

# Geologia dell'Ambiente

Supplemento al n. 3/2021

ISSN 1591-5352

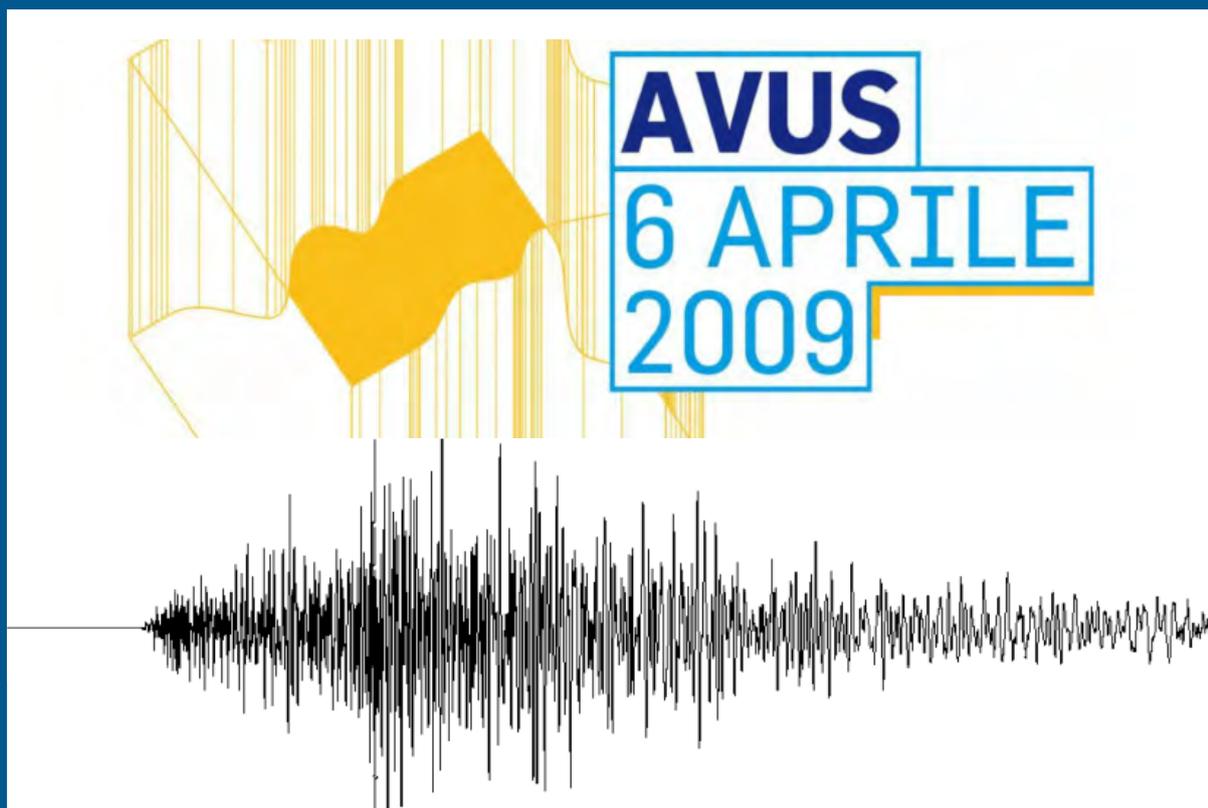
Periodico trimestrale della SIGEA

Società Italiana di Geologia Ambientale - APS



Considerazioni geologiche,  
economiche e sociali nella gestione  
e prevenzione del rischio sismico

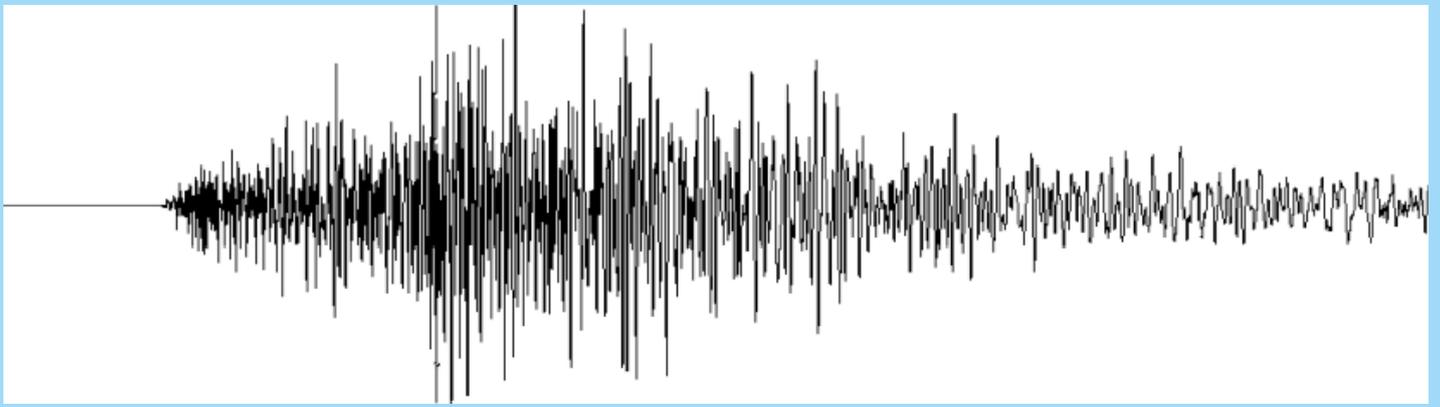
L'ESPERIENZA DEL PREMIO  
"AVUS 6 APRILE 2009"



A CURA DI

EUGENIO DI LORETO E MICHELE ORIFICI





## ASSOCIAZIONE VITTIME UNIVERSITARIE SISMA «6 APRILE 2009»

*Premio di laurea rivolto a neo-laureati che abbiano discusso una tesi di laurea magistrale o magistrale a ciclo unico, presso un ateneo italiano, su argomenti di carattere applicativo le cui risultanze siano direttamente e immediatamente riconducibili al seguente tema:*

*Aspetti ingegneristici, sociali o economici legati alla gestione del rischio sismico e alla resilienza delle popolazioni e dei territori.*

Col patrocinio:

### Palermo

**Dipartimento di  
"Scienze della Terra e  
del Mare (DiSTeM)"**

Aula A1 "Maggio"  
Via Archirafi 26

**Venerdì 14 dicembre 2018  
ore 9,00**

### Programma

Modera: Geol. Michele Orifici (Consigliere naz. SIGEA)

#### Interventi

- Prof. Valerio Agnesi (Direttore DiSTeM-UNIPA)
- Prof. Edoardo Rotigliano (Coord. Consiglio di Interclasse in Scienze della Terra)
- Geol. Emanuele Doria (Presidente SIGEA SICILIA)
- Geol. Giuseppe Collura (Presidente ORGS)
- Prof. Attilio Sulli (Docente DiSTeM-UNIPA)
- Geol. Calogero Cannella (Coordinatore Commissione Prot. Civile ORGS)
- Prof. Pietro Di Stefano (Docente DiSTeM-UNIPA)
- Geol. Mario Leta (Vice Presidente ORGS)
- Prof. Giorgio De Guidi (Docente Dipartimento Scienze Biologiche, Geologiche e Ambientali UNICT)

#### Conclusioni

**Sergio Bianchi (Presidente AVUS «6 Aprile 2009»)**



## Società Italiana di Geologia Ambientale - APS

Associazione di protezione ambientale a carattere nazionale riconosciuta dal Ministero dell'ambiente, della tutela del territorio e del mare con D.M. 24/5/2007 e con successivo D.M. 11/10/2017

### PRESIDENTE

**Antonello Fiore**

### CONSIGLIO DIRETTIVO NAZIONALE

Lorenzo Cadrobbi, Franco D'Anastasio (*Segretario*), Daria Duranti (*Tesoriere*), Ilaria Falconi, Antonello Fiore (*Presidente*), Sara Frumento, Fabio Garbin, Enrico Gennari, Giuseppe Gisotti (*Presidente onorario*), Luciano Masciocco, Fabio Oliva, Michele Orifici (*Vicepresidente*), Vincent Ottaviani (*Vicepresidente*), Paola Pino d'Astore, Livia Soliani

### Geologia dell'Ambiente

Periodico trimestrale della SIGEA - APS

Supplemento al N. 3/2021

Anno XXIX • luglio-settembre 2021

Iscritto al Registro Nazionale della Stampa n. 06352

Autorizzazione del Tribunale di Roma n. 229 del 31 maggio 1994

### DIRETTORE RESPONSABILE

**Giuseppe Gisotti**

### VICE DIRETTORE RESPONSABILE

**Eugenio Di Loreto**

### COMITATO SCIENTIFICO

Mario Bentivenga, Aldino Bondesan, Giovanni Bruno, Francesco Cancellieri, Maria Di Nezza, Massimiliano Fazzini, Giuseppe Gisotti, Giancarlo Guado, Endro Martini, Luciano Masciocco, Davide Mastroianni, Mario Parise, Giacomo Prosser, Giuseppe Spilotro, Vito Uricchio, Gianluca Valensise

### COMITATO DI REDAZIONE

Fatima Alagna, Giorgio Boccalaro, Giorgio Cardinali, Valeria De Gennaro, Eugenio Di Loreto, Sara Frumento, Fabio Garbin, Michele Orifici, Vincent Ottaviani, Laura Pala, Maurizio Scardella

### REDAZIONE

Sigea c/o Fidaf - Via Livenza, 6 00198 Roma  
tel. 06 5943344

[info@sigeaweb.it](mailto:info@sigeaweb.it)

### PROCEDURA PER L'ACCETTAZIONE DEGLI ARTICOLI

I lavori sottomessi alla rivista dell'Associazione, dopo che sia stata verificata la loro pertinenza con i temi di interesse della Rivista, saranno sottoposti ad un giudizio di uno o più referees

### UFFICIO GRAFICO

**Pino Zarbo** (Frallerighe Book Farm)

[www.frallerighe.it](http://www.frallerighe.it)

### PUBBLICITÀ

SIGEA - APS

### STAMPA

Industria grafica Sagraf Srl, Capurso (BA)

La quota di iscrizione alla SIGEA-APS per il 2021

è di € 30 e da diritto a ricevere la rivista "Geologia dell'Ambiente".

Per ulteriori informazioni consulta il sito web all'indirizzo [www.sigeaweb.it](http://www.sigeaweb.it)

# Sommario

## Prefazione

ERASMO D'ANGELIS

3

## Introduzione

EUGENIO DI LORETO, MICHELE ORIFICI

6

Un premio, tanti ricordi e quel maledetto dolore che non passerà mai

SERGIO BIANCHI, UMBERTO BRACCILI

9

## PARTE PRIMA

### SEZIONE SCIENTIFICA DIVULGATIVA

L'Università e i rischi geologici. L'esperienza del Dipartimento di Scienze della Terra della "Università Sapienza" Roma

FRANCESCA BOZZANO

13

Il terremoto di Toscana (VT) del 6 febbraio 1971.

Un esempio di ricostruzione sostenibile

SERGIO CASTENETTO, EUGENIO DI LORETO

16

Pianificazione, prevenzione e riduzione del rischio sismico

ANTONELLO FIORE, MICHELE ORIFICI, VINCENT OTTAVIANI

23

La difesa dai terremoti: il confronto con il passato che insinua dubbi sul presente

ROBERTO DE MARCO

29

La didattica e la divulgazione delle geoscienze nelle scuole di ogni ordine e grado

ENRICO MICCADEI

40

La pericolosità sismica in Italia: stato dell'arte

FABIO SABETTA

47

Rischio sismico: quando la comunicazione non sensibilizza alla prevenzione

GIULIA SCANDOLARA

58

Faglie attive, faglie sismogenetiche, faglie capaci.

Cosa ne sappiamo?

GIANLUCA VALENSISE

61

## PARTE SECONDA

### LE TESI DEL PREMIO AVUS

Pianificazione per la vivibilità e la resilienza della comunità di Appignano del Tronto

SIMONA TONDELLI, CLAUDIA DE LUCA, GIULIA CHIUSI

71

Risposta Sismica Locale nel Sito del Complesso della SS. Annunziata a Sulmona FILIPPO CIANI, CLAUDIA MADIAT, SARA AMOROSO	76
Caratterizzazione dinamica sperimentale del Ponte della Costituzione e degli Scalzi a Venezia VINCENZO D'ORIANO	85
Rigenerazione Urbana. Aree industriali dismesse: un nuovo polo per la cultura a Rieti RICCARDO GUNNELLA	93
Relazioni empiriche tra parametri strumentali del moto del suolo e l'Intensità MCS per i terremoti di magnitudo moderata della sequenza in Pianura Padana (2012) TATIANA IOPPOLO, FRANCESCA FUNICIELLO, CLAUDIA PIROMALLO, ALESSANDRO NICOLA PINO	103
Il sisma dell'Aquila. Le frazioni di Paganica e Onna 10 anni dopo CRISTINA ORLANDI	109
La Rocca di Cefalù: modello geomeccanico e condizioni di rischio per la cittadina normanna FABIO CAFISO, CIPRIANO DI MAGGIO, ROBERTA SANTORO	120

# La Rocca di Cefalù: modello geomeccanico e condizioni di rischio per la cittadina normanna

## The “Rocca” of Cefalù: geomechanical modelling and risk conditions for the norman town

Parole chiave: modello geomeccanico, crolli sismo-indotti, mitigazione del rischio, traiettorie di blocchi lapidei, back-analysis  
 Key words: geomechanical model, seismic induced rockfall, risk mitigation, trajectories of rock blocks, back-analysis

**Fabio Cafiso**

Dipartimento di Scienze della Terra e del Mare, Università degli Studi di Palermo  
 E-mail: [fabio.cafiso@unipa.it](mailto:fabio.cafiso@unipa.it)

**Cipriano Di Maggio**

Dipartimento di Scienze della Terra e del Mare, Università degli Studi di Palermo  
 E-mail: [cipriano.dimaggio@unipa.it](mailto:cipriano.dimaggio@unipa.it)

**Roberta Santoro**

Geologo libero professionista  
 E-mail: [robisantoro5@gmail.com](mailto:robisantoro5@gmail.com)

### 1. INTRODUZIONE

La cittadina di Cefalù, ubicata a circa 70 km da Palermo, è una delle perle del Mediterraneo, per la bellezza dei luoghi, dominati dalla Rocca, imponente rupe carbonatica alta circa 250 m s.l.m., e per i beni architettonici (Figg. 1 e 2).

come Tempio di Diana. Sul ciglio della Rocca e per il suo intero sviluppo si snoda la cinta muraria di tipo megalitico risalente alla fine del V secolo a.C. (periodo pre-ellenico), in parte ricostruita nel periodo bizantino (VII-IX secolo d.C.). Nel periodo normanno (secolo

ai fenomeni di crollo che, spesso, si verificano in concomitanza di eventi sismici o meteorici particolarmente intensi. Tali crolli determinano condizioni di rischio molto elevato per gran parte dell'abitato, compresa la Cattedrale, ubicata ad alcune decine di metri dalla Rocca, e posso-

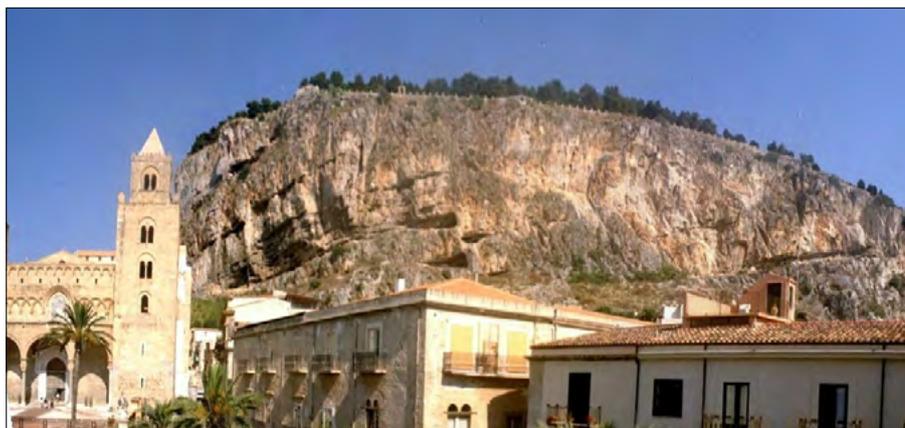


Figura 1. Vista panoramica della Rocca di Cefalù incombente sul centro storico con la cattedrale normanna sulla sinistra



Figura 2. Dettaglio sulla cattedrale normanna (fonte: Wikipedia)

Fondata dai greci con il nome di Κεφαλοῦδιον tra il XIV e il XIII a.C., conserva sulla Rocca il palazzo-santuario ciclopico-megalitico, noto

XII d.C.) furono costruiti i principali monumenti, tra i quali la cattedrale, sito UNESCO dal 2015 (Fig. 2). La Rocca è caratterizzata da un'elevata suscettibilità

no coinvolgere le sovrastanti preesistenze storico-archeologiche. In ogni caso inibiscono lo sviluppo socio-economico della cittadina normanna, ad evidente vocazione turistica.



Figura 3. Area studiata (coordinate geografiche del punto centrale 38°02'14"N; 14°01'35"E - fonte: Google Earth).

### 2. L'AREA STUDIATA

L'area studiata comprende la Rocca, rilievo isolato che sovrasta Cefalù, e il settore costiero pianeggiante che lo delimita. Essa ricade lungo la parte centrale della costa settentrionale siciliana e costituisce l'estrema propaggine nord delle Madonie (Fig. 3).

### 3. MODELLO GEOLOGICO

L'area di Cefalù è un segmento della catena appenninico-maghrebide siciliana, costituito da successioni carbonatiche e silico-clastiche mesozoico-terziarie profondamente deformate, facenti parte di un edificio tettonico a pieghe, faglie e

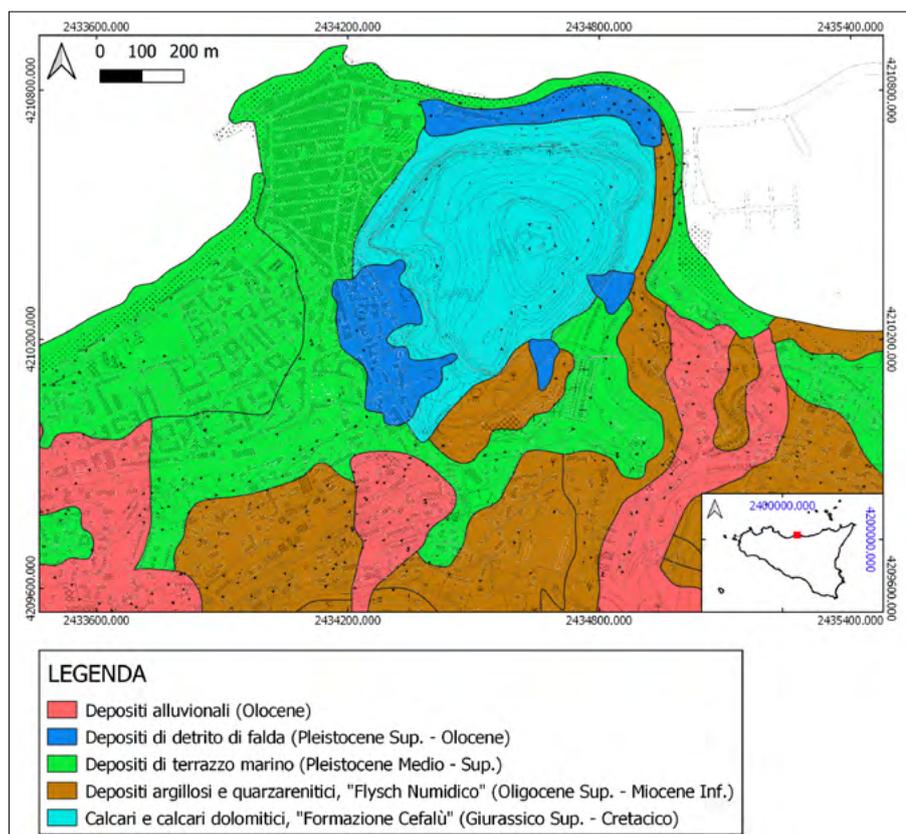


Figura 4. Schema geologico semplificato dell'area di Cefalù, in scala 1:10.000 (Fonte: ISPRA, 2012)

falde di ricoprimento. Nell'area studiata, tale edificio è formato da: unità di catena (Panormidi; Numidiche; Sicilidi); unità di bacino di wedge-top; depositi più recenti (Fig. 4 - ISPRA, 2012).

Le unità Panormidi sono costituite da successioni carbonatiche di mare basso del Triassico sup. - Oligocene. Esse affiorano nell'area della Rocca, costituita da calcari e calcari dolomitici a rudiste e coralli e da laminiti algali della *formazione di Cefalù*, di età Giurassico sup.- Cretacico. Questa formazione si

presenta stratificata in banchi sub-orizzontali con spessore 0,5- 4,0 m (Fig. 5), attraversati da sottili filoni sedimentari, mantenendo una struttura monoclinale immergente verso NE.

Le unità Numidiche, ricoprenti le unità Panormidi e affioranti a sud e a sud-est della Rocca, sono costituite da prevalenti argilliti con intercalazioni di banchi quarzosi (*Flysch Numidico*, rappresentato in Fig. 4 dalla litologia denominata "FYN"), di ambiente di avanfossa, di età Oligocene sup.- Miocene inf.



Figura 5. Calcari e calcari dolomitici della formazione Cefalù, stratificati in grossi banchi

Le unità Sicilidi si trovano sovrascorse sulle unità Numidiche e Panormidi e sono formate da alternanze di arenarie, marne, calcari marnosi e calcareniti, di ambiente di scarpata continentale, di età Oligocene sup.- Miocene inf.; sono presenti nei settori posti a sud e a sud-ovest dalla Rocca. Le unità di bacino di wedge-top sigillano le precedenti unità; sono costituite da alternanze di arenarie, argilliti e marne, di ambiente di scarpata, del Miocene inf.-medio e affiorano a sud e a sud-ovest della Rocca, al di fuori dell'area studiata. I depositi più recenti sono formati da: sabbie e conglomerati costieri (Pleistocene medio-sup.) e detriti stratificati e cementati (Pleistocene sup.); ghiaie, sabbie e limi fluviali (Olocene), detriti di falda (Olocene), colluvi (Olocene), sabbie e ghiaie di spiaggia (Olocene).

#### 4. MODELLO TOPOGRAFICO E GEOMORFOLOGICO

L'area studiata è caratterizzata dall'insieme di un paesaggio: costiero pianeggiante (costa); "montuoso" articolato e aspro (la Rocca); "collinare" ondulato e dolce (rilievo interno). La Rocca mostra: un'area sommitale estesa oltre 2 km<sup>2</sup> e a debole rilievo (tra le quote di circa 100 m s.l.m. e 268 m s.l.m.); pareti rocciose alte decine di metri, fortemente inclinate (circa 60°), che delimitano l'area sommitale; versanti basali mediamente inclinati (25°÷35°), che collegano le brusche pareti rocciose alle superfici pianeggianti costiere. Il rilievo interno è contrassegnato da piccole dorsali N-S, con cime arrotondate che sfiorano i 600 m s.l.m., separate da un sistema di corsi d'acqua a sviluppo N-S.

Lo studio geomorfologico ha mostrato: la presenza di forme attuali (spiagge, spiagge con falesie arretrate e falesie attive lungo la costa) e di forme relitte (superfici di terrazzo marino sollevate nella fascia più interna) nell'area costiera; l'esistenza di un paesaggio carsico sospeso (area sommitale della Rocca), di grandi falesie abbandonate e degradate (pareti rocciose della Rocca) e di falde e coni di detrito (alla base della parete rocciosa) lungo l'area montuosa; profonde valli a V, con versanti fluviali in argilla interessati da forme di frana e di ruscellamento, in corrispondenza delle aree collinari più interne.

Dall'analisi dei dati geologici e geomorfologici, i processi che hanno generato l'attuale assetto topografico e geomorfologico sono riconducibili a: fagliazione a blocchi avvenuta nel Qua-



Figura 6. Planimetria con indicazione delle stazioni di rilievo

ternario (Di Maggio *et al.*, 2017), che ha isolato la Rocca, ribassando le zone marginali, e prodotto grandi scarpate di faglia lambite dal mare; azione del moto ondoso, che ha determinato l'arretramento delle falesie impostatesi sulle preesistenti scarpate di faglia e la formazione della superficie di terrazzo marino policiclica; approfondimento della rete fluviale lungo gli affioramenti argillosi (rilievo interno), conseguente allo stesso sollevamento tettonico; sviluppo di processi carsici nelle rocce carbonatiche della Rocca, che amplia le discontinuità strutturali ivi presenti; degradazione meteorica delle rocce, particolarmente

evidente lungo il costone roccioso; sviluppo di processi di caduta di detrito e di movimenti franosi (crolli, scivolamenti e ribaltamenti), ancora attivi lungo le pareti rocciose della Rocca, che alimentano le falde e i coni di detrito posti al loro piede.

## 5. MODELLO GEOMECCANICO

### 5.1 RILIEVI GEOSTRUTTURALI

Per individuare la struttura orientata dell'ammasso roccioso sono stati effettuati rilievi geostutturali (Fig. 6) in corrispondenza dei vari fronti che incombono sul centro storico con la cattedrale

(NO), sul centro abitato (SO), su edifici e viabilità (N), sulla via del Faro, di accesso al porto (NE) e sul cimitero (SE).

Complessivamente sono state rilevate n°515 discontinuità, delle quali sono state misurate le grandezze codificate 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., 1978), quali orientazione, spaziatura, persistenza, apertura, rugosità, ed infine, terminazione. Le prime tre definiscono la configurazione geometrica della "struttura" caratterizzante l'ammasso roccioso, intesa come il network costituito dall'insieme delle discontinuità presenti; le altre caratteristiche forniscono, unitamente alle precedenti, elementi fondamentali per la caratterizzazione meccanica dell'ammasso roccioso stesso.

### 5.2 ELABORAZIONE DEL COMPLESSO DEI DATI

Dopo una verifica preliminare che la struttura orientata è pressoché identica nei vari fronti, è stata effettuata l'analisi statistica del complesso delle misure, ed è risultato che la Rocca è interessata da n°5 famiglie principali (Figg. 7 e 8).

Con riferimento alle discontinuità appartenenti a ciascuna famiglia, è stata effettuata l'elaborazione statistica delle misure delle grandezze codificate dall'ISRM. Per motivi di spazio, a titolo di esempio si riporta soltanto un paio di istogrammi di frequenza relativi alla famiglia 3, che comprende n°144 discontinuità (Figg. 9 e 10).

In generale, è possibile dedurre che la spaziatura varia poco con la famiglia di appartenenza; infatti, almeno il 53,8% dei valori della spaziatura delle superfici di discontinuità in corrispondenza di tutti i raggruppamenti è risul-

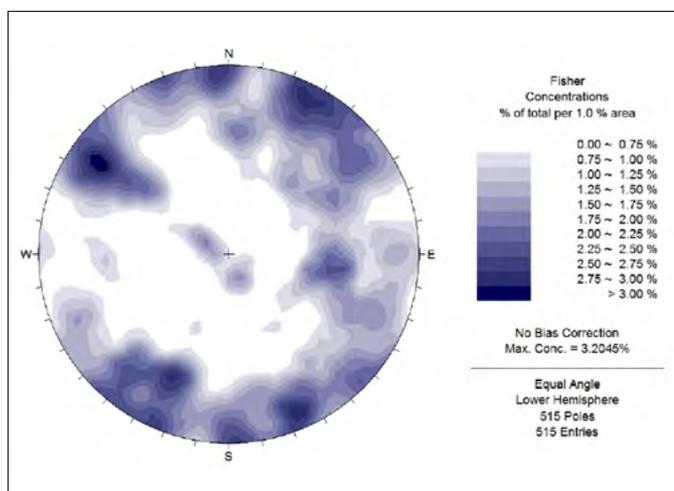


Figura 7. Curve isofrequenziali delle superfici di discontinuità derivanti dall'elaborazione statistica dell'orientazione

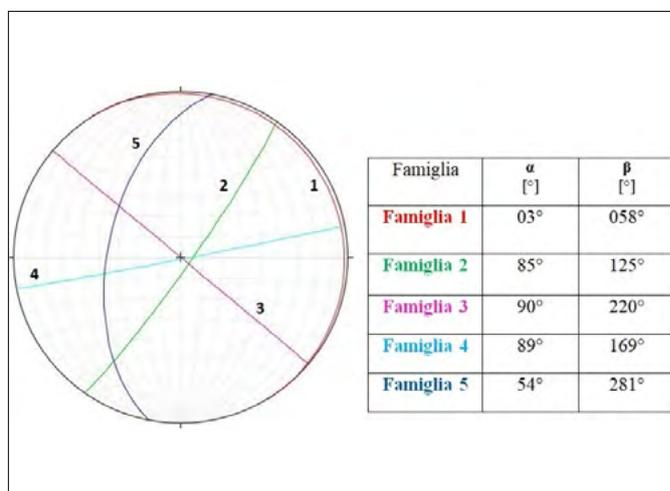


Figura 8. Meridiani rappresentativi delle principali famiglie di discontinuità derivanti dall'elaborazione statistica dell'orientazione e valori medi statistici degli angoli  $\alpha$  e  $\beta$

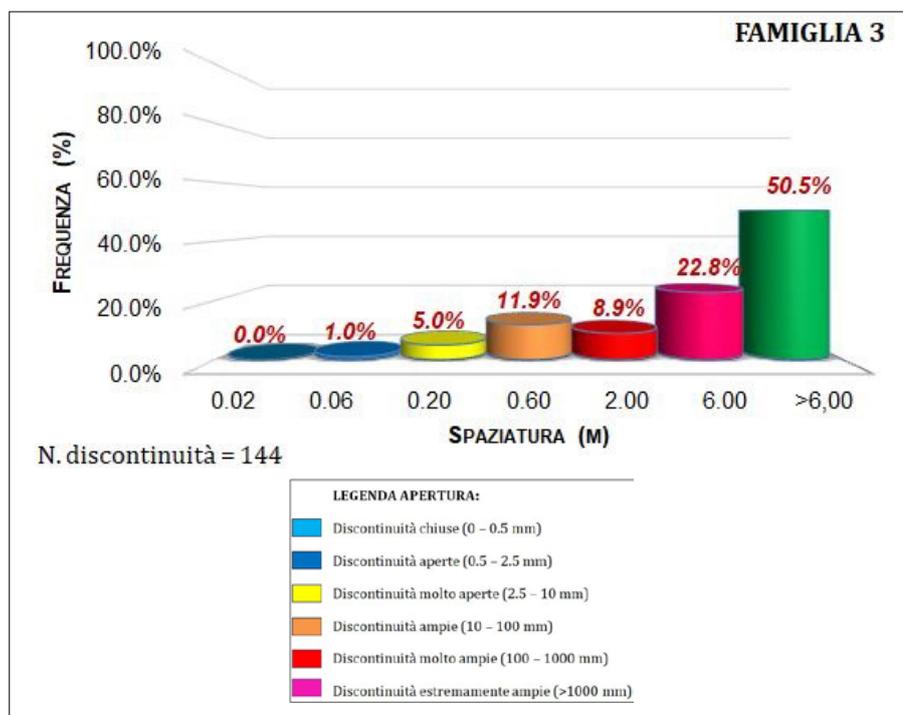


Figura 9. Istogramma di frequenza rappresentativo dell'apertura relativo alla famiglia 3 e classificazione ISRM delle discontinuità in funzione del detto parametro

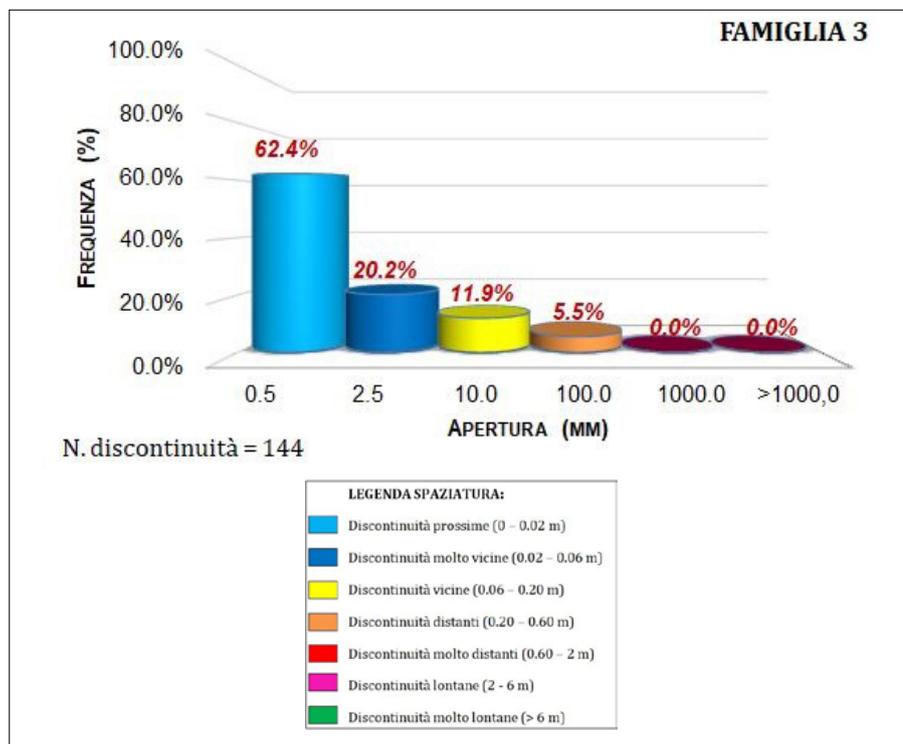


Figura 10. Istogramma di frequenza rappresentativo della spaziatura relativo alla famiglia 3 e classificazione ISRM delle discontinuità in funzione del detto parametro

tato superiore a 6 m. Tuttavia, è evidente una spiccata dipendenza dalla posizione del rilievo sui fronti rocciosi: infatti, tale parametro si riduce sensibilmente in corrispondenza della fascia alta circa 20 m a partire dal coronamento dei fronti, dove raramente supera 1 m. I valori di persistenza più ricorrenti sono compresi tra 1 m e 3 m, con i valori più bassi nella fascia sommitale della Rocca. L'apertura varia poco con le famiglie e le discontinuità presentano, in generale, aperture molto basse e, comunque, inferiori allo

spessore delle asperità presenti nel relativo profilo. I valori maggiori, dell'ordine di alcuni centimetri, sono stati misurati in corrispondenza di alcuni blocchi che hanno già subito spostamenti e/o rotazioni. In questi casi è stato rinvenuto materiale pelitico di riempimento. Dall'elaborazione statistica della scabrezza sono risultati valori di JRC in genere compresi tra 12 e 14 mentre il valore dell'indice di terminazione  $T_r$  è pari al 15,57%, a conferma che le superfici di discontinuità interagiscono le une con le

altre, isolando singoli elementi lapidei disarticolati gli uni dagli altri e ciascuno dall'ammasso roccioso.

### 5.3 DEFINIZIONE DEL MODELLO GEOMECCANICO

Le n°5 famiglie di discontinuità principali che caratterizzano la struttura orientata della Rocca ne individuano una configurazione a singoli blocchi disarticolati gli uni dagli altri e ciascuno dalla roccia retrostante. Le discontinuità, infatti, interagiscono tra loro, in quanto caratterizzate in generale da terminazioni di tipo "d" o "x". Le dimensioni dei massi variano con la posizione nella Rocca in quanto, nella parte sommitale della rupe, persistenza e spaziatura delle discontinuità superano raramente il metro, e, pertanto, gli elementi lapidei hanno volume dell'ordine del metro cubo. Al di sotto della cresta, già circa 20 m dalla sommità, spaziatura e persistenza si incrementano raggiungendo valori anche di diversi metri. Ne deriva che il volume dei blocchi è mediamente dell'ordine di alcuni metri cubi, raggiungendo localmente anche valori dell'ordine delle centinaia di metri cubi. In particolare, in corrispondenza del fronte Nord, per la grande spaziatura assunta dai piani di stratificazione (dell'ordine delle decine di metri), si rinvengono blocchi colonnari, talora di altezza quasi prossima a quella dell'intera Rocca.

I raggruppamenti 2, 3 e 4, caratterizzati da inclinazioni elevate, interessano l'ammasso in studio con orientazione rispettivamente NE-SO, NO-SE e circa E-O (Fig. 6). Tali famiglie sono strettamente correlate ai principali lineamenti tettonici dominanti nell'area. Infatti, la Rocca è solcata da due faglie di carattere distensivo, che formano una "V" rivolta verso meridione, grosso modo ortogonali tra loro e rispettivamente orientate l'una NE-SO e l'altra NO-SE, che rappresentano il contatto tettonico tra i "Calcarei della formazione di Cefalù" e i depositi terrigeni flyschoidi sovrastanti (Grasso *et al.*, 1978; ISPRA, 2012 con bibliografia). Inoltre, l'area in studio è dominata da un altro lineamento tettonico, anch'esso subverticale, orientato circa E-O e da faglie secondarie N-S (ISPRA, 2012 con bibliografia); tale orientazione coincide con quella della famiglia 5. I sistemi geostrutturali innanzi indicati, raggruppando discontinuità di natura tettonica, molto inclinate e visibilmente continue lungo le pareti principali, sarebbero responsabili della conformazione ripida rispettivamente delle pareti nord-occidentale e

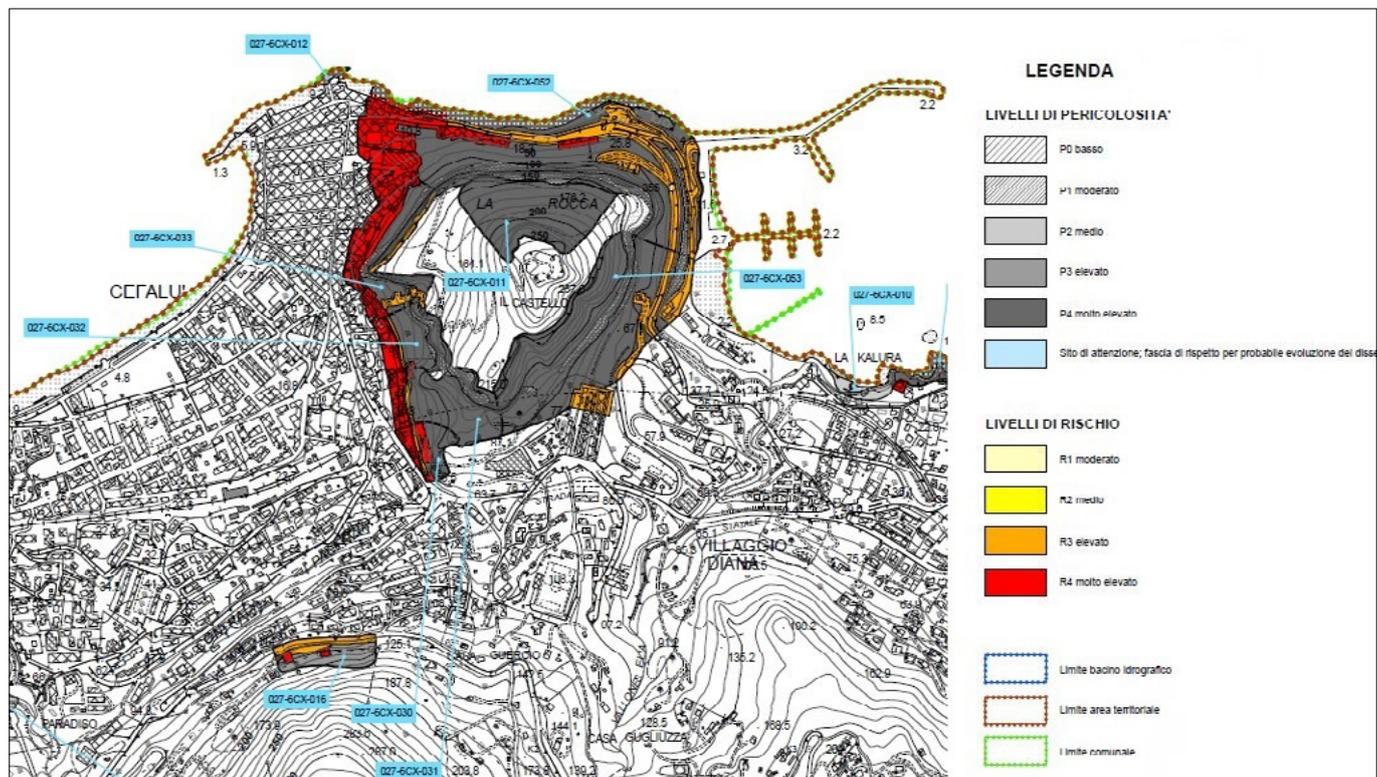


Figura 11. Stralcio della Carta P.A.I. relativa a Pericolosità e Rischio Idrogeologico con legenda (Regione Siciliana, Dipartimento Territorio e Ambiente, "Assetto del Territorio e Difesa del Suolo", 2014)

sud-orientale (direttrice NE-SO), della parete sud-occidentale (direttrice NO-SE), e della parete nord (direttrice E-O), relitti, con molta probabilità, di specchi di faglia. La presenza di tali sistemi tettonici nella Rocca è responsabile dell'indebolimento di tutto il complesso strutturale. Infatti, il processo di fagliazione a blocchi ha determinato l'isolamento del promontorio, ribassandone le zone marginali e producendo grandi scarpate di faglia lambite dal mare (Di Maggio *et al.*, 2017).

## 6. ANALISI E VALUTAZIONE DEL RISCHIO IDROGEOLOGICO

### 6.1 DISSESTO IDROGEOLOGICO, PERICOLOSITÀ E RISCHIO CARTOGRAFATI DAL PAI

Nel Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.) relativo all'area territoriale compresa tra il bacino del Fiume Pollina e il bacino del Fiume Lascari o Torrente Piletto (n° 027), in cui ricade il Comune di Cefalù, comprensivo della sua Rocca, vengono individuati n° 7 dissesti di crollo insistenti sulla Rocca e le zone a pericolosità e rischio evidenziate in Fig. 11.

### 6.2 POSSIBILI CINEMATISMI E MECCANISMI DI ROTTURA

Al fine di individuare i possibili cinematismi dei blocchi nella Rocca di Cefalù sono state confrontate le orien-

Fronte	$\alpha$	$\beta$	Cinematismi
Nord	80°	358°	Toppling
Nord-Est	80°	110°	Sliding (planar failure)
			Toppling
Sud-Est	80°	139°	Falling
			Toppling
Sud-Ovest	80°	245°	Falling
			Sliding (planar failure)
			Sliding (wedge failure)
			Toppling
Nord-Ovest	80°	310°	Falling
			Sliding (planar failure)
			Sliding (wedge failure)
			Toppling
			Falling

Figura 12. Orientazione dei principali fronti della Rocca e cinematismi possibili

tazioni delle famiglie individuate nel modello geomeccanico con quelle dei singoli fronti della rupe. In Fig. 12 sono, altresì, indicati i possibili cinematismi nei singoli fronti.

Alcuni dei blocchi in equilibrio instabile per i cinematismi sopra indicati sono visibili nelle Figg. 13, 14, 15 e 16 (Cafiso F., 2007).

In conclusione, in corrispondenza di tutti i fronti della Rocca risultano cinematicamente e, sotto particolari condizioni di carico, anche meccanicamente possibili, fenomeni di instabili-

tà di blocchi lapidei soggetti a sliding, toppling e falling per mancanza del piede alla base. La condizione meccanica si verifica per incremento delle forze squilibranti (sliding, falling) o dei loro momenti rispetto all'asse istantaneo di rotazione (toppling) causato dal sisma o dalla spinta idraulica esercitata dal materiale pelitico di riempimento delle discontinuità saturatosi a seguito di precipitazioni intense e continue, come risulta dagli ultimi crolli documentati. È stato, pertanto, confermato il livello di pericolosità P4 indicato nel P.A.I.

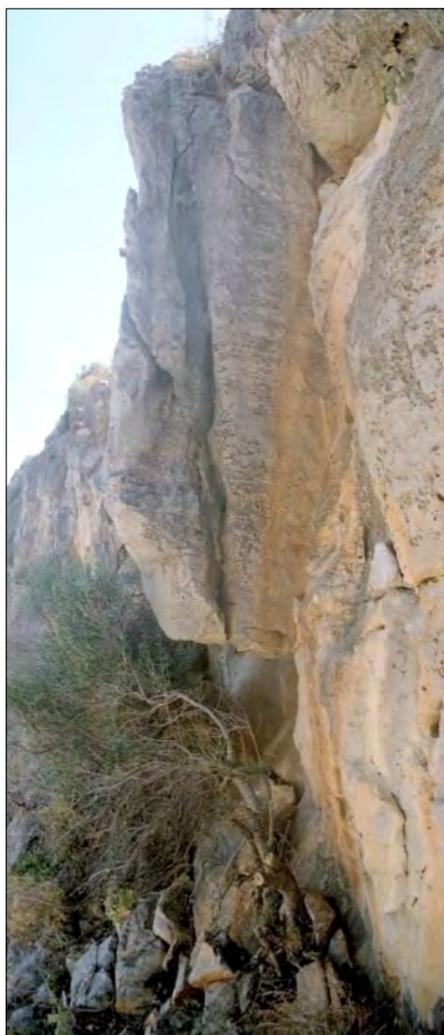


Figura 15. Esempio di ribaltamento (Cafiso, 2007)

Figura 16. Esempio di scivolamento (Cafiso, 2007)

stinguendo le caratteristiche litostratigrafiche e meccaniche dei terreni in affioramento nel pendio ove si esplica il moto dei blocchi, al fine di effettuare una prima valutazione dei coefficienti di restituzione energetica da letteratura (Azzoni e De Freitas, 1995). Il modello di calcolo è stato, quindi, ottimizzato mediante back-analysis di due crolli

(2002, 2007) di cui si conoscono la nicchia di distacco, il percorso seguito e il punto di arresto. L'elaborazione è stata sviluppata simulando complessivamente 2.250 scendimenti, che si dipartono dalla cresta della Rocca (Fig. 17).

Si rileva che all'interno dell'area delimitata dalla linea azzurra a contorno, che individua la massima espansione dei

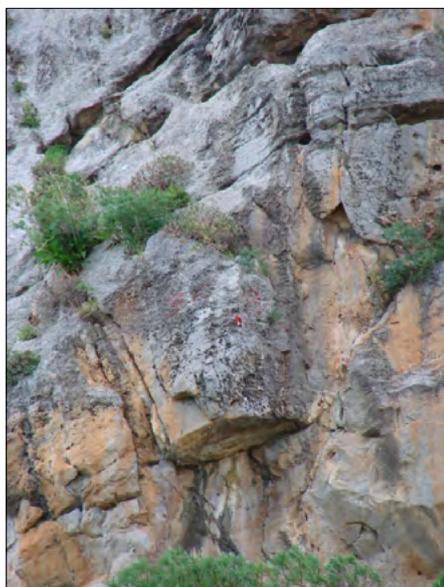


Figure 13 e 14. Esempi di crollo (Cafiso, 2007)

### 6.3 VULNERABILITÀ DEL CENTRO ABITATO NEI CONFRONTI DELLA CADUTA MASSI DELLA ROCCA

Per definire gli effetti di eventuali crolli di massi dalla Rocca sulle zone urbanizzate sottostanti è stato effettuato lo studio delle traiettorie dei blocchi mediante un codice di calcolo 3D che utilizza il modello "lumped mass". A tal fine è stato preliminarmente eseguito un rilievo geologico di superficie, di-



Figura 17. Traiettorie dei blocchi lapidei in caduta dalla Rocca e delimitazione dell'area vulnerabile presente a valle dei fronti rocciosi, in scala 1:5.000



Figura 18. Mappa del rischio di caduta massi della Rocca di Cefalù, in scala 1:5.000: si evidenzia con colorazione arancione il livello di rischio elevato R3 e con colorazione rossa il livello di rischio molto elevato R4

blocchi, ricadono l'intero centro storico di Cefalù con la Cattedrale normanna e gli altri monumenti medioevali e barocchi, nonché le zone di nuova espansione a Sud-Est con il cimitero e la strada di accesso al porto a Nord-Est.

#### 6.4 RISCHIO IDROGEOLOGICO PER CADUTA MASSI DALLA ROCCA

Utilizzando i dati acquisiti sulla pericolosità della Rocca e sulla interferenza delle traiettorie dei blocchi con le zone urbanizzate a valle, è stata effettuata la mappatura del rischio di caduta massi (Fig. 18), che evidenzia i seguenti livelli di rischio:

- *elevato R3* per la via Candeloro, che si sviluppa alle pendici della parete Nord della Rocca, e *molto elevato R4* per le case ivi presenti;
- *elevato R3* per la via del Faro, che si snoda alla base del fronte Nord-Est della Rocca;
- *elevato R3* per il cimitero presente a valle del fronte Sud-Est della Rocca;
- *molto elevato R4* per la zona urbanizzata di Cefalù presente alla base del fronte Sud-Ovest della Rocca;
- *molto elevato R4* per il tratto del centro storico di Cefalù, con la Cattedrale, che insiste al piede del versante Nord-Ovest della Rocca.

Dal confronto tra le carte del rischio di Fig. 11 e di Fig. 18, emerge che le aree a rischio di caduta massi dalla Rocca risultano più ampie di quelle indicate nel Piano Stralcio di Bacino per l'Assetto Idrogeologico (P.A.I.), ed in particolare:

- in corrispondenza del fronte Sud-Est gran parte del cimitero ricade in un'area a rischio *elevato R3* non indicata nel P.A.I.;
- in corrispondenza dei fronti Sud-Ovest e Nord-Ovest l'area a rischio *molto elevato R4* risulta più ampia e costeggia il Corso Ruggero, strada principale di Cefalù.

## 7. INTERVENTI DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO IDROGEOLOGICO

Negli anni Sessanta del secolo scorso sono stati realizzati interventi di mitigazione del rischio di caduta massi di tipo passivo, costituiti da barriere paramassi rigide interposte tra la Rocca e il centro storico.

Dagli anni Novanta sino alla data attuale si è proceduto con interventi di tipo misto comprendenti, cioè, barriere paramassi ad elevato assorbimento di energia (M.E.L. = 2.000 kJ) e interventi di consolidamento in parete. Questi ultimi sono di carattere esteso, in corrispondenza della fascia sommitale della Rocca, ove la roccia si presenta più fratturata (Fig. 19), ma anche puntuale, in quanto riguardano singoli blocchi lapidei in equilibrio instabile (Fig. 20).



Figura 19. Intervento di consolidamento di carattere esteso della fascia sommitale della Rocca con pannelli di funi (Cafiso, 2007)

La strategia di intervento individua le opere di difesa passiva efficaci nei confronti della mitigazione del rischio di crollo determinata dai numerosissimi blocchi in equilibrio instabile di dimensioni in generale inferiori a circa 3 m<sup>3</sup> che, infatti, in caso di crollo verranno arrestati dalle barriere ad elevato assorbimento di energia.

Quelli di volumetria maggiore in equilibrio instabile, in numero decisamente minore, vengono stabilizzati con imbracature e/o placcaggi. La fascia superiore della Rocca va consolidata con pannelli di funi al fine di garantire le condizioni di sicurezza delle maestranze impegnate nei sottostanti interventi di consolidamento dei grossi blocchi. Allo stato attuale sono stati realizzati



Figura 20. Pannelli di funi in acciaio zincato con diametro di 8 mm armati con funi di maggiore diametro (Cafiso, 2007)

interventi in corrispondenza dei fronti Sud-Ovest e Nord-Ovest (Cafiso F., 1996÷1998, 2007), mentre sono in corso nei fronti Nord e Nord-est. Le conclusioni del presente studio hanno come finalità quella di attivare ulteriori interventi, finora non previsti, in corrispondenza del fronte Sud-Est.

## 8. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Il presente lavoro è stato sviluppato al fine di individuare le effettive condizioni di rischio per caduta massi per la cittadina di Cefalù. In particolare, è stato ricostruito il modello geomeccanico dell'ammasso roccioso, mediante cui sono state accertate condizioni di pericolosità molto elevata per la Rocca, in cui sono presenti numerosi blocchi per i quali risultano cinematicamente e meccanicamente possibili fenomeni di sliding, toppling e falling. Sono state, quindi, studiate le possibili interferenze tra i massi eventualmente crollati dalla Rupe e la zona urbanizzata esposta che, di fatto, è distribuita intorno all'intero perimetro della Rocca. Infine, coniugando la pericolosità della Rocca, "sorgente" di crolli, e la vulnerabilità della zona urbanizzata potenziale "bersaglio", è stata effettuata la mappatura delle aree a rischio, che sono più estese di quelle indicate nel vigente P.A.I. Il risultato è particolarmente significativo, in quanto ottenuto con uno studio di dettaglio basato sui risultati di ispezioni dirette in parete con metodi di progressione su corda, rilievi con sistema SRFA, analisi probabilistica delle traiettorie con modello 3D tarato effettuando back-analysis di due crolli di cui sono note le caratteristiche cinematiche. Di conseguenza, si propone un aggiornamento della carta di rischio idrogeologico del

Progetto P.A.I., nel rispetto delle sue linee guida che ne evidenziano l'aspetto dinamico nella sua rimodulazione sulla base di studi di dettaglio. In particolare, si segnalano le condizioni di rischio molto elevato per la periferia Sud-Est di Cefalù, non considerate nel P.A.I. e, quindi, la necessità di interventi di mitigazione quali quelli già realizzati o in corso in corrispondenza degli altri fronti della Rocca.

## BIBLIOGRAFIA

- AZZONI A., DE FREITAS M.H. (1995), *Experimentally gained parameters, decisive for rockfall analysis*. Rock Mechanics and Rock Engineering 28 (2), cit., pp. 111÷124.
- CAFISO F. (1996÷1998), *Progetto Esecutivo degli interventi per il consolidamento dell'elipporto e del costone roccioso sovrastante l'abitato di Cefalù*, Palermo.
- CAFISO F. (2007), *Progetto Esecutivo degli interventi di Mitigazione del rischio idrogeologico della Rocca di Cefalù*, Palermo.
- DI MAGGIO C., MADONIA G., VATTANO M., AGNESI V., MONTELEONE S. (2017), *Geo-morphological evolution of western Sicily, Italy*, Geologica Carpathica, 68(1), cit., pagg. 80÷93.
- GRASSO M., LENTINI F. & VEZZANI L. (1978), *Lineamenti stratigrafico-strutturali delle Madonie (Sicilia centro-settentrionale)*, Geol. Romana, vol. 17, cit., pagg. 45-69, 1 Tab, 1 carta geol, ft, Roma.
- INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS (ISRM) (1978) *Suggested methods for the quantitative description of discontinuities in rock masses*. Int. Jour. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., Vol. 15, cit., pagg. 319÷368.
- ISPRA (2012) *Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000. Foglio 597 Cefalù - 610 Castelbuono*, Servizio Geologico d'Italia, Regione Siciliana.
- REGIONE SICILIANA, DIPARTIMENTO TERRITORIO E AMBIENTE, "ASSETTO DEL TERRITORIO E DIFESA DEL SUOLO" (2014), *Carta della pericolosità e del rischio idrogeologico P.A.I.*