Meno evidente potrebbe risultare l'obiettivo di cui al punto 2. e, pertanto, si ritiene necessario approfondire tale aspetto, che coinvolge due distinte problematiche, riguardanti il tratto di S.P.37 che si sviluppa all'interno della galleria paramassi, di lunghezza pari a circa 300 m, e il segmento, di sviluppo pari a 70 m, che invece corre alla base del costone in studio senza alcuna protezione.

Con riferimento alla prima problematica, si rileva che le dimensioni della quasi totalità dei singoli elementi lapidei riportati in tab.III sono tali che, in caso di crollo, potrebbero distruggere o danneggiare seriamente la galleria paramassi che, pertanto, pur essendo di grandissima importanza ed efficacia, non è esaustiva a garantire il transito in sicurezza lungo il tratto della S.P.37 in studio. Del resto, tale osservazione è confermata da quanto avvenuto in data 1 novembre 2021.

L'altra problematica riguarda il tratto all'estremità lato Palermo della S.P.37 che, come evidenziato, è privo di qualunque protezione nei confronti della caduta massi, per il quale il vigente P.A.I. segnala condizioni di rischio geomorfologico R3 elevato.

In definitiva, con gli interventi previsti nel presente progetto, illustrati nei paragrafi seguenti e negli elaborati A3, A4, A5, A6, ai quali si rinvia per i dettagli:

1. si garantisce la sicurezza delle maestranze che saranno impegnate nei lavori di ripristino e consolidamento del tratto danneggiato della galleria paramassi;
2. si incrementano le condizioni di sicurezza per i fruitori della S.P.37, rispetto alla condizione prima del crollo, in corrispondenza del tratto in cui la strada provinciale si sviluppa all'interno della galleria paramassi;
3. si garantisce la sicurezza per i fruitori della S.P.37 in corrispondenza del tratto in cui la strada provinciale è priva di difesa passiva e, quindi, attualmente soggetta a rischio geomorfologico elevato.

E' evidente che, per incrementare le condizioni di sicurezza per il tratto di S.P. 37 in galleria, è sufficiente consolidare gli elementi lapidei di maggiori dimensioni che, in caso di crollo, a causa dell'elevata energia posseduta, potrebbero distruggere o danneggiare gravemente la galleria, funzionale nel proteggere l'arteria stradale nei confronti di eventuali crolli dei numerosi massi di piccole e medie dimensioni presenti sul costone lapideo. Laddove, invece, la galleria paramassi non esiste (tratto di estremità lato Palermo) o nel transitorio in cui essa non è efficace perché seriamente danneggiata, gli interventi devono essere finalizzati al consolidamento diffuso dell'ammasso roccioso, anche dei blocchi di volumetria media e piccola.

Di conseguenza sono stati distinti interventi *“di carattere esteso”*, in quanto riguardano tratti estesi dei fronti lapidei, e *“di carattere puntuale”*, relativi a singoli elementi lapidei, sui quali si riferisce, rispettivamente nei due paragrafi che seguono.

8.2 Interventi di carattere esteso

Gli interventi *“di carattere esteso”* previsti in progetto sono indicati, sulla vista frontale e sulla ortofoto, nelle figg. 42 e 42bis: essi interesseranno due distinte fasce del costone roccioso in studio e, precisamente:

- la fascia incumbente direttamente sul tratto di galleria danneggiata dal crollo del giorno 1 novembre 2021, dalla quale possono distaccarsi massi in grado di raggiungere tale tratto di S.P.37;
- la fascia incumbente sul tratto della strada provinciale che si sviluppa alla base del costone carbonatico in argomento, ma senza la protezione della galleria paramassi.

Progetto definitivo degli interventi di mitigazione del rischio geomorfologico per il tratto della SP 37 che si sviluppa lungo a galleria artificiale danneggiata dal crollo verificatosi in data 1 novembre 2021
R1 - Relazione generale

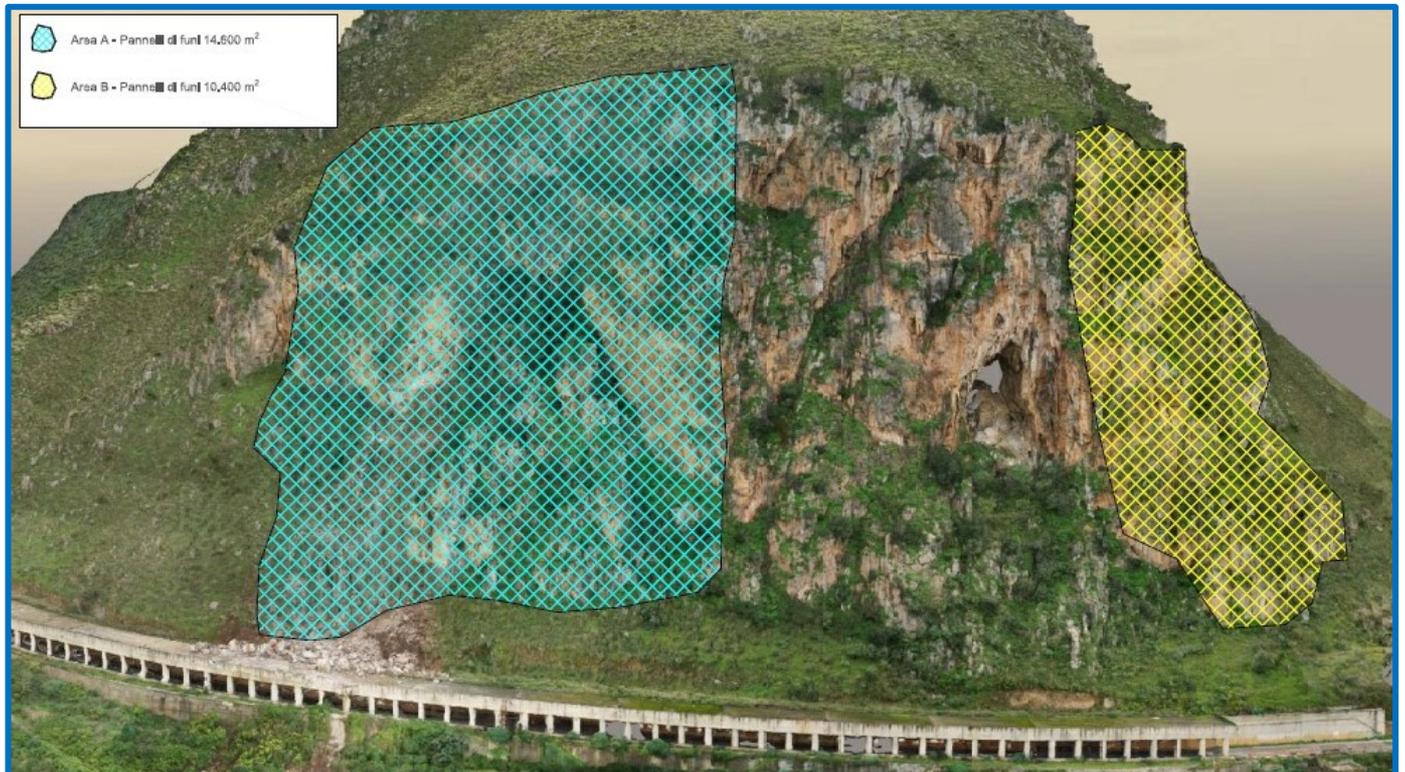


Fig. 42 - Ubicazione degli Interventi di carattere esteso sul costone lapideo in studio (vista frontale)

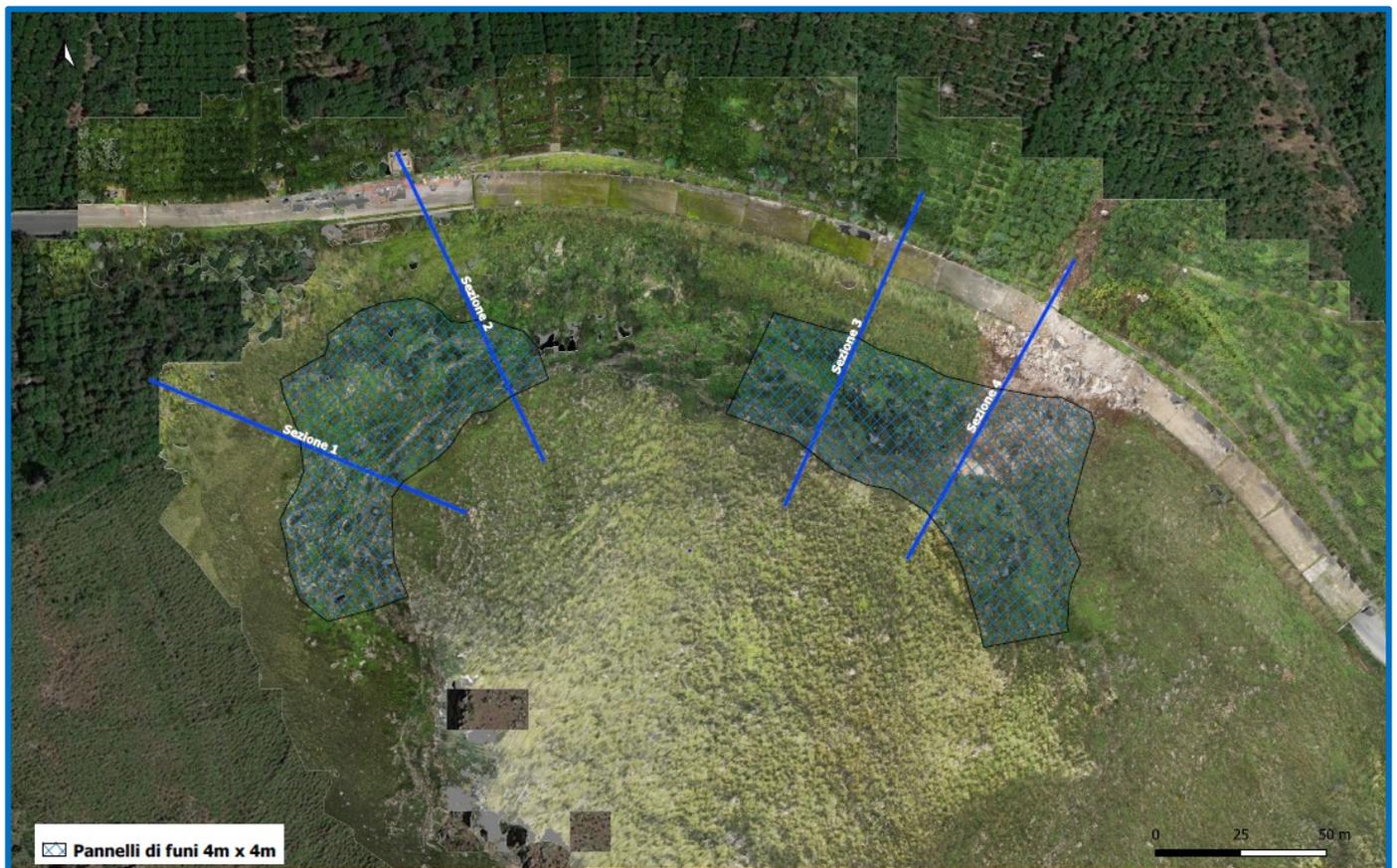


Fig. 42bis - Ubicazione degli Interventi di carattere esteso sul costone lapideo in studio (ortofoto)

Tali interventi, unitamente a quelli di carattere puntuale su cui si riferisce nel paragrafo successivo, garantiranno:

1. condizioni di sicurezza alle maestranze impegnate nei lavori di ripristino e consolidamento della galleria paramassi nel periodo transitorio pari alla durata di tali lavori;
2. **la mitigazione dell'attuale rischio geomorfologico elevato per il tratto della S.P. 37 privo di galleria paramassi.**

L'intervento di tipo attivo previsto comprende **l'applicazione di pannelli di funi di acciaio** del diametro di 8 mm ad alta resistenza, con fune perimetrale del diametro di 16 mm e ancoraggi, posti ai vertici di ciascun pannello, del tipo "a bulbo iniettato" con armatura in barre di acciaio B450C zincate del diametro di 24 mm della lunghezza di 6 m (figg. 43, 44 e 45).

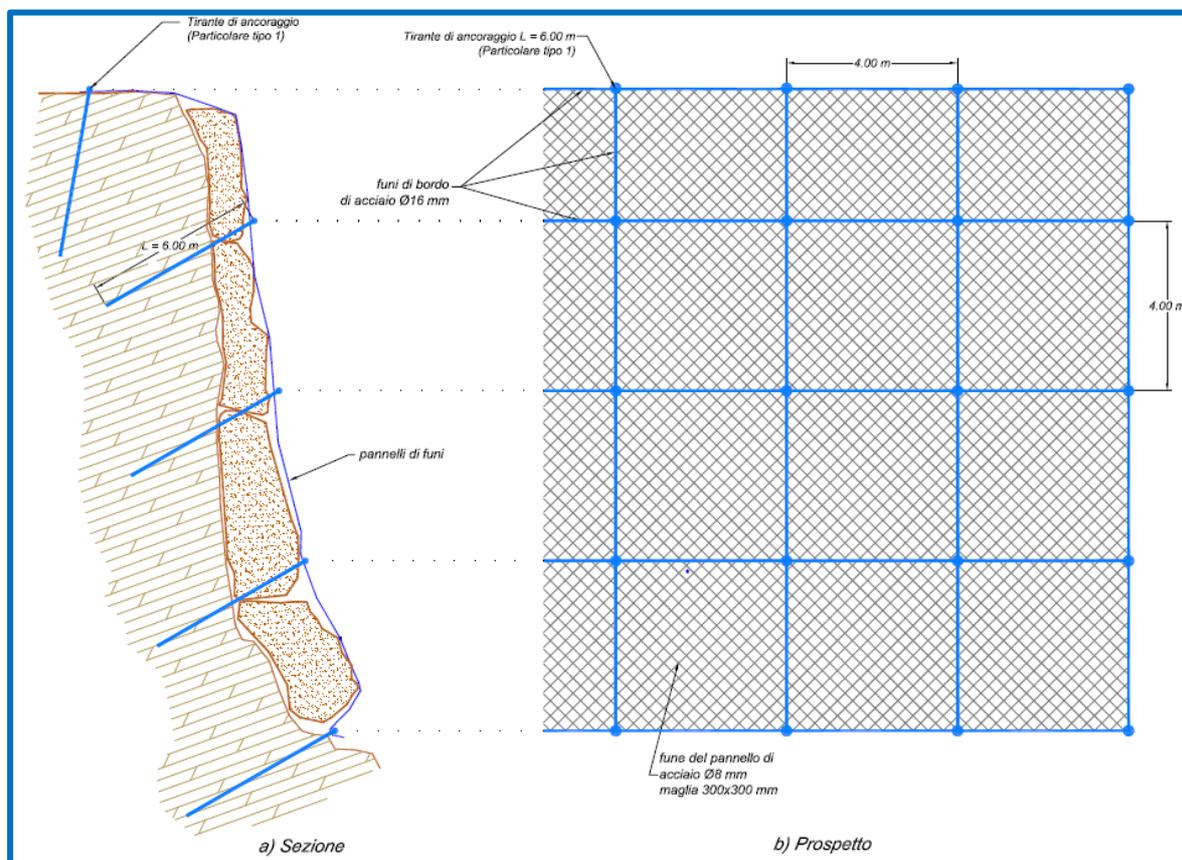


Fig. 43 - Intervento tipo con pannelli di funi

Come indicato in fig. 44, la fune perimetrale di ciascun pannello, da porre in opera dopo i pannelli, garantirà il collegamento dei pannelli adiacenti e di ciascuno di essi agli ancoraggi.

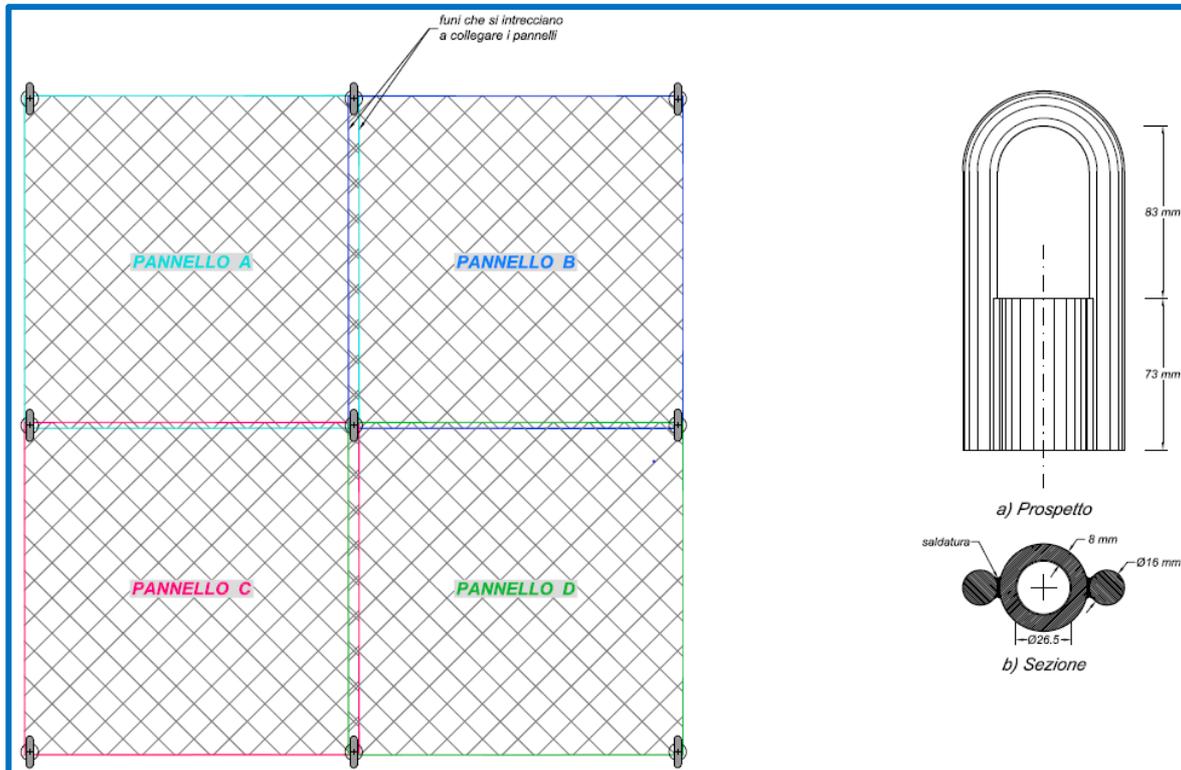


Fig. 44 - Particolare dei collegamenti tra i singoli pannelli e delle funi agli ancoraggi

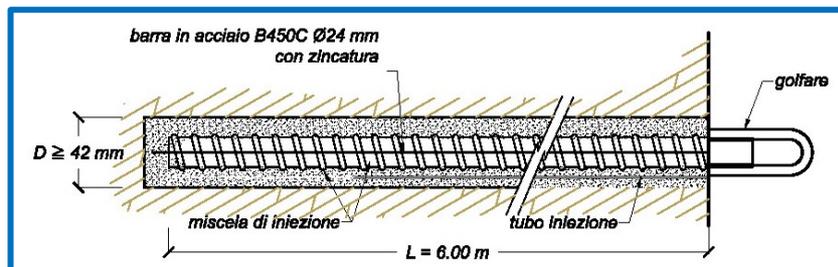


Fig. 45 - Particolare dell'ancoraggio dei pannelli di funi

Mediante il rilievo topografico eseguito con il sistema S.A.P.R. sono state valutate le superfici delle fasce del costone carbonatico su cui applicare i pannelli; tali superfici sono state, quindi, incrementate del 20% per tenere conto degli aggetti dei massi. Le quantità così individuate sono indicate in fig. 42 e negli elaborati grafici (A3) e contabili (E3) di progetto, ai quali si rinvia.

8.3 Interventi di carattere puntuale

Gli interventi di carattere puntuale sono finalizzati al consolidamento degli elementi lapidei in equilibrio instabile individuati con l'ispezione diretta del fronte roccioso e mediante il modello 3D ottenuto dall'elaborazione del rilievo eseguito con il drone. Va rilevato che per tre di tali elementi lapidei (B15, B17, M4), che ricadono nelle fasce

su cui saranno realizzati gli interventi *di carattere esteso*, su cui si è riferito nel paragrafo precedente, non sono stati previsti ulteriori interventi *di carattere puntuale* in quanto i primi sono sufficienti per la relativa stabilizzazione.

Gli interventi previsti sono indicati in fig. 46 e in tab. IV, oltre che negli elaborati grafici di progetto A5 e A6, ai quali si rimanda per i dettagli.



Fig. 46 - Interventi di carattere puntuale sul costone lapideo in studio

Gli interventi puntuali, oltre a garantire unitamente a quelli *di carattere esteso* i vantaggi innanzi illustrati per le maestranze nel periodo del loro impiego per riparare i danni provocati dal crollo in argomento e per il tratto della S.P.37 privo di galleria paramassi, **determineranno la mitigazione del rischio geomorfologico per il tratto della strada provinciale che si sviluppa all'interno della galleria, in quanto consentiranno la stabilizzazione degli elementi lapidei che, in caso di crollo, potrebbero distruggere o danneggiare gravemente l'opera di difesa passiva esistente.**

Gli interventi previsti rientrano in varie tipologie, sulla base delle specifiche caratteristiche geostrutturali degli elementi lapidei in equilibrio instabile. In particolare, nel caso degli elementi lapidei costituiti da un insieme di massi, si è fatto

riferimento al medesimo intervento con i pannelli di funi descritto al paragrafo precedente (figg. 43, 44 e 45).

Elemento Lapideo	H (m)	L (m)	s (m)	V (m ³)	W (kN)	Cinematismo	Intervento esteso	Intervento puntuale
B1	4,5	5,0	2,8	63,0	1701,0	crollo singoli massi - toppling	-	n°6 pannelli di funi - Tipo A
B2	2,0	1,4	0,7	2,0	52,9	toppling	-	imbracatura a 2 livelli - Tipo B
B3	3,2	5,0	0,5	8,0	216,0	toppling	-	imbracatura a 2 livelli - Tipo B
B4	5,0	4,0	1,0	20,0	540,0	sliding $\alpha = 65^\circ$	-	imbracatura a 2 livelli- Tipo B
B5	3,0	4,0	1,6	19,2	518,4	toppling	pannelli di funi	imbracatura a 2 livelli- Tipo B
B6	5,0	2,0	1,5	15,0	405,0	toppling	-	imbracatura a 2 livelli- Tipo B
B7	5,0	2,5	1,4	17,5	472,5	toppling	-	imbracatura a 2 livelli- Tipo B
B8	2,4	3,8	0,9	8,2	221,6	toppling	-	imbracatura a 2 livelli- Tipo B
B9	10,0	10,0	1,0	100,0	2700,0	toppling	-	imbracatura a 2 livelli + placcaggio con 6 tiranti - Tipo B+C
B10	5,0	2,0	2,0	20,0	540,0	toppling	-	imbracatura a 2 livelli- Tipo B
B11	12,0	5,0	3,0	180,0	4860,0	crollo singoli massi - toppling	-	n°6 pannelli di funi- Tipo A
B12	9,4	7,5	1,7	119,9	3236,0	sliding $\alpha = 65^\circ$	-	placcaggio con 8 tiranti- Tipo C
B13	22,0	13,0	4,0	1144,0	30888,0	crollo singoli massi	-	n°30 pannelli di funi- Tipo A
B14	21,3	9,0	5,0	958,5	25879,5	crollo singoli massi	-	n°24 pannelli di funi- TipoA
B15	3,9	1,5	1,0	5,9	158,0	toppling	pannelli di funi	-
B16	3,8	7,5	1,0	28,5	769,5	toppling	pannelli di funi	imbracatura a 2 livelli + placcaggio con 4 tiranti - Tipo B+C
B17	8,2	6,2	5,0	254,2	6863,4	crollo singoli massi	pannelli di funi	-
B18	5,8	3,5	1,8	36,5	986,6	toppling	pannelli di funi	imbracatura a 3 livelli - Tipo B
B19	13,3	2,4	1,8	57,5	1551,3	toppling	pannelli di funi	imbracatura a 5 livelli - Tipo B
M1	10,0	5,0	2,0	100,0	2700,0	crollo singoli massi - toppling	pannelli di funi	imbracatura a 3 livelli - Tipo B
M2	4,0	2,5	2,0	20,0	540,0	crollo singoli massi - toppling	pannelli di funi	demolizione massa (3,8 m ³) + imbracatura a 2 livelli - Tipo B+D
M3	20,0	10,0	7,0	1400,0	37800,0	crollo singoli massi - toppling	pannelli di funi	imbracatura a 6 livelli - Tipo B
M4	4,0	2,4	2,1	20,2	544,3	crollo singoli massi - toppling	pannelli di funi	-
M5	5,0	3,8	5,0	95,0	2565,0	toppling - sliding $\alpha = 55^\circ$	pannelli di funi	imbracatura a 3 livelli con funi doppie - Tipo B
M6	20,0	2,0	1,7	68,0	1836,0	toppling	-	imbracatura a 4 livelli - Tipo B
M7	9,3	4,2	2,8	109,4	2952,9	toppling	pannelli di funi	imbracatura a 3 livelli - Tipo B
M8	10,0	5,5	3,5	192,5	5197,5	toppling	pannelli di funi	imbracatura a 4 livelli con funi doppie - Tipo B

Tab. IV - Interventi di carattere puntuale in corrispondenza dei singoli elementi lapidei

Nei casi in cui gli elementi lapidei sono costituiti da singoli blocchi monoliti, in generale ne è stata prevista è stata prevista **l'imbracatura mediante funi in acciaio zincato ϕ 16 mm ancorate a tiranti del tipo "a bulbo iniettato"** con armatura in barra di acciaio ad alta resistenza del diametro di 26,5 mm e della lunghezza di 6 m (di cui 3 m di ancoraggio fisso), posti ai lati dei blocchi, nella roccia stabile, dotati di golfare a estremità per alloggiare le funi (figg. 47 e 48). In due casi (M5, M8) si utilizzeranno funi doppie.

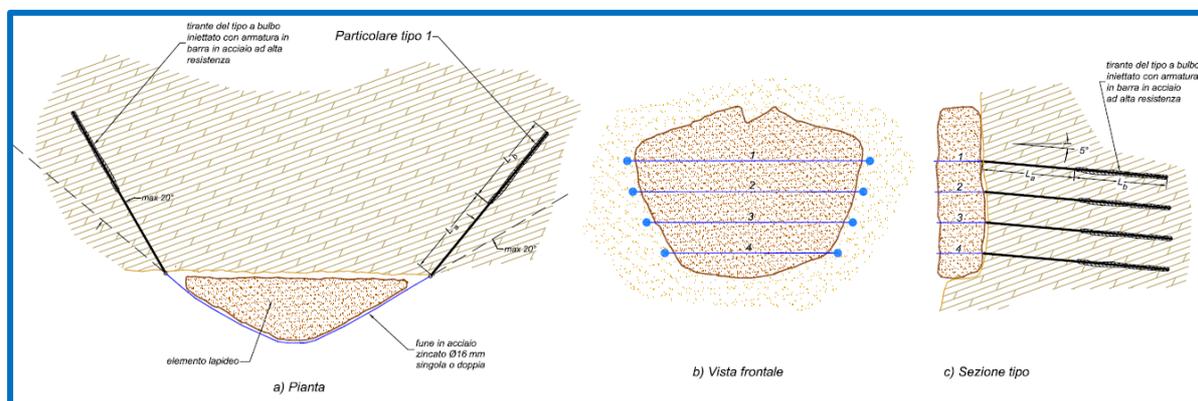


Fig. 47 - Intervento tipo di imbracatura

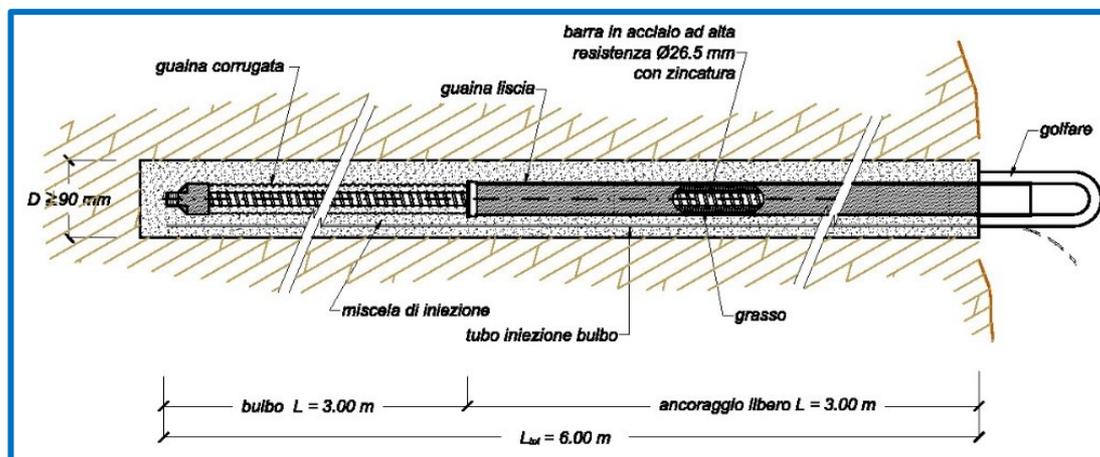


Fig. 48 - Particolare dell'ancoraggio delle funi di imbracatura

Tale intervento ha il duplice vantaggio di avere un basso impatto ambientale e di garantire la sicurezza degli operatori in fase esecutiva, in quanto essi lavorano ai lati del blocco "pericolante" e non a valle dello stesso.

Nel caso degli elementi lapidei B9 e B16, per la puntuale morfologia dell'ammasso roccioso nell'intorno di tali blocchi, l'imbracatura non è risolutiva delle condizioni di stabilità; di conseguenza essa sarà utilizzata come intervento temporaneo, atto a garantire un miglioramento delle attuali condizioni di stabilità nelle more che venga realizzato l'intervento di consolidamento definitivo dei massi, mediante **il placcaggio** degli stessi **con tiranti del tipo "a bulbo iniettato"** con armatura in barra di acciaio ad alta resistenza del diametro di 26,5 mm e di lunghezza variabile da 6 m a 12 m in funzione dello spessore dell'elemento lapideo da placcare, dotati di piastra di estremità (figg. 49 e 50). Per l'elemento B12 il placcaggio potrà effettuarsi senza imbracatura preliminare.

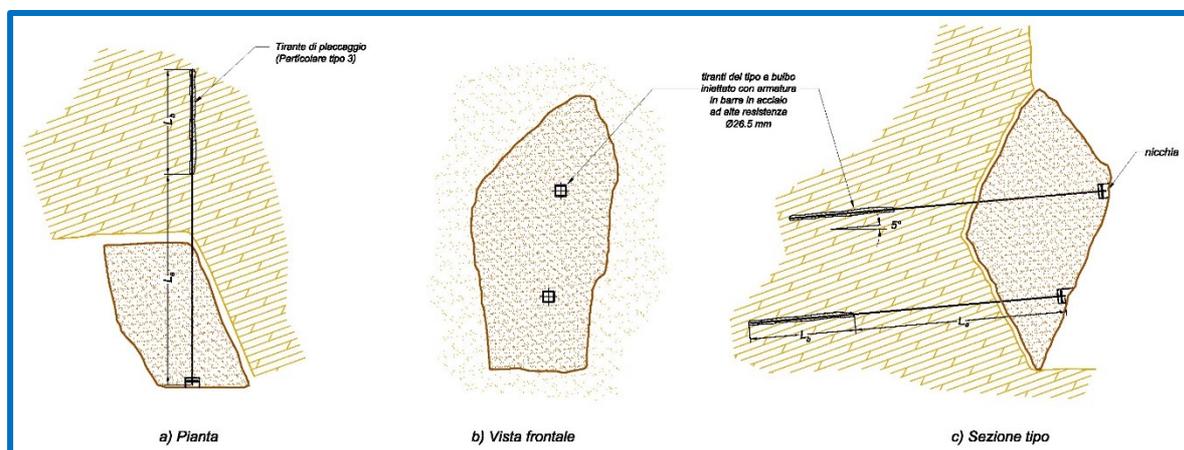


Fig. 49 - Intervento tipo di placcaggio

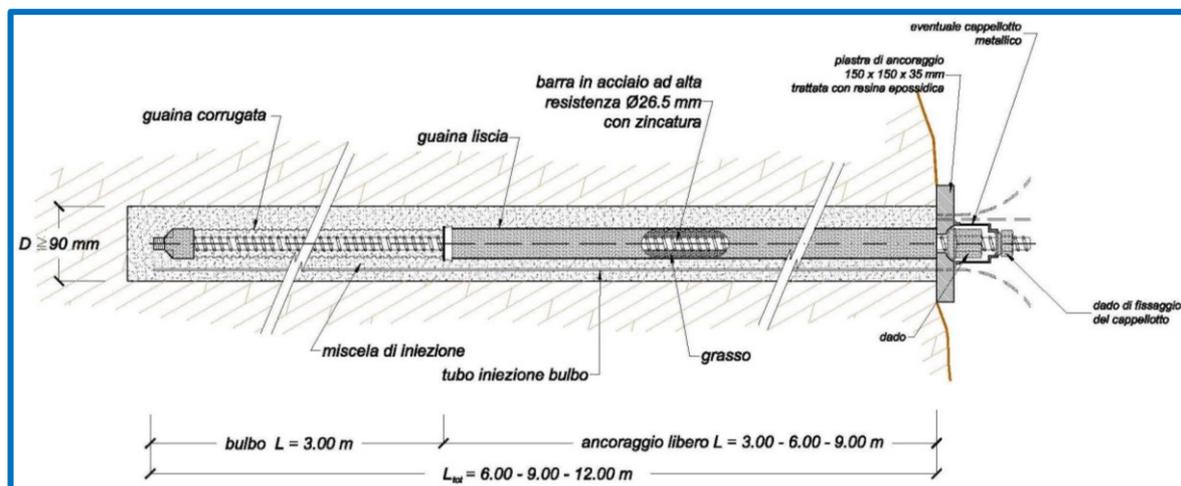


Fig. 50 - Particolare dei tiranti di placcaggio

Dell'elemento lapideo M2 fa parte un masso del volume di poco inferiore a 4 m³, isolato, che è possibile asportare senza innescare problemi di stabilità al suo intorno. Di tale masso è stata prevista la **demolizione mediante espansivi chimici** (fig. 51).

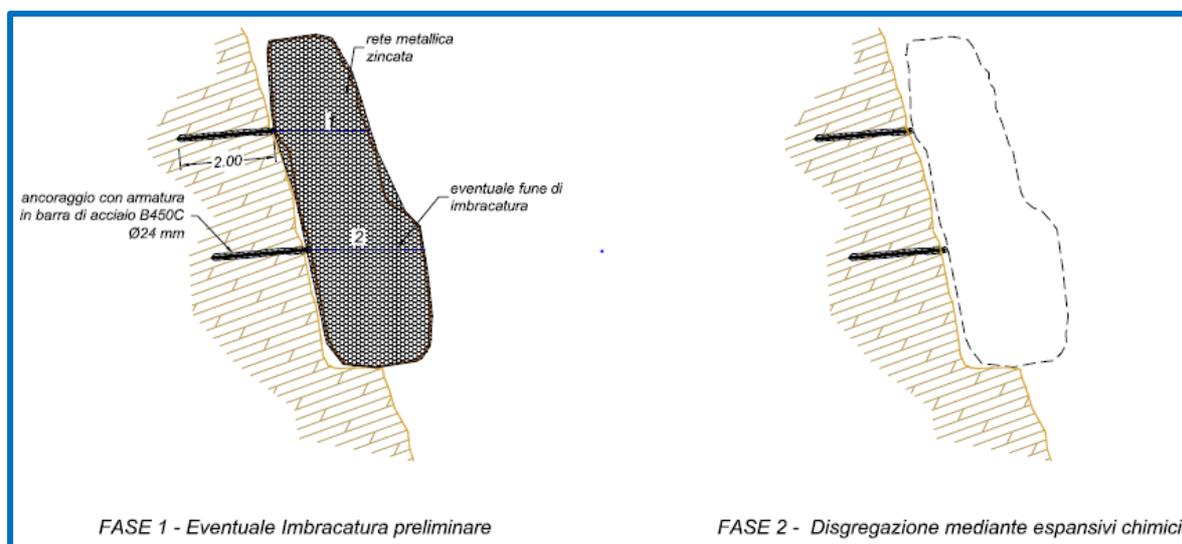


Fig. 51 - Intervento tipo di demolizione con prodotti espansivi chimici

Si tratta di agenti di demolizione non esplosivi, che hanno la proprietà di disgregare in tutta sicurezza la roccia senza produrre rumore, vibrazioni, lancio di detriti. Per effettuare la demolizione è necessario forare la roccia e colare nei fori la miscela di espansivo con acqua. In generale l'espansivo si presenta come una polvere grigiasta e consiste essenzialmente in una particolare miscela di prodotti inorganici a base calcica. L'elevata forza espansiva che si genera durante l'idratazione del materiale provoca la demolizione della roccia in cui esso è stato inserito.

Prima di essere trattato con gli espansivi, il blocco da demolire sarà imbracato mediante rete metallica rinforzata con funi ancorate a tiranti provvisori, come illustrato in fig. 51, sia per assicurare temporaneamente la stabilità dell'elemento lapideo durante la fase di perforazione, sia per sostenere i frammenti prodotti dalla disagregazione, che saranno, poi, allontanati dai rocciatori.

Nell'elaborato A6 sono illustrati, in corrispondenza di ciascun elemento lapideo, gli interventi previsti. A tale elaborato si rimanda per i dettagli e nelle figg. 52 e 53 si riportano, a titolo di esempio, gli interventi su due degli elementi lapidei in argomento.



Figg. 52, 53 - Interventi previsti per gli elementi lapideo M2 e B16

8.4 Considerazioni di carattere generale

Gli interventi di tipo attivo saranno eseguiti con tecniche di progressione su corda, a cura di rocciatori specializzati, che procederanno rigorosamente da monte verso valle.

Al fine di garantire la durabilità nel tempo degli interventi di consolidamento, inseriti in un ambiente aggressivo dal punto di vista chimico, particolare cura verrà posta per ostacolare i fenomeni di corrosione delle parti metalliche degli interventi medesimi. In particolare:

- tutti gli elementi metallici esterni, quali le funi e i pannelli di funi di acciaio, le asole di passaggio delle funi di imbracatura e dei pannelli di funi, i manicotti con i golfari da applicare ai tiranti di ancoraggio delle funi medesime, dovranno essere trattati con prodotti anticorrosione di nuova generazione ed in ottemperanza alle "linee guida" più rigorose su questo aspetto;

- gli ancoraggi con armatura in barre in acciaio ad alta resistenza saranno del tipo **“con doppia protezione nei riguardi della corrosione”**: le armature metalliche saranno, cioè, protette nei riguardi dei fenomeni di aggressione chimica sia dalla miscela cementizia di intasamento che dalle guaine in materiale plastico (durotene, polietilene, etc.) all'interno delle quali saranno collocate. Tali guaine saranno:
 - di tipo *“liscio”*, in corrispondenza del tratto di ancoraggio libero del tirante;
 - di tipo *“corrugato”*, in corrispondenza della fondazione o *“bulbo”*.

Le barre in acciaio B450C di ancoraggio dei pannelli di funi non saranno collocate all'interno di guaine ma saranno trattate con zincatura a caldo 360 g/m² in accordo con la EN1461: in questo caso la doppia protezione è garantita dalla zincatura e dalla miscela di iniezione.

Si segnala, poi, che la miscela di iniezione di tiranti ha un ruolo fondamentale sull'efficacia degli ancoraggi; infatti, deve avere idonee caratteristiche meccaniche e mantenersi in perfetta aderenza alla roccia nell'intorno del foro ove è stato collocato l'ancoraggio. Di conseguenza in essa non devono manifestarsi fenomeni di ritiro e, per tale ragione, il rapporto Acqua/Cemento non deve essere superiore a 0,3; per garantirne la fluidità (indispensabile per il suo pompaggio), occorre aggiungere un additivo che sia allo stesso tempo superfluidificante, antiritiro ed espansivo, nella misura del 6% rispetto al peso del cemento. In termini percentuali, le caratteristiche della miscela di iniezione, composta da **Cemento**, **Acqua** e **additivo**, devono essere:

$$A/C \leq 0,3 \qquad a/C = 0,06$$

Un'ultima considerazione riguarda l'intervento di tipo esteso previsto per mitigare le attuali gravissime condizioni di rischio geomorfologico per il tratto della S.P.37 che si sviluppa alla base del costone lapideo sorgente del recente crollo ma senza la protezione della galleria paramassi (estremità lato Palermo).

La soluzione progettuale è stata prescelta dopo un confronto con altre soluzioni; in particolare sono state considerate, in alternativa all'intervento di tipo attivo illustrato nel paragrafo 8.2, opere di difesa passiva e, precisamente:

- barriere paramassi ad elevato assorbimento di energia da collocare tra il fronte roccioso e la strada provinciale;
- il prolungamento in tale tratto della galleria paramassi esistente nel segmento viario attiguo.

La prima soluzione è stata scartata in quanto, per la morfologia dei luoghi, caratterizzata da una modesta distanza tra il costone lapideo e la strada provinciale, la barriera potrebbe essere scavalcata. Infatti, dalle simulazioni delle traiettorie dei massi effettuate utilizzando un modello di calcolo "lumped mass" 3D, è risultato che un numero significativo di "scendimenti" (traiettorie simulate) scavalcano le barriere malgrado siano state considerate di ben 7 m di altezza utile, come si evince dalla fig. 54.

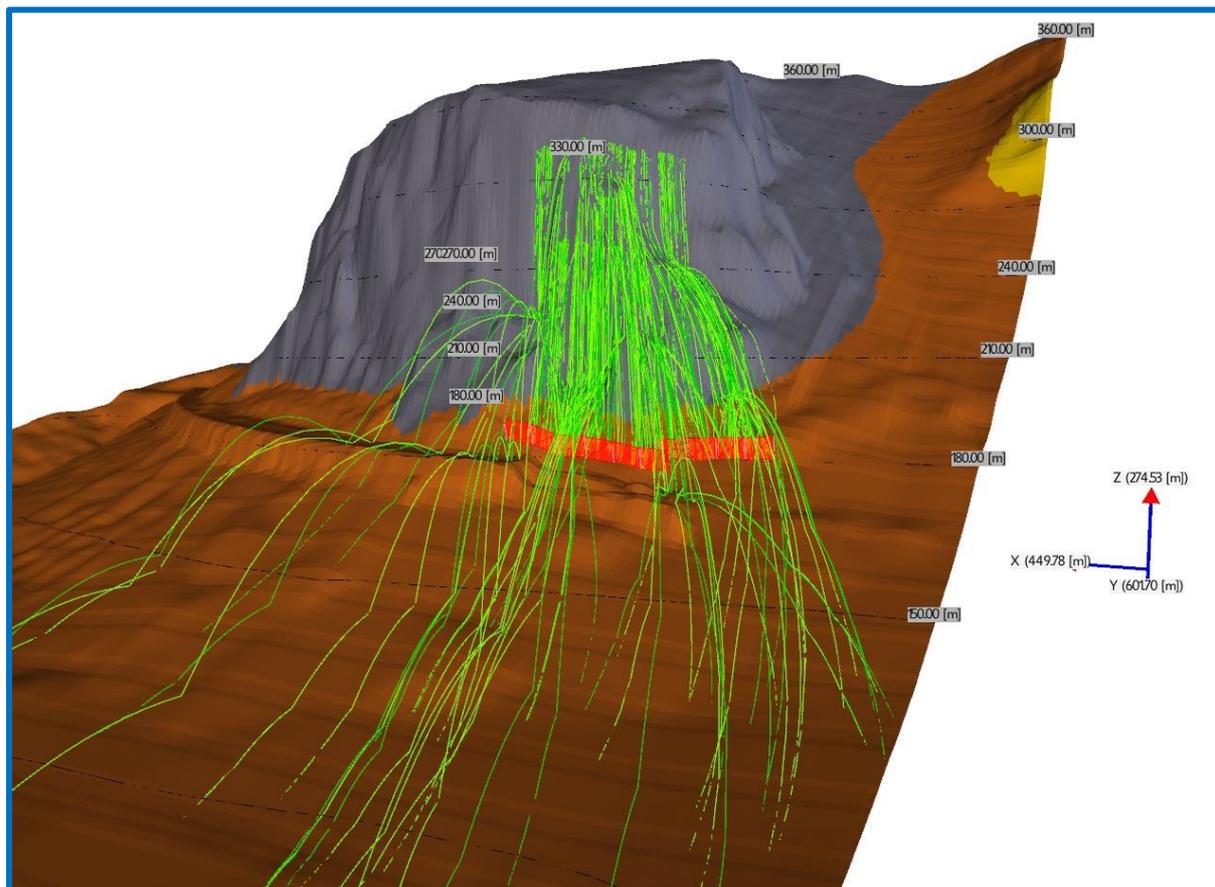


Fig. 54 - Analisi delle traiettorie dei massi incombenti sul tratto di S.P.37 privo di galleria paramassi in presenza di barriere paramassi

La seconda alternativa, costituita dalla realizzazione anche nel tratto in argomento di una galleria paramassi, valida sotto il profilo tecnico, è stata scartata in quanto comporta costi sensibilmente maggiori di quelli dell'intervento di tipo attivo previsto nel presente progetto. Senza contare che la sua realizzazione esporrebbe le maestranze a lavorazioni in condizioni di rischio per la potenziale caduta massi dal costone sovrastante.

9 - VINCOLI GRAVANTI SULL'AREA IN STUDIO

Nell'elaborato A1 - *Cartografia* del presente progetto sono riportate in scala adeguata le carte tematiche relative ai vincoli gravanti sull'area in studio. In particolare, l'area in cui saranno realizzati gli interventi di mitigazione del rischio da caduta massi in oggetto:

- ricade nella ZSC (Zona Speciale di Conservazione) ITA020044 "Monte Grifone" (fig. 55);

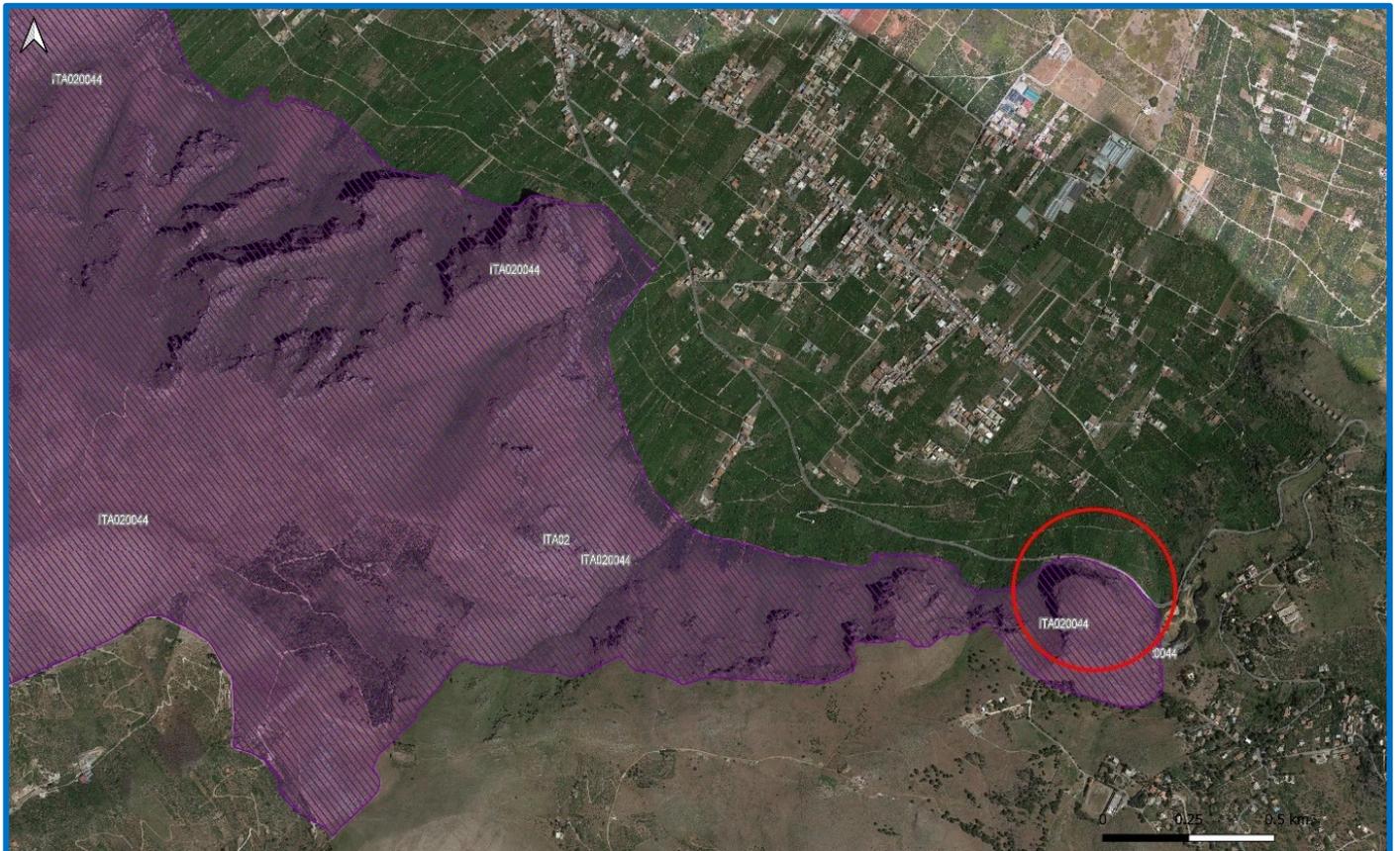


Fig. 55 - ZSC ITA020044 "Monte Grifone" (nel cerchio in rosso l'area di intervento)

- è soggetta al vincolo idrogeologico ai sensi del R.D. n°3267 del 30/12/1923, come si evince dalla fig. 56;

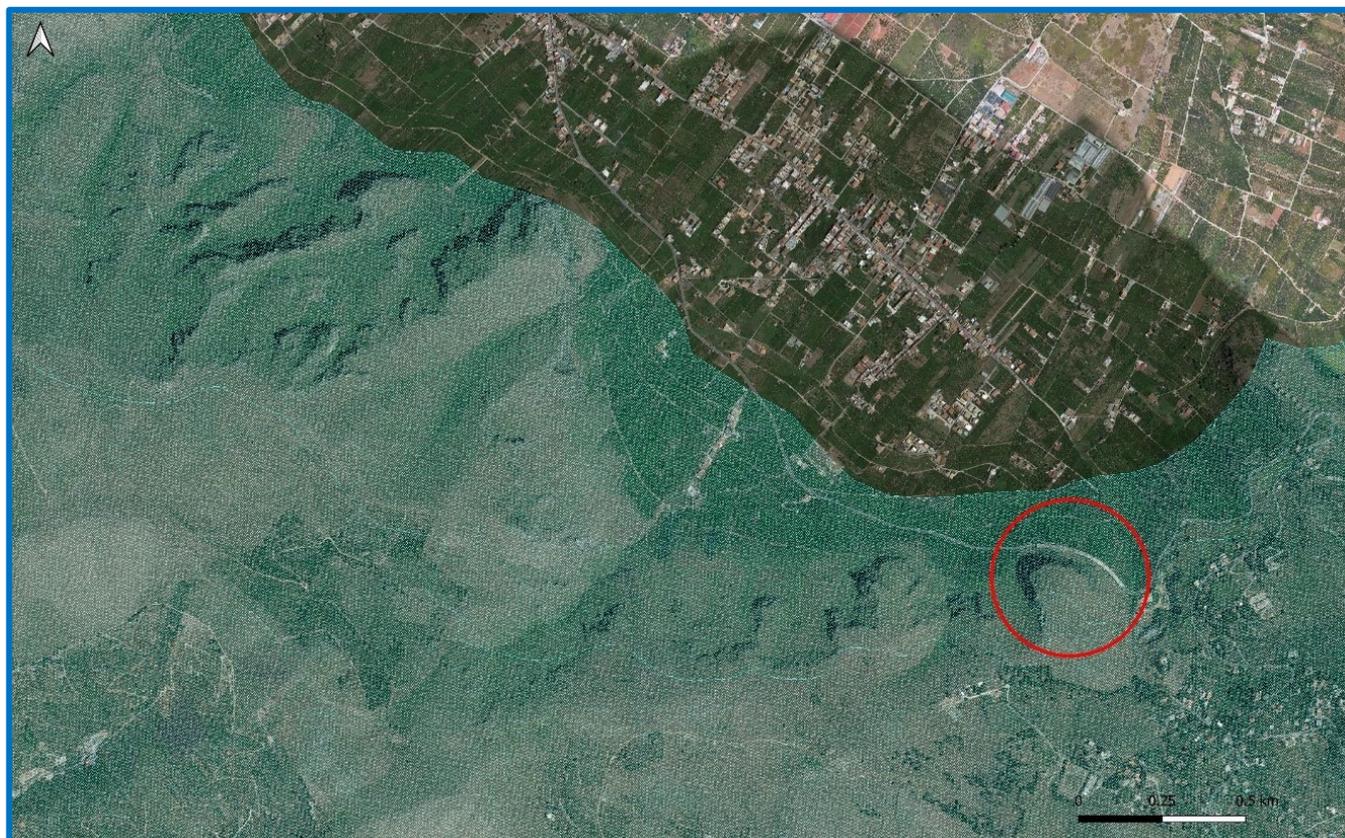


Fig. 56 - Vincolo idrogeologico ai sensi del R.D. n°3267 del 30/12/1923

- è vincolata dal P.A.I. come illustrato nel cap. 5, al quale si rinvia e nel quale sono riportate le carte dei dissesti (fig. 8) e della pericolosità e del rischio (fig. 9).

10 - FATTIBILITA' AMBIENTALE

Come indicato nel capitolo precedente, gli interventi previsti in progetto dovranno essere realizzati sul costone lapideo in studio, che ricade in zona ZSC. Ne deriva che particolare cura è stata posta nella scelta delle procedure lavorative e degli interventi, che devono comportare un impatto ambientale minimo. Rinviano per i dettagli alle specifiche relazioni R3 ed R4, di seguito si riportano alcune considerazioni specifiche. Va, intanto evidenziato che gli interventi previsti, come già osservato, saranno eseguiti con tecniche di progressione su corda, a cura di rocciatori specializzati, che saranno preventivamente formati per operare nel più completo rispetto dell'ambiente circostante. Si ritiene, inoltre, opportuno evidenziare la compatibilità con l'ambiente e con l'ecosistema dell'intervento *"di carattere esteso"* proposto: infatti la maglia delle funi del pannello, di 30 cm × 30 cm, ne permette il posizionamento senza alcun

disturbo per la flora, che può crescere indisturbata all'interno dello spazio vuoto; inoltre, la maglia sufficientemente larga non ostacola le tane dei piccoli animali e dell'avifauna. A conferma, nella fig. 55 è visibile l'intervento identico a quello proposto realizzato a Pizzo Volo dell'Aquila nella Riserva Naturale Orientata di Monte Pellegrino appena tre mesi dopo la sua posa in opera.



Fig. 55 - Pannelli di funi all'interno della R. N. O. di M. Pellegrino a Palermo

La vegetazione è ricresciuta rigogliosa all'interno delle maglie quadrate dei pannelli di funi, occultandoli quasi integralmente, con impatto nullo da punto di vista paesaggistico e trascurabile per l'ecosistema.

Infine, gli interventi *di carattere puntuale*, quali imbracature, placcaggi e demolizione mediante prodotti espansivi, sono ad impatto paesaggistico praticamente nullo (risultano completamente invisibili alla distanza tra la strada e la parete rocciosa) e non incidono minimamente su flora e fauna (impatto nullo sull'ecosistema).

11 - OCCUPAZIONI TEMPORANEE

Come indicato nell'elaborato *R5 - Piano particellare di esproprio*, al quale si rinvia, per realizzare gli interventi previsti in progetto è prevista l'occupazione temporanea di aree ricadenti nelle particelle 87 e 352 del foglio 112 del Comune di Palermo e nella particella 2 del foglio 8 del Comune di Belmonte Mezzagno. Nello specifico, il valore dell'indennità per occupazione temporanea risulta di € 1.474,00.

12 - CAVE E DISCARICHE

Per realizzare i lavori in argomento non risulta necessario ricorrere a cave per approvvigionare materiale inerte né a discariche ove depositare materiale di risulta.

13 - COSTO DEGLI INTERVENTI

Nell'elaborato *E3 - Computo metrico*, al quale si rinvia, è riportato il computo metrico estimativo dei lavori; il costo complessivo degli interventi, comprensivo delle somme a disposizione dell'Amministrazione, è indicato nell'elaborato *E4 - Quadro economico*. In esso, tra l'altro, si tiene conto delle competenze tecniche relative alle prestazioni professionali allo stato attuale non assegnate (progetto esecutivo, direzione dei lavori, sicurezza in fase di progettazione ed esecuzione, collaudi statico e tecnico amministrativo), calcolate in base alla vigente tariffa. Va rilevato che non sono state considerate competenze per lo studio geologico in quanto la committenza ha comunicato che provvederà con personale interno. Per ulteriori dettagli relativi alle somme a disposizione dell'Amministrazione si rinvia al citato elaborato *E4 - Quadro economico*.

14 - TEMPI PREVISTI PER LA REALIZZAZIONE DEGLI INTERVENTI

Rinviando alla successiva fase di progettazione esecutiva per un dettagliato cronoprogramma dei lavori, in questa sede si prevede una durata pari a mesi 12 (dodici), tenuto conto dell'urgenza dettata dalla necessità di avviare nel più breve tempo possibile gli interventi di riparazione e consolidamento del tratto di galleria danneggiato dal recente crollo e, quindi, di ripristinare la viabilità sulla S.P.37 di collegamento tra Palermo, Gibilrossa e Belmonte Mezzagno.

Progetto definitivo degli interventi di mitigazione del rischio geomorfologico per il tratto della SP 37 che si sviluppa lungo a galleria artificiale danneggiata dal crollo verificatosi in data 1 novembre 2021
R1 - Relazione generale

Va evidenziato che la durata indicata è quella effettiva dei lavori, che non tiene conto delle eventuali sospensioni necessarie per la riproduzione dell'avifauna, in quanto l'area di intervento ricade all'interno della ZSC (v. cap. 9).

Palermo, aprile 2022

Prof. ing. Fabio Cafiso

