

INTERAZIONE DINAMICA TRA MOTO ONDOSI E FALESIA LUNGO LA COSTA DI POLIGNANO A MARE (PUGLIA)

Daniela Miccoli

Università degli Studi della Basilicata (Potenza)

danymiccoli@yahoo.it

Giuseppe Spilotro

Università degli Studi della Basilicata (Matera)

giuseppe.spilotro@unibas.it

Roberta Pellicani

Università degli Studi della Basilicata (Matera)

roberta.pellicani@unibas.it

Rocco Ditommaso

Università degli Studi della Basilicata (Potenza)

r.ditommaso@unibas.it

Felice C. Ponzo

Università degli Studi della Basilicata (Potenza)

felice.ponzo@unibas.it

Sommario

Lo studio del comportamento dinamico di una costa rocciosa sotto l'azione delle onde di mare è stato condotto lungo la costa di Polignano a Mare, tratto di costa adriatica pugliese. In questa zona il complesso problema della stabilità della scogliera è aggravata dalla presenza della città antica che sorge sulla sommità della falesia e dalla presenza di numerose grotte al piede della stessa.

Per analizzare il comportamento dinamico, stazionario e non stazionario, della scogliera assoggettata all'energia trasmessa dalle onde del mare, sono state effettuate due campagne di misure vibrazionali. Durante la prima, svoltasi tra Dicembre 2009 e Gennaio 2010, sono stati acquisiti dati di microtremiti e dati di mareggiate. Al contrario, durante la seconda campagna di misure vibrazionali sono state effettuate soltanto misure velocimetriche con sensori a bassa frequenza e regime di moto stazionario.

Per favorire una corretta interpretazione delle misure è stata effettuata anche una caratterizzazione geomeccanica della roccia attraverso la classificazione di Bieniawski che ha permesso di classificare le masse rocciose in termini di qualità, e il Test di Markland che ha consentito di individuare il potenziale meccanismo di rottura della falesia.

1. Introduzione

Nelle coste alte rocciose la capacità erosiva del mare è esaltata dalle caratteristiche strutturali e meccaniche della roccia, dalla morfologia dei fondali e dalle caratteristiche meteomarine. I fattori base che controllano l'instabilità della falesia sono ben noti: intensità dell'input (energia trasmessa dalle onde) e resistenza degli ammassi rocciosi esposti. Altri fattori fisico-chimici legati al degrado sono rappresentati dalla resistenza meccanica della roccia, dall'interazione acqua-sali-roccia legata a fenomeni di tipo atmosferico (spruzzi del mare), alle maree, alle precipitazioni piovose e ai fenomeni

di fatica del materiale correlati alla ciclicità dell'azione delle onde (Sunamura, 1992). A causa delle numerose variabili coinvolte, il trasferimento dell'energia delle onde sulla falesia, che è in grado di produrre instabilità, è ancora un meccanismo difficile da quantificare (Budetta *et al.*, 2000). In realtà è difficile da quantificare: (1) l'altezza d'onda, (2) come l'energia delle onde viene modificata dal fondale prima di raggiungere la costa, (3) la dissipazione dell'energia d'onda infranta vicino alla riva, (4) la pressione dinamica delle onde alla base della scogliera.

Per scogliere che interessano tratti costieri lunghi, sono stati proposti molti lavori per stimare la pericolosità da frana dal punto di vista delle interazioni tra l'energia dell'onda, il tasso di erosione e la forza di ammassi rocciosi. Questi studi prendono in considerazione una serie di fattori predisponenti, quali le caratteristiche delle onde, i tassi di erosione, i layout litologici storici o attuali.

Il relativo rischio è invece valutato in modo qualitativo (mappe geo-morfologiche, approcci euristici, ecc..) o quantitativi (analisi statistiche bivariate o multivariate, approcci deterministici, ecc..).

I crolli delle falesie possono essere episodici e discontinui nel tempo e nello spazio, si verificano quando le masse rocciose sono molto fratturate in risposta a singole grandi mareggiate. In molti casi non è stato proposto un modello quantitativo per valutare l'azione della forza delle onde e quindi uno studio sull'evoluzione cinetica della rottura a fatica della roccia, l'energia delle onde alla base delle falesie rappresenta senza dubbio un importante fattore scatenante da frana.

Lo studio proposto ha come finalità principale quella di analizzare i meccanismi di trasmissione dell'energia correlando i parametri dinamici dell'input (onde) ai parametri dinamici del sistema roccioso (falesia). In particolare, considerando i diversi regimi di moto, sono stati eseguiti monitoraggi basati su diverse tipologie di sensori caratterizzati da una diversa risposta in frequenza. Sono state investigate nel dominio delle frequenze le distribuzioni spettrali dell'energia in termini di accelerazioni, velocità e spostamenti.

2. Area di studio

Il comune di Polignano a Mare sorge in un tratto di costa adriatica pugliese rappresentato lungo il bordo superiore del Foglio n.190 "Monopoli", in scala 1:100.000 della carta geologica d'Italia dell'IGM. La morfologia dell'area urbanizzata in esame è rappresentata da una piattaforma costiera debolmente degradante verso mare, con quote che variano da circa 27m s.l.m (zona interna) a circa 12m s.l.m. (punto meno elevato della falesia rocciosa).

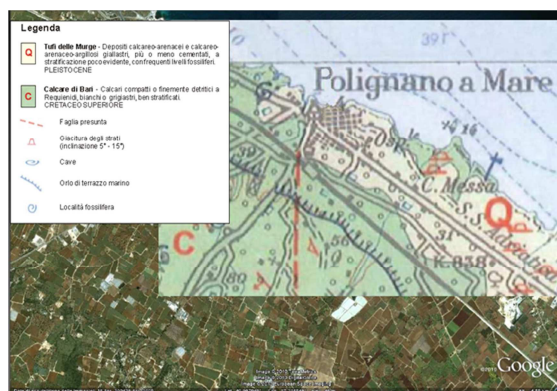


Figura 1: Inquadramento geologico dell'area circostante l'abitato di Polignano (Foglio 190 Monopoli della Carta Geologica d'Italia dell'IGM, modificato).

L'andamento morfologico della falesia è piuttosto articolato, con la presenza di insenature e promontori, la parte più antica dell'abitato di Polignano sorge infatti su un promontorio che si protende verso mare in direzione NS. Il promontorio è delimitato verso ovest da una profonda

incisione di origine fluviale (localmente denominata “lama”), la cui foce è attualmente occupata da depositi di spiaggia. La falesia rocciosa che caratterizza l’intera fascia costiera urbanizzata mostra la presenza di numerose grotte il cui sviluppo è legato all’interazione tra i diffusi fenomeni carsici tipici dell’intera costa carbonatica pugliese e l’azione erosiva del moto ondoso. Un’importante causa predisponente alla loro formazione è invece la presenza di diversi sistemi di fratture sub-verticali che, assieme alle superfici di strato sub-orizzontali dei calcari di falesia, suddividono l’ammasso roccioso della falesia in blocchi che tendono a distaccarsi dalle volte delle cavità carsico-marine.

Mentre, l’assetto geologico-strutturale di questo settore del versante adriatico delle Murge riflette la sua collocazione nel contesto geodinamico dell’Avampaese Apulo che è generalmente caratterizzato da uno stile deformativo piuttosto blando in cui faglie dirette, con rigetti per lo più compresi tra pochi metri a qualche decina di metri, e pieghe ad ampio raggio di curvatura sono gli elementi strutturali più importanti. Lo schema geologico generale del territorio è caratterizzato dalla seguente successione stratigrafica, dalla più antica alla più recente sono:

- Il Calcare di Bari affiora estesamente in tutta l’area di studio e rappresenta il substrato sedimentario su cui poggiano tutte le unità più recenti come illustrano in Figura 2.



Figura 2: Successione stratigrafica della costa di Polignano a Mare.

In generale il Calcare di Bari è costituito da calcari microfossiliferi da bianchi a grigio chiari in strati di spessore decimetrico e metrico costituiti da litofacies, a tessitura prevalentemente fango-sostenuta e subordinatamente granulo-sostenuta, a luoghi interessati da diagenesi meteorica e/o padogenesi con frequenti intercalazioni di calcari dolomitici e di dolomie grigie. Nella parte inferiore e superiore del Calcare di Bari, sono stati riconosciuti calcari macrofossiliferi a molluschi (prevalentemente rudiste), si tratta di gruppi di strati costituiti da accumuli conchigliari autoctoni o para-autoctoni con tessitura di tipo *floatstone/rudstone*, corrispondenti, dal più antico al più recente, al “livello Palese, al “livello Sannicandro” e al “livello Toritto”.

- La Calcarenite di Gravina, invece, affiora in lembi più o meno estesi sia nella fascia costiera che nelle zone più elevate, lo spessore massimo affiorante è molto variabile, da pochi decimetri fino ad un massimo di circa 20m. La Calcarenite di Gravina poggia direttamente sui calcari cretaci del Calcare di Bari e mostra caratteri di facies differenti da luogo a luogo, la parte inferiore, spesso pochi metri, è costituita da silt e sabbie limose rosse, con livelli di ciottoli calcarei bianchi, mentre la parte intermedia è comunemente costituita da calcisiltiti poco cementate di colore giallo ocra o giallo paglierino che sfumano gradualmente verso l’alto a delle calcareniti macrofossilifere che caratterizzano ovunque la facies più tipica di tale formazione. La Calcarenite di Gravina è comunemente costituita da strati e banchi suborizzontali di calcareniti e calciruditi bioclastiche e di calcari organogeni ad alghe calcaree,

scarsamente cementati e porosi. La stratificazione, generalmente mal distinta, è messa in risalto da rare superfici di erosione e più frequentemente da orizzonti costituiti da concentrazioni di macrofossili, più frequentemente lamellibranchi e/o alghe calcaree.

3. Metodologia

Come accennato in precedenza il lavoro è stato suddiviso in due fasi principali: la prima ha riguardato il rilievo geomeccanico del sistema oggetto di studio, la seconda ha riguardato indagini vibrazionali sperimentali eseguite con l'ausilio di accelerometri e velocimetri. Questo lavoro è stato diviso in due fasi, nella prima fase si è effettuata un'indagine geomeccanica che mirava a evidenziare la principali famiglie di discontinuità nella massa rocciosa, utilizzando il Rock Mass Rating (RMR) (Bieniawski 1979-1989) per classificare le masse rocciosa e il test di Markland per analizzare i potenziali meccanismi di crollo (Cancelli e Crosta 1993). La seconda fase ha riguardato il monitoraggio, focalizzato alla caratterizzazione del comportamento dinamico della scogliera sotto l'impulso generato dalle onde di mare.

3.1 Caratterizzazione geomeccanica della massa rocciosa

Sono state effettuate indagini geomeccaniche per evidenziare le principali famiglie di discontinuità degli ammassi rocciosi: il Rock Mass Rating (RMR) (Bieniawski 1979-1989), per classificare le masse rocciosa, e il Test di Markland (1972), per analizzare i potenziali meccanismi di crollo (Cancelli e Crosta 1993). La complessità della morfologia costiera e la presenza di diverse grotte, dove alcune parti di scogliera erano inaccessibili per le misurazioni, ha fatto in modo che i sondaggi si svolgessero in 2 siti dove la scogliera è caratterizzata dalla presenza di un ingresso riempito da depositi di spiaggia: lato est e lato ovest della Lama Monachile.

Per valutare le condizioni di stabilità delle pareti rocciose, sono stati eseguiti alcuni rilievi geomeccanici delle discontinuità su sei linee di scansione: quattro sul lato est di Lama Monachile e due sul lato ovest. I parametri più importanti riconosciuti nella massa rocciosa e lungo le discontinuità, necessari per determinare i valori RMR, sono stati: numero di famiglie di discontinuità, direzione di ogni discontinuità, resistenza a compressione del materiale roccioso, qualità della roccia (RQD), spaziatura tra discontinuità, persistenza, rugosità e apertura dei giunti, tipo e natura del materiale di riempimento, condizioni idrauliche. Il sondaggio geomeccanico è stato eseguito secondo gli standard ISRM (Società Internazionale per la Meccanica delle Rocce, 1981) ed ha consentito l'identificazione dei principali cinematismi presenti (riepilogati in Tabella 1).

		<i>Cinematismi</i>		
		Ribaltamento	Scivolamento su piano	Scivolamento su cuneo
<i>Siti</i>	Parete Est lama Monachile	No	No	Si
	Parete Ovest lama Monachile	Si	No	Si

Tabella 1: Principali Cinematismi individuati.

3.2 Monitoraggio del comportamento dinamico della falesia

Sulla falesia rocciosa, nei mesi di Dicembre 2009 e Gennaio 2010, sono state eseguite delle registrazioni di rumore ambientale che hanno consentito l'analisi del comportamento dinamico della falesia sottoposta sia a regimi di moto debole (microtremori) che a regimi di moto forte (mareggiata). Le registrazioni sono state effettuate con l'ausilio di accelerometri e velocimetri ad alta sensibilità

nell'intervallo di frequenze 1-30Hz. I dati sono stati analizzati sia nel dominio del tempo che in quello delle frequenze, sono stati ricavati sia parametri di tipo puntuale (PGA) che parametri a caratteri integrale (Intensità di Housner, Arias). Inoltre, al fine di individuare eventuali anisotropie comportamentali tutti i parametri sono stati valutati ruotando le componenti nel piano orizzontale. Le risultanze evidenziano la presenza di direzioni preferenziali di moto con spiccata anisotropia nell'intervallo di frequenze sopra menzionato. In Figura 3 vengono rappresentate, in giallo, le principali direzioni di moto rilevate durante le mareggiate, in rosso, le principali direzioni di moto rilevate durante le misure dei microtremori.



Figura 3: Direzioni principali di moto (Pellicani *et al.*, 2014): mareggiate (in giallo) e microtremori (in rosso).

Al fine di indagare le componenti di moto in bassa frequenza, nel mese di Febbraio 2015 è stata effettuata una seconda campagna di misure vibrazionali con l'ausilio di due velocimetri tri-direzionali: il primo, modello Sara Electronic Instruments-Geobox a 0.5Hz e, il secondo, modello Sara Electronic Instruments-Geobox a 4.5Hz. La risposta del sensore del primo strumento è praticamente piatta nell'intervallo 0.1-100Hz, al contrario, la risposta del sensore del secondo strumento può essere considerata piatta nell'intervallo 1-100Hz. L'utilizzo di tali dispositivi si è reso necessario per indagare anche le caratteristiche del moto ondoso che, come indicato dai dati della boa ondometrica, ubicata a largo di Monopoli (BA), è caratterizzato da periodi medi di oscillazione che variano tra i 4s e i 9s. Sono state effettuate registrazioni della durata di 900s utilizzando una frequenza di campionamento pari a 200Hz. In Figura 4a vengono riportati tutti i punti di misura mentre, in Figura 4b, viene mostrata l'ubicazione degli strumenti sul sito "Balconata" del quale verranno mostrati, di seguito, i principali risultati ottenuti (relativi al velocimetro a 0.5Hz). I dati forniti dallo strumento, prima di essere elaborati, sono stati deconvoluti per tener conto della risposta strumentale.

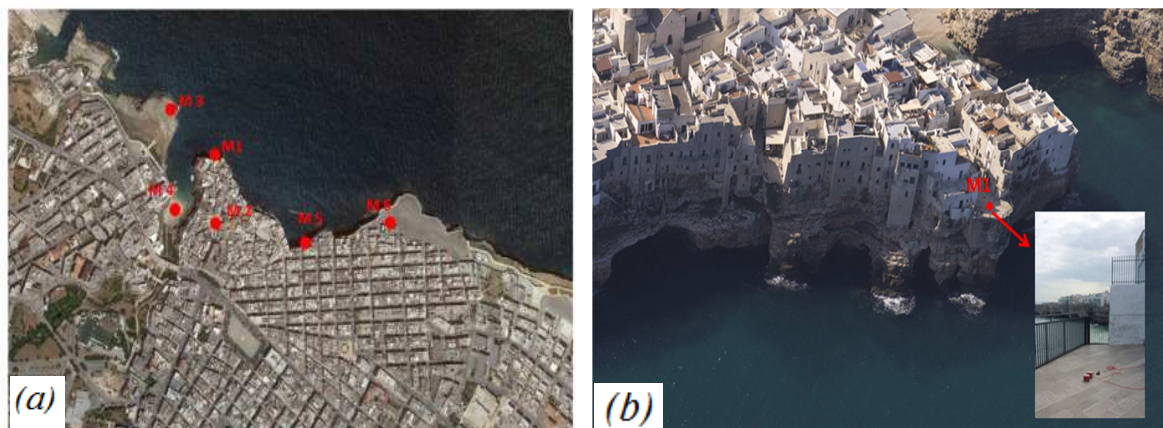


Figura 4: (a) Ubicazione punti di misurazione, (b) Punto di misurazione M1 Balconata.

In Figura 5a sono stati plottati gli spettri di Fourier, in spostamento, delle componenti orizzontali delle registrazioni eseguite sulla balconata (M1), mentre in Figura 5b, con riferimento alle stesse componenti, sono stati plottati gli spostamenti nel dominio del tempo. È evidente una forte direzionalità del moto con frequenza compatibile a quella del moto ondoso. In particolare, la frequenza media rilevata risulta pari a 0.1467Hz (6.82s).

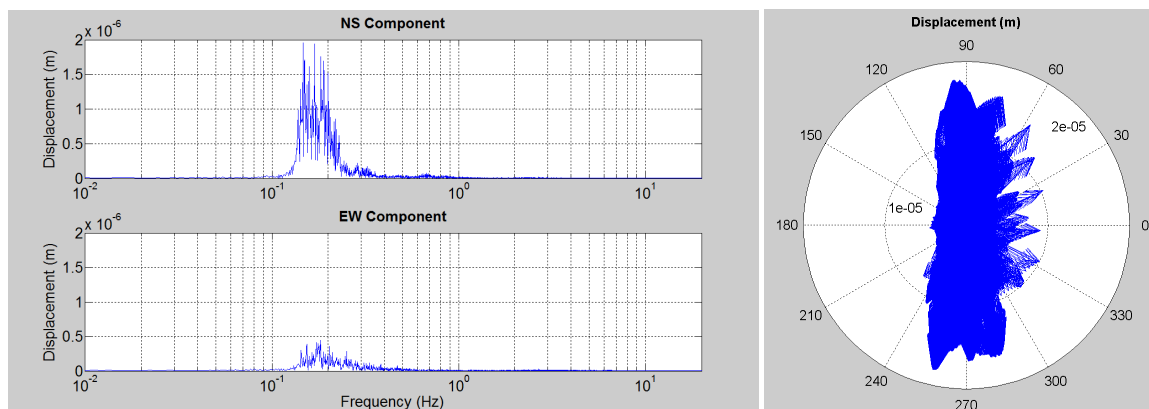


Figura 5: (a) Spettri di Fourier in Spostamento, (b) Diagramma degli spostamenti nel piano orizzontale.

4. Discussione

In questo lavoro preliminare è iniziato lo studio dell'interazione tra onde e falesia rocciosa nella zona urbana di Polignano (Puglia, Italia). In particolare, è stata analizzata la risposta dinamica della scogliera e il trasferimento di energia delle onde che si infrangono sulla stessa. È stata riscontrata una buona coerenza tra le caratteristiche dell'input e i parametri cinematici rappresentativi del moto della falesia. Ulteriori analisi sono necessarie per correlare i parametri di input a quelli di risposta e provare a ricavare delle relazioni che consentano di stabilire i livelli di sollecitazione a cui la falesia è assoggettata, lo stato deformativo generato dal moto ondoso e i livelli di fatica ciclica a cui il materiale è sottoposto.

Bibliografia

- Bieniawski ZT. (1979). "The geomechanics classification in rock engineering applications". In: Proc. of the 4th ISRM Cong., Montreux, Suisse. Balkema, Rotterdam, 51–58.
- Bieniawski ZT. (1989). "Engineering Rock Mass Classifications". Wiley, New York, 251.
- Budetta P, Galiotta G, Santo A (2000). "A methodology for the study of the relation between coastal cliff erosion and the mechanical strength of soils and rock masses". Eng Geol 56: 243–256.
- Cancelli A, Crosta G. (1993). "Rockfall hazard and risk mapping". In: Novosad, Wagner (eds) Proc. 7th Int. Conf. and field workshop on landslide in Czech and Slovak Republics. Balkema, Rotterdam.
- Pellicani R. et al. (2014). "Dynamic response of a rocky cliff under the sea wave pulse: a study along the Adriatic coast of Polignano (Apulia, Italy)" Environmental Earth Sciences.
- Sunamura T. (1992). Geomorphology of rocky coasts. John Wiley & Sons, Chichester, 302.