

Analisi dei fenomeni di crollo in condizioni statiche e dinamiche delle coste garganiche: il caso di Peschici (FG)

Monia Calista, Nicola Sciarra, Barbara Di Giandomenico, Camilla De Girolamo

Dipartimento di Geotecnologie per l'Ambiente ed il Territorio - Università degli Studi "G. d'Annunzio" di Chieti-Pescara
m.calista@unich.it, nsciarra@unich.it, bdigiandomenico@unich.it, goblinsas@alice.it

Static and dynamic rock stability in the Gargano Promontory cliffs: the case of Peschici (FG).

ABSTRACT; The aim of this paper is to carry out the evaluation of the rock landslides occurrence probability in static and dynamic conditions. The study deals with problems of coastal instability, referred to Gargano Promontory. We want to understand the genesis of landslide movements in Peschici village that is one of the more nice and naturalistic places of the whole area. Some kinematic analyses and numerical modeling have been carried out to determine the evolution of the investigated slopes. The work was articulated in two main phases. The first phase consists in a geomechanical survey with the aim to represent the families of discontinuities and to execute, by ROCKPACK III software, the Markland tests allowing us to characterize the possible kinematism. The second phase analyses five schematic geologic sections, oriented in various ways; these have been object of numerical analysis, using a distinct elements method (UDEC 4.0) for discontinuous models, to carry out their evolution in static and dynamic conditions. The geomechanical uniformity of the outcropping litotypes, their geological characteristics and the tectonic feature of the studied area allow us to deduce the same considerations here implemented also to the coastal areas not analyzed.

Key terms: Rockfall, Stability analysis, UDEC 4.0, Puglia Region

Termini chiave: Crolli in roccia, Analisi di stabilità, UDEC 4.0, Puglia

Riassunto

Lo scopo di questo lavoro è la valutazione della probabilità di accadimento di frane in roccia in condizioni statiche e dinamiche. Lo studio tratta di problemi di stabilità di falesie marine relative alla zona del Comune di Peschici sul Promontorio del Gargano. Abbiamo voluto conoscere la genesi e l'evoluzione di questi fenomeni in quanto la località indagata è tra i luoghi più interessanti dal punto di vista ambientale dell'area.

Il lavoro è stato articolato in due fasi. La prima è consistita nel rilevamento geomeccanico con lo scopo di evidenziare le principali famiglie di discontinuità dell'ammasso roccioso utilizzando il test di Markland (ROCKPACK III) per l'analisi dei possibili cinematismi.

La seconda fase ha inteso modellizzare una serie di sezioni ritenute strategiche, che comprendessero le principali famiglie di discontinuità, indagando con il software UDEC 4.0 (codice di calcolo agli elementi distinti) la stabilità delle falesie prescelte.

Le analisi sono state eseguite anche in condizioni dinamiche utilizzando un input accelerometrico ricavato sulla base della normativa sismica vigente ($a_g = 0.25 g$). L'uniformità geomeccanica dei litotipi affioranti, le loro caratteristiche geologiche e strutturali permettono di utilizzare i risultati dello studio anche nelle aree, lungo la costa, limitrofe alla zona indagata.

1. Introduzione

Le analisi di stabilità rappresentano un valido strumento per valutare la probabilità di innesco di fenomeni di crollo e per ottenere indicazioni sulla pericolosità in aree attualmente a rischio di frana e sulla vulnerabilità di fabbricati situati in prossimità di falesie, è il caso analizzato nel presente lavoro (Figura 1).

L'area indagata copre alcuni tratti costieri del territorio di Peschici, per un'estensione di circa 10 km, ed è compresa nella parte nord-orientale del Promontorio Garganico.

In particolare, il comune di Peschici è ubicato in una zona direttamente a picco sul mare, poggiante su una falesia di inestimabile bellezza alla quota di 70 metri s.l.m..

La fascia costiera del Promontorio garganico, in cui ricade l'area oggetto di indagine, è caratterizzata da una ampia varietà di morfologie, tra cui si individuano falesie calcaree, conglomeratiche, ampie spiagge del tipo a "falcate", valli sospese, baie, cale e forme minori.

Il lavoro si articolerà nella caratterizzazione geomeccanica dei terreni presenti e nella verifica, con metodi statici e dinamici, della stabilità di falesie naturali ad alto valore paesaggistico.



Figura 1: Panoramica della “Rupe Castello” (Peschici).
Figure 1: View of “Rupe Castello” (Peschici village).

2. Inquadramento geologico-geomorfologico

Il Promontorio del Gargano è il risultato di una lunga storia geologica di centinaia di milioni di anni, caratterizzata da eventi di vario tipo. In tali eventi sono compresi i processi di sedimentazione e successiva diagenesi che hanno dato origine alle rocce del promontorio che, in seguito, sono state dislocate e frammentate da processi tettonici e modellate da agenti geomorfici operanti sia in superficie che nella parte più interna e profonda dell'area in esame.

Il Promontorio del Gargano rappresenta la porzione più settentrionale e più elevata dell'avampese Apulo. La sua struttura è costituita da una potente successione di sedimenti calcareo-dolomitici di età giurassico-cretacea, poggianti su terreni evaporatici triassici riferibili alle Anidriti di Burano, risultato di una lunga evoluzione di un ambiente di scogliera (Cremonini *et alii*, 1971) sostituito nel Cretaceo inferiore da una piattaforma carbonatica (Masse & Luperto Sinni, 1987).

Su questa successione, lungo il perimetro del Promontorio, sono dislocati in maniera discontinua sedimenti calcarenitici riferibili a diversi episodi trasgressivi avvenuti fra il Paleocene e il Quaternario.

I sedimenti quaternari si rinvengono nell'area a Sud del Lago di Lesina, ad Est del Lago di Varano, ricoprono localmente il Piano Grande di Vieste, l'ampio terrazzo posto ad Ovest di Manfredonia e alcuni tratti costieri. Essi sono costituiti da spiagge attuali, lidi, dune recenti, depositi alluvionali attuali e recenti, detriti di falda, depositi eluviali e colluviali e depositi costieri terrazzati.

Le unità geolitologiche affioranti nell'area in studio

(Figura 2), a partire dai termini stratigrafici più antichi, sono le seguenti:

- *Calcarei tipo Maiolica*: Si tratta di calcari micritici e biomicritici compatti di colore bianco avorio con selce di colore bruno, nero o rossastro, che si presenta sia in noduli sferici e/o ellissoidali che in straterelli, lenti e festoni.
- *Calcarei tipo Scaglia*: Si tratta di calcari bianchi com-

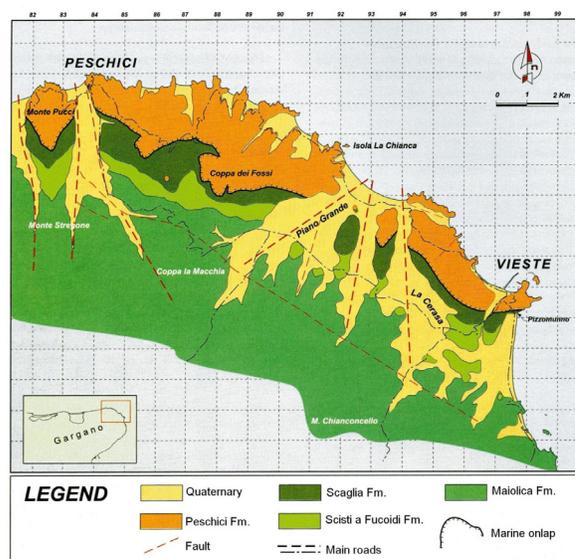


Figura 2: Carta geologica schematica del Gargano (Bosellini e Morsilli, 2000).

Figure 2: Simplified geological map of Gargano Promontory (Bosellini e Morsilli, 2000).

patti alternati a calcari farinosi e calcari marnosi, marne calcaree e argille, fittamente stratificati. La selce si trova sia diffusa in noduli sferici che in straterelli di circa 7-10 cm di spessore.

- *Calcari a Nummuliti di Peschici*: Si tratta di una successione potente 250-300 m (manca il tetto) costituita da calcari organogeni bianchi, compatti, generalmente non stratificati. A luoghi possono assumere un aspetto brecciato o possono essere sostituiti da biocalcareni grossolane con resti fossili di Echinidi, Briozoi e Nummuliti (Figura 3).

- *Depositi quaternari*, si distinguono in alluvioni recenti che affiorano lungo i tratti di costa corrispondenti agli sbocchi vallivi. Sono rappresentati da depositi terrigeni che occupano le piane dei fondovalle sottoforma di conoidi. Sono costituite essenzialmente da strati e lenti di sabbie argillose, da strati e lenti di conglomerato e breccie vario di dimensioni variabili, con elementi aventi il diametro compreso tra pochi cm e più di 30 cm.

Il promontorio del Gargano risulta attualmente isolato sia dalle basse pianure del Tavoliere che dall'Appennino meridionale a causa di alcuni importanti svincoli tettonici orientati NE-SW (allineamento Fortore-Volturno e Sorrento-Manfredonia, Ciaranfi *et alii*, 1983) e NW-SE (faglia del Candelaro, Mongelli & Ricchetti, 1970).

I suddetti lineamenti sono rappresentati da sistemi di faglie dirette, inverse e trascorrenti che sono state individuate da osservazioni di campagna, dall'interpretazione di immagini satellitari Landsat del Gargano, dall'esame di fotografie aeree e da dati ottenuti con proiezioni sismiche ad alta risoluzione.

3. Assetto geomeccanico

Il centro storico del Comune di Peschici è edificato su un banco lapideo, con altezza media di circa 70 m, costituito da depositi carbonatici di età eocenica medio-superiore. Questi depositi, ascrivibili alla formazione dei Calcari a Nummuliti di Peschici, si presentano organizzati in bancate di calcitorbiditi, calcari pelagici più o meno farinosi, calcareniti e con livelli di breccie e megabreccie testimonianza di episodi franosi sinsedimentari. La stratificazione risulta talora poco evidente, laddove si riescono ad individuare giunti di strato la giacitura riscontrabile è meno inclinata del pendio (direzione E-W, immersione 20°N).

Alla base della falesia è possibile osservare dei solchi di battigia che testimoniano l'azione erosiva dei flutti sia chimica, con fenomeni di dissoluzione carsica, che meccanica, con l'allontanamento di blocchi di dimensioni minute. Tale azione erosiva si manifesta non solo alla base della falesia, ma interessa tutta la Rupe.

L'azione di dissoluzione è tanto più spinta in corrispondenza delle superfici di discontinuità che segnano tutta la falesia isolando anche blocchi di grosse dimensioni. Alcuni di questi blocchi in passato sono

franati e rimangono ai piedi della falesia a testimoniare l'episodio. Da un rilevamento geomeccanico eseguito da rocciatori sulle pareti della rupe è risultato che la Rupe è attraversata da una serie di fratture di varia entità. Nel tratto preso in esame, corrispondente alla porzione di rupe sottostante il castello (Figura 4), prevale un sistema di fratture con direzione circa Nord-Sud, variabile a seconda della frattura esaminata.

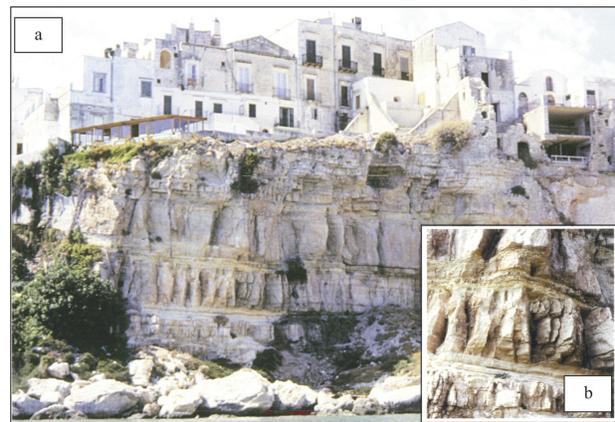


Figura 3: Formazione di Peschici, rappresentata da megabreccie gradate e torbiditi nummulitiche, alternate a calcari farinosi emipelagici (falesia del centro storico di Vieste) (Bosellini & Morsilli, 2000). a) vista panoramica ; b) particolare .

Figure 3: Peschici formation (megabreccias and turbidites with degraded limestone). a) Panoramic view; b) particular.

I piani di fratturazione sono subverticali, con una lieve immersione verso Ovest; le fratture in genere sono larghe dai cinque ai dieci centimetri e si possono osservare per una lunghezza verticale di parecchie decine di metri, prima di restringersi verso il basso fino a perdersi o scomparire in mare.

Alcune fratture si discostano notevolmente dalla direzione del sistema di fratturazione sopra menzionato; fra queste è di particolare rilievo una frattura di circa 30 cm di larghezza visibile al di sotto del fianco occidentale del castello, in corrispondenza del giardino panoramico (Figura 5). Questa frattura ha una direzione approssimativamente N70E e si sviluppa lungo un piano verticale.

Questa frattura costituisce un potenziale elemento di pericolosità per la stabilità della rupe, in quanto intercetta il sistema di fratturazione prevalente (Nord-Sud) con un angolo che varia dai 60° agli 80°, suddividendo l'ammasso roccioso in una serie di blocchi minori separati tra loro, alcuni dei quali in condizioni di stabilità precaria. A cavallo di questa linea di fratturazione sono costruiti alcuni edifici risalenti al XIV secolo.

Mentre le fratture 1-6 sono esposte solo in sezione verticale, in quanto una visione dall'alto è impedita dagli edifici costruiti proprio a ridosso della rupe, il tratto di rupe posto immediatamente ad Est del castello si presenta

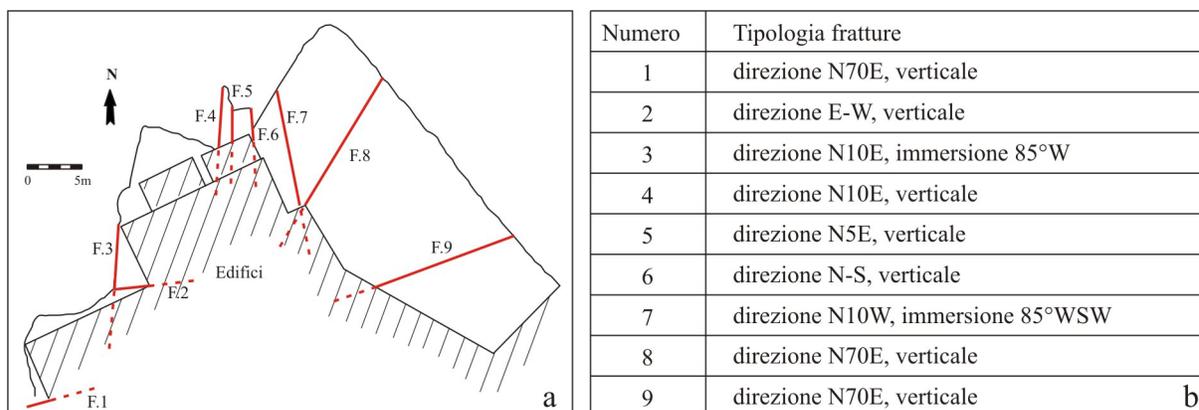


Figura 4: Schema dello stato di fratturazione della Rupe del Castello; a) planimetria dell'area; b) tipologia delle principali fratture individuate.

Figure 4: Main discontinuity families on "Rupe Castello"; a) area planimetry; b) typologies of fractures.



Figura 5: Fratture sul fianco occidentale del castello.

Figure 5: Fractures on western side of Peschici Castle.

libero da edifici e permette quindi una visione anche in pianta.

Nonostante la densa copertura di vegetazione, in quest'area sono individuabili almeno tre grandi fratture (frattura 7, 8 e 9). Di particolare interesse è la frattura 9, esposta in pianta per una lunghezza di circa 15 metri, presenta direzione N70E e si sviluppa lungo un piano circa verticale. Essa si trova esattamente nel prolungamento della frattura 1, il che suggerisce che possa trattarsi della stessa frattura; questo significherebbe che la frattura 1-9 separa l'intero blocco roccioso su cui poggia il castello dal resto della rupe.

In seguito all'indagine svolta dai rocciatori si è messo in evidenza l'effettivo stato di fessurazione e fratturazione del costone roccioso sottostante il Centro storico del paese e si sono potuti individuare porzioni dell'ammasso

in effettivo stato di equilibrio precario.

Appare quindi evidente che le fratture che interessano l'ammasso roccioso costituiscono un rischio per la stabilità complessiva della Rupe.

4. Sismicità dell'area garganica

L'area garganica presenta una sismicità piuttosto intensa (Figura 6).

Numerosi sono i terremoti che, nel corso dei secoli, hanno interessato l'area; fra i più antichi vanno menzionati quello del 493 d.C. e quello del 1627. Per quanto riguarda il primo terremoto, un recente studio (Piccardi, 1998) ha dimostrato che esso ebbe luogo lungo la faglia di Mattinata. L'evento più energetico della storia sismica dell'area garganica è quello che risale al 1627,

quando, dal 30 luglio al 6 settembre, si susseguirono 4 scosse di intensità epicentrale valutata tra l'XI e il IX grado M.C.S. che colpirono il nord della Capitanata tra Lesina e San Severo; il terremoto causò oltre 5.000 morti e fu accompagnato da un maremoto che, secondo fonti contemporanee, fece ritirare il mare di molte centinaia di metri, prosciugando il lago di Lesina, per poi abbattersi con un'onda che penetrò per due miglia nell'entroterra e aggiunse altre 150 vittime alle migliaia provocate dal terremoto che lo aveva originato (Molin & Margottini, 1981).

Altri terremoti importanti sono stati quello che il 25 agosto 1925 (M. 5.4) colpì Vieste, quello di San Severo nel 1941, quello avvenuto presso Mattinatella nel 1975 (M. 4.5) e quello del 1989 (M. 4).

Il più forte evento recente dell'area garganica si è verificato il 30.09.1995, con magnitudo M. 4.6 (VII grado M.C.S.) ed epicentro localizzato nella parte centrale del Promontorio, ad una profondità di circa 20 km.

In definitiva, dal confronto tra sismicità storica e recente, si può dedurre che nell'area nord-orientale del Gargano, in cui ricade l'abitato di Peschici, si concentra una sismicità piuttosto frequente, con intensità solitamente non molto alta.

Tale attività sismica rappresenta la testimonianza della forte attività tettonica che ha determinato le condizioni di

intensa fratturazione delle formazioni lapidee affioranti nel territorio di Peschici. Inoltre, è tra le cause scatenanti gli imponenti fenomeni di crollo presenti lungo il litorale di Peschici.

5. Rilevamento geomeccanico generale

Sono stati oggetto di rilievo geomeccanico di dettaglio, raccogliendo i parametri che descrivono in modo qualitativo e quantitativo le discontinuità presenti negli ammassi rocciosi, 13 stendimenti, di lunghezza variabile dai 5 metri ai 10.30 metri, e fino a 50 metri nel rilievo fotografico.

Tali stendimenti hanno interessato varie località tra le quali: Baia Manaccora, Spiaggia Zaiana, Baia S. Nicola, Rupe Castello, Baia Jalillo. Tale fase è stata rivolta alla delimitazione dei domini di roccia in cui era possibile effettuare una *scan line* di rilievo geomeccanico.

I parametri raccolti dal rilievo in campagna che servono per la caratterizzazione geomeccanica dell'ammasso roccioso sono: numero delle famiglie dei giunti, orientazione delle singole discontinuità, spaziatura dei giunti, rugosità dei giunti a piccola scala, resistenza a compressione delle pareti delle discontinuità, apertura dei giunti e tipo e natura dell'eventuale materiale di riempi-

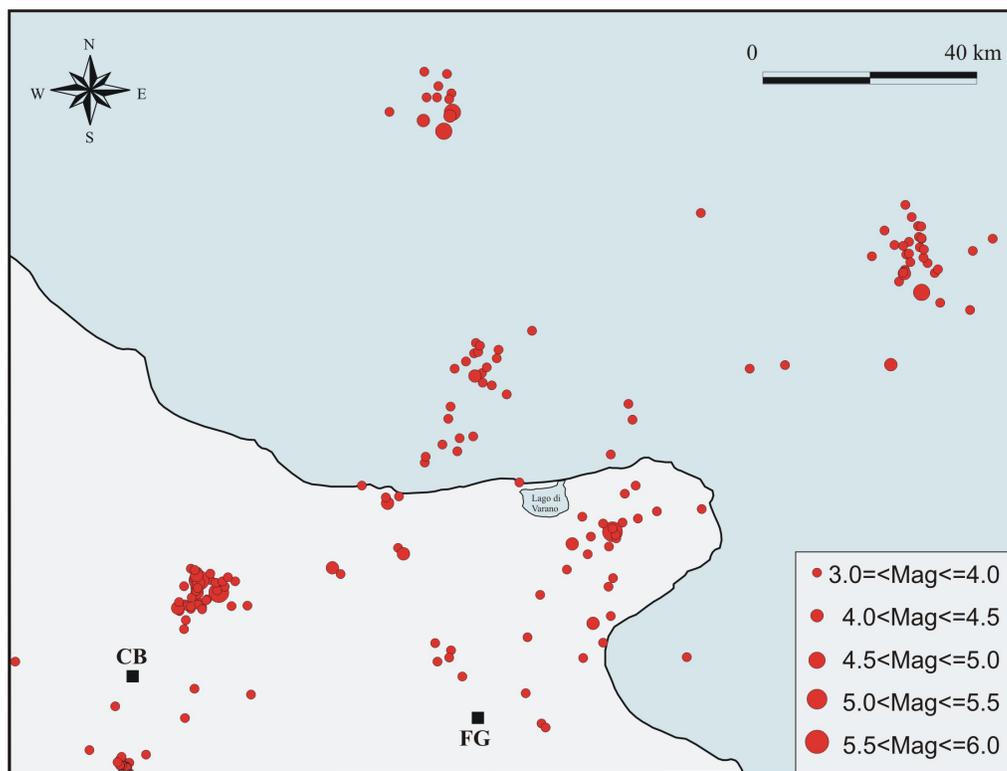


Figura 6: Distribuzione epicentrale dei terremoti ($3.0 \leq M \leq 6.0$) verificatisi nell'area garganica durante il periodo 1981-2005, riportati nel CSI (Catalogo della Sismicità Italiana 1981-2002, INGV-CNT <http://www.ingv.it/CSI/>) e nel Bollettino sismico.

Figure 6: Epicentres of Earthquakes in the garganic area between 1981-2005 ($3.0 \leq M \leq 6.0$) from the CSI catalogue and the Seismic bulletin.

mento dei giunti, condizioni idrauliche dei giunti, stato di alterazione della roccia lungo le superfici di discontinuità, terminazione dei giunti, persistenza e altezza sulla linea di scansione.

I parametri utilizzati dal programma per elaborare il grafico (*stereonet*) sono riportati nella Tabella 1 e sono:

- *Data Set*: è il numero di riferimento per la linea (*scanlines*) di rilevamento, quindi fa riferimento ad un preciso luogo, giorno...etc
- *Discontinuity*: rappresenta il numero progressivo delle fratture/faglie/stratificazione (quando si imposta uno stendimento si decide una direzione da seguire e di conseguenza tutte le strutture che intersecano la linea hanno un numero progressivo)
- *Structure*: si riferisce al tipo di struttura. Il rock pack ha una piccola legenda dove sono spiegati i simboli da attribuire alle diverse strutture che si incontrano.
- *Dip Direction*: si riferisce alla direzione di immersione della struttura rilevata
- *Dip*: si riferisce al valore della pendenza della struttura

Nelle aree indagate il rilevamento geomeccanico è stato eseguito con stendimenti lineari (*line mapping*); in località Rupe Castello, invece, è stato eseguito un rilievo fotografico (*photographic mapping*) per l'inaccessibilità dei luoghi.

Il rilievo geomeccanico è stato eseguito secondo le raccomandazioni dell'ISRM 1981 (International Society for Rock Mechanics). La scelta dell'ubicazione degli stendimenti è stata effettuata prevalentemente con l'intento di interessare porzioni di ammasso roccioso diverse da un punto di vista strutturale e geolitologico.

Tabella 1: Parametri geomeccanici relativi alle famiglie di fratture rilevate sulla Rupe Castello utilizzati nel test di Markland.
Table 1: Geomechanical parameters utilized in Markland test.

Stendi menti	Data Set	Disconti nuity	Struc ture	Dip Direction	Dip
1	3	001	06	340	80
2	3	002	03	280	80
3	3	003	03	280	75
4	3	004	03	275	89
5	3	005	03	270	89
6	3	006	03	260	89
7	2	001	06	340	89
8	2	002	03	300	89
9	3	001	06	250	80
10	3	002	03	280	80
11	3	003	03	280	75
12	3	004	03	275	89
13	3	005	03	270	89
14	3	006	03	260	89

6. Analisi dei meccanismi di rottura

Tra tutti gli stendimenti eseguiti, al fine di analizzare le condizioni di stabilità della Rupe Castello, si estrapolano

il 1rc e 2rc che ci permetteranno di seguire le successive analisi di stabilità.

Si riportano di seguito i risultati ottenuti per la loro importanza riguardo le pericolosità ed il rischio associato. Le fratture che interessano l'ammasso costituiscono un rischio per la stabilità complessiva della Rupe. La falesia sotto il centro storico è del tipo alto, impostata su calcareniti eoceniche con giacitura a franapoggio.

Tali litofacies sono soggette a fenomeni di dissoluzione carsica, sia da parte delle acque meteoriche che da parte delle acque di invasione marina.

Le fenomenologie in atto vedono l'isolamento di grossi cunei instabili soggetti a pericolo di crollo. I fabbricati del centro storico attualmente, però, non sono interessati da importanti fenomeni di instabilità in atto. Lungo le falesie sottostanti il centro storico di Peschici è stato eseguito un rilievo fotografico, tramite il quale sono state individuate le principali discontinuità. La posizione delle foto è mostrata nella Figura 7.

Stendimento 1_{rc}

Lo stendimento 1_{rc} è stato eseguito sulla base di analisi di fotointerpretazione per l'inaccessibilità dei luoghi. E' esteso circa 50 m ed è stato eseguito circa parallelamente alla parete alta 70 m ed orientata 310/89. Dai dati ottenuti dall'analisi delle foto sono emerse tre famiglie di discontinuità:

Famiglia 1: costituita da una faglia, con orientazione 340/80;

Famiglia 2: costituita da fratture importanti, con orientazione 284/77;

Famiglia 3: costituita da fratture piccole, con orientazione 288/89.

Di queste, in base al test di Markland (1972), soltanto la 1 e la 2 ricadono nella zona critica, quindi, lungo di esse può esserci movimento.

Il tipo di cinematismo più probabile, data la verticalità delle discontinuità, è il ribaltamento diretto; esso potrebbe interessare i blocchi individuati dalle fratture appartenenti alle due famiglie e dalla stratificazione.

In Figura 8a è possibile notare che dei blocchi instabili vengono isolati anche dall'intersezione delle due famiglie di discontinuità, infatti, il punto di intersezione ricade nella zona critica.

L'area, antistante la parete, in cui questi blocchi potrebbero ribaltarsi è mostrata in Figura 8b. Nelle condizioni attuali la parete è considerata stabile; infatti, dal calcolo del fattore di sicurezza è emerso un valore superiore all'unità ($F_s > 1$).

La parete interessata dallo stendimento 1_{rc} è circa parallela alla traccia della sezione E-E', lungo la sarà effettuata l'analisi di stabilità statica e dinamica con il software UDEC.

Stendimento 2_{rc}

Lo stendimento 2_{rc}, anch'esso eseguito sulla base di analisi di fotointerpretazione per l'inaccessibilità dei luog-

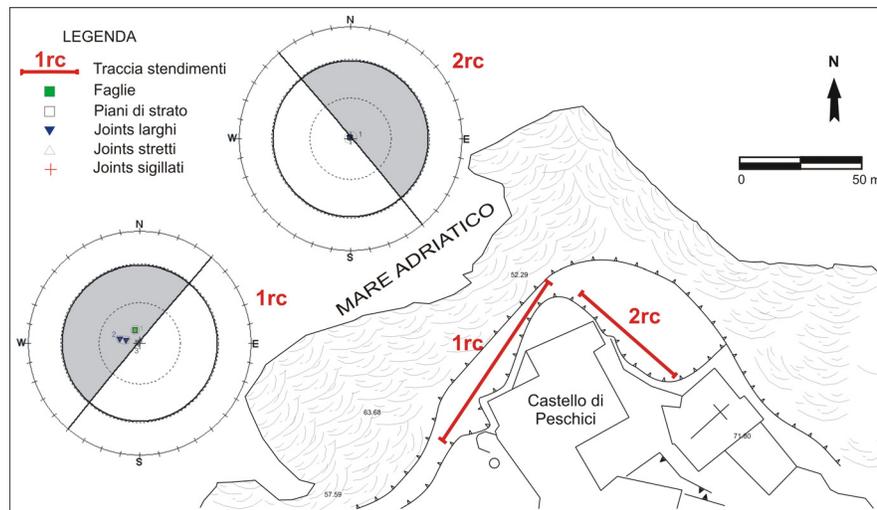


Figura 7: Ubicazione e relativa distribuzione delle discontinuità in corrispondenza degli stendimenti presso la “Rupe Castello”
 Figure 7: Location and distribution of discontinuities along the section line nearly “Rupe Castello”.

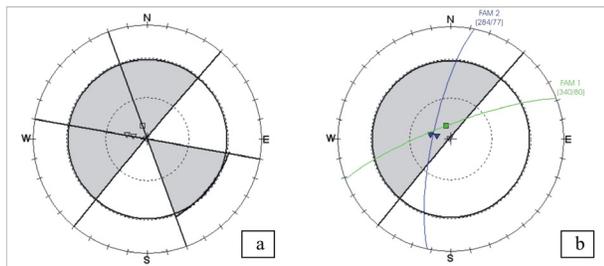


Figura 8: Test di Markland per lo scorrimento cuneiforme (a), per il ribaltamento diretto (b).

Figure 8: Markland test for wedge slide (a) and direct toppling (b).

ghi, è esteso circa 25 m ed è stato eseguito circa parallelamente alla parete alta 70 m ed orientata 050/89. Dai dati ottenuti dall’analisi delle foto è emersa una sola famiglia di discontinuità.

Famiglia 1: costituita da fratture, con orientazione 326/88.

In base al test di Markland, nessuna delle fratture appartenenti a questa famiglia ricade nella zona critica, quindi, la parete in esame può essere considerata stabile.

7. Modellazione numerica

L’instaurarsi di fenomeni di crollo, nel tratto in esame, richiede l’intervento di fattori perturbativi della stabilità, come gli eventi sismici, il moto ondoso e la riduzione delle proprietà meccaniche sul sistema fratturato. Infatti, il limite tra la condizione stabile e quella instabile è strettamente legato alla probabilità che le forze applicate possano cambiare. Pertanto, il concetto di stabilità è connesso alla valutazione degli elementi (terremoti, erosione alla base, riduzioni delle caratteristiche meccaniche ecc) che concorrono alla perturbabilità del sistema.

Vista la completa verticalità delle pareti della rupe e l’assoluta inaccessibilità, se non da mare, all’intero affioramento, si è proceduto all’individuazione dei litotipi affioranti, alla misurazione dei relativi parametri geomeccanici e alla valutazione dell’effettivo stato di fessurazione dell’ammasso utilizzando dei dati messi a disposizione dal Comune di Peschici e ottenuti con l’ausilio di rocciatori specializzati, che hanno effettuato le misure calandosi con delle tecniche alpinistiche.

Proprio per avere un’idea di quelle che sono attualmente le reali condizioni di stabilità della *Rupe del Castello*, nel presente lavoro è stata effettuata un’analisi di stabilità del costone. Tale analisi è stata eseguita prima in condizioni statiche e successivamente in condizioni dinamiche. L’idea di eseguire un’analisi dinamica nasce dal fatto che il territorio di Peschici è caratterizzato da una sismicità abbastanza elevata, quindi, fenomeni di crollo di blocchi litoidi in stabilità precaria potrebbero verificarsi contemporaneamente o successivamente ad un evento sismico di una certa entità. L’analisi di stabilità, è stata svolta attraverso l’utilizzo di un software bidimensionale di modellazione numerica agli elementi distinti UDEC 4.0 (2004).

L’ UDEC simula la risposta di un mezzo discontinuo, come un ammasso roccioso fratturato, soggetto a carichi statici o dinamici.

E’ uno dei più recenti programmi bi-dimensionali ad essere stato messo a punto per combinare in un unico codice di calcolo le equazioni per rappresentare sia i blocchi rigidi che i blocchi deformabili separati da discontinuità. Il mezzo discontinuo è rappresentato come un insieme di blocchi discreti; le discontinuità sono considerate come confini tra i blocchi; sono permessi grandi spostamenti lungo le discontinuità e rotazioni dei blocchi.

I blocchi individuali si comportano come rigidi o

deformabili. I blocchi deformabili sono suddivisi in una griglia di elementi finiti e ogni elemento risponde in accordo ad una legge prestabilita di sforzo-deformazione lineare o non lineare. Il movimento relativo delle discontinuità, sia nella direzione normale che in quella di taglio, è anche governato da relazioni, lineari o non lineari, forza-spostamento.

Con UDEC si possono rappresentare diversi modelli del comportamento del materiale, sia per i blocchi integri che per le discontinuità, che permettono la simulazione della risposta rappresentativa dei diversi materiali.

Sia sugli affioramenti della *Rupe Castello* che in aree contigue, è stata riscontrata la presenza nella successione stratigrafica di diverse litologie. Schematicamente, dall'alto verso il basso, la successione è la seguente: Calcari bianchi a grana fine; Calcareniti bianche e grigie; Breccie e megabreccie calcaree ben cementate; Calcareniti organogene.

I due livelli, al tetto e alla base della successione stratigrafica, appartengono alla stessa litologia, quella dei calcari a grana fine e quindi nei parametri meccanici si vede come vengono mantenute le stesse caratteristiche.

Sui litotipi propri della rupe è stata eseguita un'indagine geomeccanico-strutturale che oltre ad individuare le principali discontinuità che interessano la rupe ha permesso di determinare i parametri meccanici delle fratture interessanti i diversi litotipi.

Il rilievo geologico-tecnico condotto secondo lo schema proposto da Bieniawski (1989) si è basato sulla determinazione di parametri quali la coesione (c), il modulo di Young (E), l'angolo di attrito (ϕ), la densità (γ) e la resistenza a compressione uniassiale (R'_{ck}).

Per quanto riguarda la determinazione della densità (γ (t/m^3)) di ciascun litotipo si è proceduto a raccogliere campioni rappresentativi e sottoporli a specifica prova di pesata. Per valutare, invece, la resistenza a compressione uniassiale sono state effettuate più prove con il martello di Schmidt. Ogni affioramento è stato testato almeno 10 volte, in modo tale da ottenere un numero rappresentativo di risultati, i quali sono stati depurati dei valori estremamente bassi, riferibili a porzioni di superficie alterata non rappresentative; da questi risultati si è ottenuto un valore medio assunto come parametro di riferimento.

I risultati ottenuti per i diversi litotipi sono stati riassunti nella Tabella 2.

Dall'esame delle caratteristiche dei litotipi integri e dai risultati dell'analisi di Bieniawski si evince che i

litotipi integri sono particolarmente resistenti e ciò che rende scadenti le caratteristiche geomeccaniche di un materiale è proprio lo stato di fratturazione, l'ampiezza dei singoli giunti e l'intersezione dei tre diversi sistemi di fratture.

Nell'eseguire l'analisi di stabilità statica e dinamica nella fase di attribuzione dei materiali ai blocchi è stato scelto il modello costitutivo di Hoek e Brown (1998) la cui legge è:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{ci} \cdot \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_{ci}} + s \right)^a$$

dove σ_1 = stress principale massimo al picco di deformazione; σ_3 = stress principale minimo; σ_{ci} = resistenza a compressione uniassiale del materiale roccioso intatto; m_b , s e a = costanti che dipendono dalle proprietà della roccia e dal limite di rottura essendo soggetto a stress di taglio

I valori di tutti questi parametri, relativi ai quattro litotipi sono espressi in Tabella 3.

Per quanto riguarda la scelta delle dimensioni delle maglie della griglia di discretizzazione, si è utilizzato lo stesso valore di Δl sia per l'analisi statica che per quella dinamica. Essendo affioranti nell'area in studio formazioni litoidi, (suolo di categoria A) è stata considerata una $V_s > 1000$ m/s (dai parametri geomeccanici) e la frequenza di picco massima (25 Hz) così come rilevata nello spettro di Fourier dell'*input* di progetto utilizzato. Da questi parametri, utilizzando la relazione del manuale si è ottenuto un valore di Δl pari a 5 m.

Nella fase di attribuzione dei materiali ai giunti è stato scelto il modello costitutivo di Coulomb; i valori dei parametri sono elencati di seguito: rigidità normale, $jkn = 1.0E10$ (di default); rigidità di taglio, $jks = 1.0E9$ (di default); angolo di attrito, $\phi = 20^\circ$ (da letteratura); coesione, $jcoesion = 0.0$; angolo di dilatazione, $jdilation = 0.0$.

8. Analisi e interpretazione dei dati

L'analisi è stata eseguita prendendo in considerazione cinque sezioni (Figura 9), orientate in maniera diversa, in modo da avere un'idea di quella che è la stabilità della Rupe in tutte le direzioni.

L'orientazione delle sezioni è la seguente: sezione A-A' (NW-SE); sezione B-B' (NE-SW); sezione C-C' (NW-SE); sezione D-D' (WNW-ESE); sezione E-E' (N-S).

Tabella 2: Parametri geomeccanici relativi ai diversi litotipi affioranti sulla Rupe Castello.
Table 2: Geomechanical parameters of the outcropping lithotypes nearly "Rupe Castello".

	c' (MPa)	ϕ_i Litotipo integro	ϕ Ammasso roccioso	γ (kN/m ³)	E (GPa)	GSI
Calcari a grana fine	0,275	40°	32,5°	24,1	1,11	69
Calcareniti	0,257	38°	30,5°	22,3	1,04	60
Breccie e megabreccie	0,240	37°	29°	21,7	0,937	69
Calcareniti organogene	0,254	38°	30,4°	22,4	1,01	69

Tenendo conto della generalità dei dati a nostra disposizione si è pensato di eseguire queste analisi supponendo una situazione schematica. Conoscendo le caratteristiche strutturali, litologiche e geomeccaniche generali della Rupe, ed essendo questa molto uniforme dal punto di vista morfologico, le sezioni sono abbastanza simili tra loro ed altrettanto simili sono stati i risultati ottenuti.

Per ogni sezione è stato calcolato un fattore di sicurezza sia in condizioni statiche sia dinamiche facendo decadere i parametri di angolo d'attrito e di coesione dei giunti e dei piani di stratificazione.

L'analisi dinamica è stata eseguita sollecitando l'ammasso roccioso con un *input* sismico applicato alla base del modello.

L'*input* applicato è un terremoto di progetto opportunamente scalato in base alla normativa sismica ($a_g = 0.25g$)

Nella Tabella 4 sono riportati i valori dei fattori di sicurezza relativi a tutte le sezioni, è possibile osservare che tutte le sezioni ad eccezione della sezione E

presentano valori elevati dei fattori di sicurezza.

Tabella 4: Valori dei fattori di sicurezza per entrambe le analisi.
Table 4: Safety factors in both analyses.

	A	B	C	D	E
Fs statico	1.84	3.06	1.52	2.31	1.11
Fs dinamico	1.63	2.10	1.36	1.63	0.90

Per poter meglio comprendere i cinematismi riscontrati possiamo schematicamente suddividere le sezioni in due gruppi, il primo comprende le sezioni A-A' e C-C', il secondo le sezioni B-B', D-D', E-E'. Analizzeremo in dettaglio i risultati delle sezioni A-A' e E-E', perché le più rappresentative di ciascun gruppo.

La prima operazione eseguita è stata quella di riprodurre, nel modo più preciso possibile, la geometria delle sezioni; ciò è ben visibile in Figura 10 dove sono stati riportati: i profili della sezione A ed E con le relative fratture e piani di strato, la griglia di discretizzazione e la geologia dei blocchi.

Tabella 3: Parametri geomeccanici relativi ai quattro litotipi affioranti sulla Rupe Castello utilizzati per le analisi UDEC 4.0.
Table 3: Technical parameters of the main lithotypes utilized in UDEC 4.0.

	Peso di volume γ (kN/m ³)	Modulo elastico E (GPa)	a	s	mb	σ_{3max} (MPa)	σ_{ci} (MPa)
Calcari a grana fine	24,10	1.11	0.501	0.0091	1.264	18.75	75
Calcareniti	22,30	1.04	0.503	0.0023	0.925	7.5	33
Brecce e Megabrecce	21,70	0.937	0.501	0.0091	1.580	8.75	35
Calcareniti organogene	22,40	1.01	0.501	0.0091	1.580	7.5	33

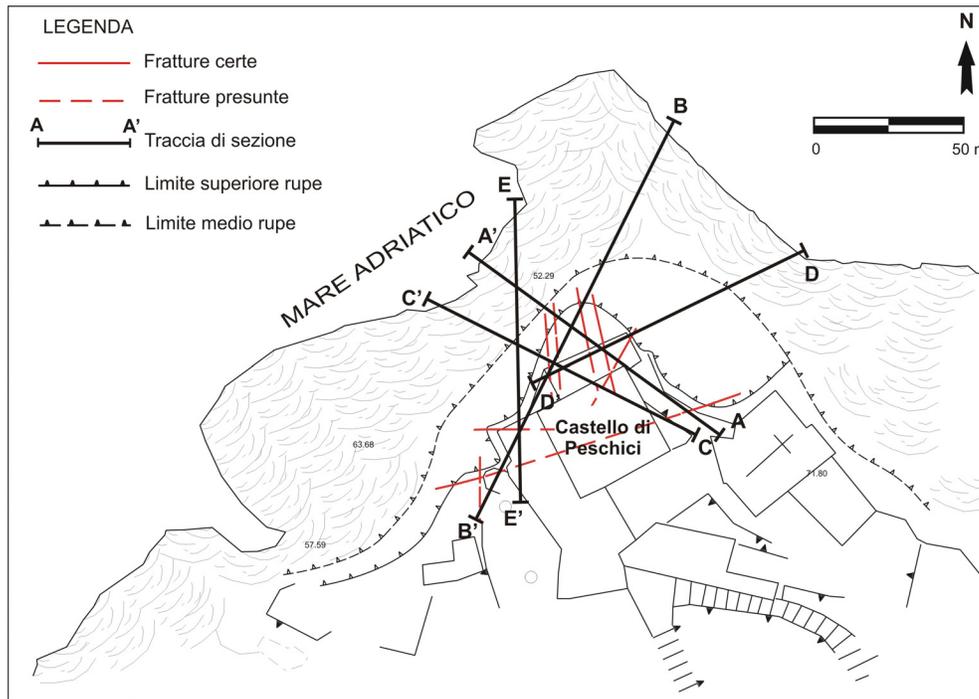


Figura 9: Ubicazione delle sezioni analizzate.
Figure 9: Location of the surveyed sections.

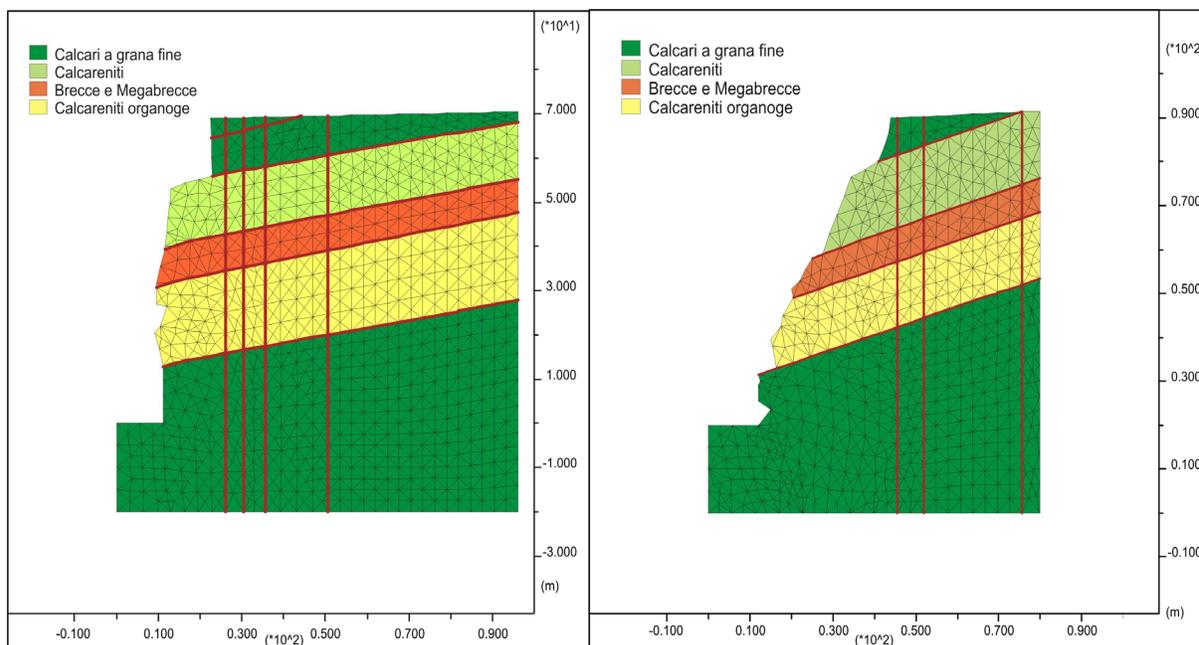


Figura 10: Schema della griglia di discretizzazione utilizzata e della litologia delle sezioni A-A' (a sinistra) e E-E' (a destra)
 Figure 10: Discretization grid and lithology of section A-A' (on the left) and E-E' (on the right).

Geologicamente le sezioni sono tutte molto simili tra loro, si differenziano solo per la geometrie della falesia e per le pendenze dei piani di strato.

Risultati della sezione A-A'

Analisi di stabilità statica

La sezione A-A' con orientazione NW-SE presenta un fattore di sicurezza statico pari a 1.84. E' possibile osservare dal diagramma relativo ai vettori spostamento (Figura 11) che questi si concentrano solo nella parte più elevata (coronamento) del versante. Il movimento si comprende meglio dal diagramma della griglia deformata, si nota infatti che i quattro blocchi tendono a scivolare sul piano di strato e tendono a separarsi lungo le fratture verticali.

Analisi di stabilità dinamica

Risultati molto simili si ottengono con l'analisi dinamica (Figura 12), ma in questo caso il fattore di sicurezza è più basso e pari a 1.63.

Inoltre è possibile notare da entrambi i diagrammi che i blocchi che risultano instabili sono solo i tre blocchi più elevati localizzati in prossimità del coronamento della scarpata, mentre il quarto non presenta movimenti percettibili.

Risultati della sezione E-E'

Analisi di stabilità statica

La sezione E-E' con orientazione N-S presenta un fattore di sicurezza statico pari a 1.11. E' possibile osservare dal diagramma relativo ai vettori spostamento (Figura 13) che questi interessano la porzione più esterna del versante ad

eccezione del basamento costituito da calcari a grana fine. Il movimento si comprende meglio dal diagramma della griglia deformata, si nota infatti che i blocchi tendono a scivolare sul piano di strato ruotando lungo le fratture verticali. E' possibile osservare anche che la frattura più interna tende ad aprirsi.

Analisi di stabilità dinamica

In questa sezione i risultati non sono molto simili a quelli che si ottengono dall'analisi statica. In questo caso il fattore di sicurezza è più basso dell'unità.

Il movimento interessa interamente le tre formazioni più superficiali. Inoltre, è possibile notare da entrambi i diagrammi che i blocchi scivolano lungo i piani di strato (Figura 14).

9. Conclusioni

Il presente lavoro ha evidenziato come lo studio della franosità in aree complesse implichi una ricerca necessariamente multidisciplinare e multiscalare.

Occorre conoscere le caratteristiche geolitologico-strutturali dell'area per individuare quegli aspetti che poi si offrono come scenari per l'attivazione di movimenti franosi. Molto importante è anche un accurato studio geomorfologico per poter individuare le aree in cui è probabile l'innescò di frane; infine, è necessario un approfondito studio geologico tecnico relativamente alla scelta dei parametri meccanici statici e dinamici che condizionano l'evoluzione degli eventi franosi ed il monitoraggio delle aree instabili.

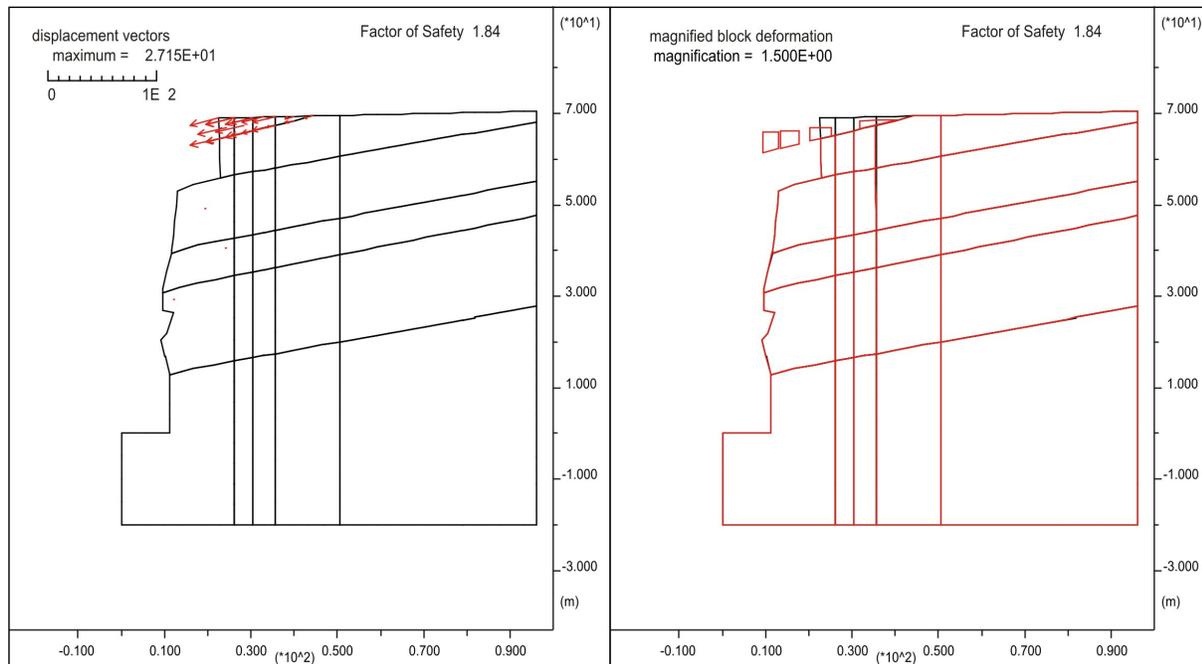


Figura 11: Schema dei vettori spostamento (a sinistra) e della griglia deformata (a destra) relativi all'analisi statica della sezione A-A'.
 Figure 11: Diagrams of displacement vectors (on the left) and deformed grid (on the right) in the static analyses on A-A' section.

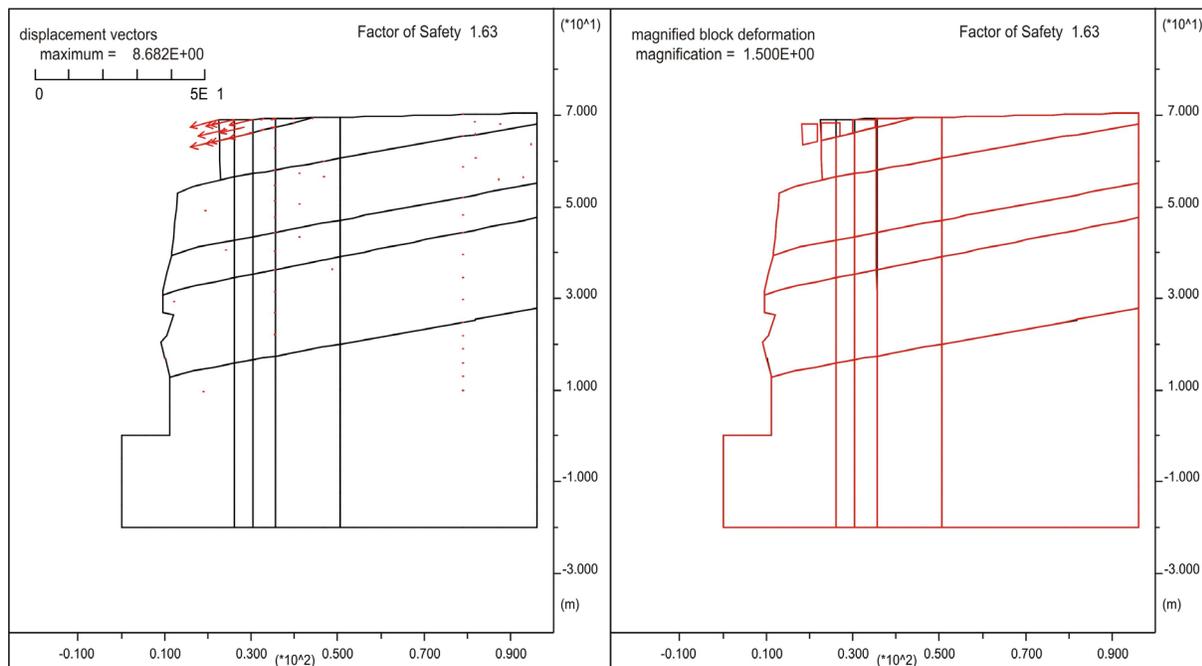


Figura 12: Schema dei vettori spostamento (a sinistra) e della griglia deformata (a destra) relativi all'analisi dinamica della sezione A-A'.
 Figure 12: Diagrams of displacement vectors (on the left) and deformed grid (on the right) in the dynamic analyses on A-A' section.

Per quanto riguarda le caratteristiche di multiscalarità del lavoro condotto, le condizioni di instabilità delle falesie, lungo la costa di Peschici, sono state studiate a scala appropriata, avendo come scopo la determinazione

del tipo di cinematismo che le potrebbe interessare.

Successivamente sono stati dedicati degli approfondimenti, ad una scala più dettagliata ad una zona che presenta le condizioni di rischio maggiore (Rupe

Castello) per la presenza al di sopra della falesia stessa di edifici storici.

Il lavoro è stato articolato in due fasi.

Nella prima fase è stato effettuato un rilevamento geomeccanico di alcuni tratti di falesia, al fine di rappresentare graficamente (*stereonet*) le famiglie di discontinuità rilevate su ognuno di essi ed eseguire, mediante il software ROCKPACK III (Watts *et alii*, 2003), il test di Markland che ci ha permesso di individuare i cinematismi che potenzialmente potrebbero interessare le

pareti in esame.

Dall'analisi di stabilità in condizioni statiche delle pareti rocciose eseguita con il test è emerso che in corrispondenza della massima parte dei tratti di costa in esame la tipologia di innesco più probabile è quella per ribaltamento diretto (*toppling*). Ciò è possibile perché le discontinuità che interessano gli ammassi rocciosi presenti nell'area di studio sono tutte quasi o completamente verticali ed orientate circa parallelamente al versante.

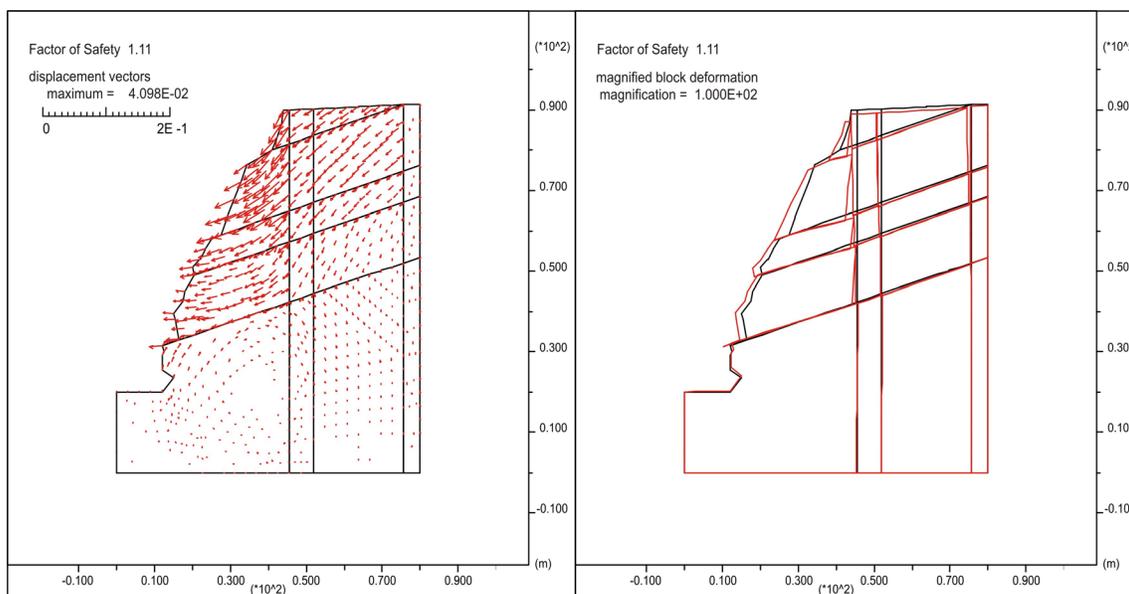


Figura 13: Schema dei vettori spostamento (a sinistra) e della griglia deformata (a destra) relativi all'analisi statica della sezione E-E'.
 Figure 13: Diagrams of displacement vectors (on the left) and deformed grid (on the right) in the static analyses on E-E' section.

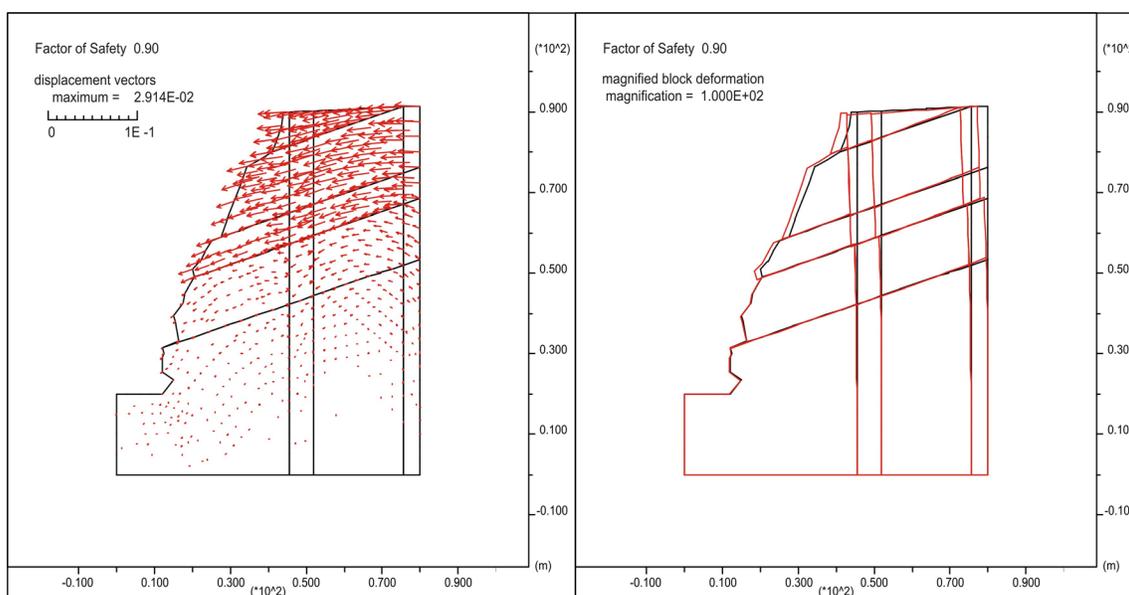


Figura 14: Schema dei vettori spostamento (a sinistra) e della griglia deformata (a destra) relativi all'analisi dinamica della sezione E-E'.
 Figure 14: Diagrams of displacement vectors (on the left) and deformed grid (on the right) in the dynamic analyses on E-E' section.

Nella seconda fase di lavoro sono state approfondite le analisi relative alle falesie della Rupe Castello, ammasso roccioso su cui è edificato il Centro Storico del Comune di Peschici. L'attenzione è stata concentrata in quest'area perché caratterizzata da rischio maggiore dovuto proprio alla presenza di fabbricati di interesse storico. Va, comunque, precisato che solo in corrispondenza dei tratti di falesia relativi alla baia Jalillo sono stati ottenuti fattori di sicurezza coincidenti con l'equilibrio limite, infatti tale zona è considerata l'area costiera più instabile di tutto il territorio. Qui, l'attuale instabilità è testimoniata soprattutto dalla presenza, in prossimità della spiaggia, di una grande quantità di blocchi, alcuni anche di dimensioni abbastanza notevoli, franati dal versante e dalla continua caduta di blocchi di dimensioni minori.

Sono state ricostruite cinque sezioni geologiche schematiche della Rupe, orientate in maniera diversa; queste sono state oggetto di analisi numerica, utilizzando un programma di calcolo agli elementi distinti, UDEC 4.0, al fine di effettuare su ognuna un'analisi di stabilità, prima statica e poi dinamica.

Dalle analisi effettuate è stato possibile suddividere le

sezioni in 2 gruppi in base al cinematiso riscontrato dalle analisi di stabilità. Nelle sezioni A-A' e C-C' i blocchi coinvolti nel movimento sono solo quelli più superficiali ed interessano solo le formazioni dei calcari a grana fine.

Nelle sezioni B-B', D-D' e E-E' tutti i blocchi al di sopra del basamento sono coinvolti nel movimento.

Tutte le sezioni risultano stabili sia in condizioni statiche sia dinamiche ad eccezione della sezione E-E' dove l'inclinazione dei piani di strato è notevolmente più elevata rispetto alle altre sezioni.

Il confronto tra i risultati ottenuti con i metodi descritti mostra che la falesia occidentale della Rupe del Castello è interessata da tipologie probabili di rottura che vanno dal ribaltamento di blocchi allo scivolamento lungo i piani di strato.

Ringraziamenti

Si ringrazia la dottoressa G.P. Della Torre per l'aiuto nella valutazione della probabilità di innesco attraverso alcune implementazioni del codice UDEC.

Bibliografia

- Bieniawski Z. T. : "Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil, and Petroleum Engineering" . Publisher: John Wiley & Sons Inc (September 01, 1989)
- Bosellini A. & Morsilli M. (2000) - Il Promontorio del Gargano: cenni di geologia e itinerari geologici. Università di Ferrara (N.S.), Sezione Scienze della Terra: 1-26.
- Ciaranfi N., Ghisetti F., Guida M., Iaccarino G., Lambiase S., Pieri P., Rapisardi L., Ricchetti G., Torre M., Tortorici L. & Vezzani L. (1983) - Carta neotettonica dell'Italia meridionale. CNR, Pubbl. n. 515 del P. F. Geodinamica, Bari.
- Cremonini G., Elmi C. & Selli R. (1971) - Note illustrative della carta geologica d'Italia, scala 1:100.000; Foglio 156 "S. Marco in Lamis". Servizio Geologico d'Italia: 1-66, Roma.
- Hoek, E. and Brown, E.T. 1980. Empirical strength criterion for rock masses. *J.Geotech. Engng Div., ASCE* 106(GT9), 1013-1035.
- ISRM (International Society for Rock) 1981: "Basic Geotechnical Description of Rock Masses". *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 18, 85-110. Great Britain: Pergamon Press Ltd. TIC 234727.
- Markland J.T. (1972). A useful technique for estimating the stability of rock slopes when the rigid wedge sliding type of failure is expected. *Imperial College Rock Mechanics Research Report*, 19.
- Masse J.P. & Luperto Sinni E. (1987) - A platform to basin transition model: the Lower Cretaceous carbonates of the Gargano Massif (Southern Italy). *Memorie Società Geologica Italiana*, 40: 99-108, Roma.
- Molin & Margottini (1981). "Impact of historical tsunamis on a sandy coastal barrier: an example from the northern Gargano coast, southern Italy". *Natural Hazards and Earth System Sciences* (2001) 1: 213-219 c European Geophysical Society 2001
- Mongelli F. & Ricchetti G. (1970) - Heat flow along the Candelaro fault, Gargano headland (Italy). *Geothermics, Special issue* 2.
- Piccardi L. (1998) - Cinematica attuale, comportamento sismico e sismologia storica della faglia di Monte S. Angelo (Gargano, Italia): la possibile rottura superficiale del "leggendario" terremoto del 493 d. C.. *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 21: 155-166, figg. 10, tab. 1.
- UDEC (2004) - Version 4.0, educational version. Itasca consulting group, inc. - Minneapolis, USA.
- Watts, C.F., Gillam, D.R., Hrovatic, M.D., and Hong, H. (2003) - *ROCKPACK III, ROCK Slope Stability Computerized Analysis PACKAGE, User's* - Radford University, Radford, Virginia