

Proposta di metodologia per la valutazione della propensione al dissesto delle falesie (CISA - Cliff Instability Susceptibility Assessment): il caso del centro storico di Polignano a Mare (Bari, Italia)

Vito Pellegrini¹, Gioacchino Francesco Andriani², Giuseppe Mastronuzzi²

¹Geologo Libero Professionista. Via Chiantera, 41 – 70044 Polignano a Mare (BA).
Email: geo.pellegrini@libero.it

²Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali, Università degli Studi di Bari Aldo Moro.
Via Orabona, 4 – 70125 Bari.
Email: giacchinofrancesco.andriani@uniba.it, giuseppeantonio.mastronuzzi@uniba.it

Riassunto

Il centro storico di Polignano a Mare sorge su di un piccolo promontorio limitato da una falesia di altezza compresa tra 13 e 22 m. Essa è modellata sul Calcare di Bari alla base e sulla Calcarenite di Gravina in sommità. La parete della falesia è verticale o localmente aggettante e prosegue al di sotto del livello marino per circa 2-5 m. Il tratto esaminato è caratterizzato dalla presenza di 5 grotte di dimensioni maggiori, con sviluppo in pianta mediamente di 30-120 m², oltre ad una serie di piccole cavità dalle forme diversificate, poste a varie quote sulla parete o ubicate al di sotto del livello marino. Per la valutazione qualitativa della propensione al dissesto del tratto costiero in questione è stato proposto un nuovo metodo multidirezionale (CISA, Cliff Instability Susceptibility Assessment), che ad analisi morfologiche e morfoevolutive affianca lo studio geomeccanico degli ammassi rocciosi e la determinazione dell'altezza critica della falesia attraverso il teorema del limite inferiore. Si tratta di una rivisitazione con implementazione di un classico approccio basato sul principio della "valutazione esperta". Sono stati, pertanto, individuati 8 settori costieri, suddivisi su base morfologica, e scelti 23 parametri di incidenza. Gli stessi parametri sono stati suddivisi per tipologia in: geomeccanici (12), morfologici (5), ondametrici (5) e antropici (1). Per ogni parametro sono state individuate 5 classi di valutazione della propensione al dissesto associate ad un coefficiente numerico; il punteggio finale, dato dalla somma dei coefficienti numerici per ciascun parametro considerato, consente di classificare i settori esaminati.

Parole Chiave: dinamica costiera, falesia, instabilità, Polignano a Mare, Puglia

Abstract

The downtown of Polignano a Mare lies on a small promontory characterized by a carbonate cliff ranging between 13 and 22 m height constituted by Calcare di Bari at the base and by Calcarenite di Gravina at the top. The cliff is vertical or locally overhanging and continues 2-5 m below sea level. The coastal stretch studied is characterised by five wide caves and a series of smaller cavities, different in shape and height along the cliff face, even below sea level. At place, the cliff is prone to instability phenomena due to a complex geostructural setting and sea wave action. In this study, we present a new multidirectional method for assessing cliff instability susceptibility at a given scale (CISA, Cliff Instability Susceptibility Assessment). The method is based on the "expert evaluation" approaches and is completed by morphological analysis, morphoevolutive models, geomechanical surveys and by the estimate of the critical heights for vertical cliffs using the lower bound theorem of limit analysis.

The coastal stretch was divided in 8 sectors based on morphological affinity and then 23 incidence parameters were considered and determined. These parameters were divided in four categories: geomechanical (12), morphological (5), sea-wave (5) and anthropogenic (1). For each parameter 5 classes of rating were proposed; the cliff classification, in terms of instability susceptibility, was obtain from the total rating which represents the summation of the single rating of the individual parameter.

Keywords: coastal dynamics, cliff, instability, Polignano a Mare, Puglia

Introduzione

Nel corso dei secoli, la estesa urbanizzazione della fascia costiera pugliese non ha risparmiato le coste rocciose che in passato hanno rappresentato il luogo ideale per la realizzazione di opere di controllo e di difesa dagli assalti e dai saccheggi corsari. I centri urbani costieri sono così passati da luoghi invidiabili per la conduzione di una vita sociale in sicurezza a siti che, se rispettati dall'antropizzazione speculativa, costituiscono un patrimonio storico-culturale da tutelare e promuovere. È evidente altresì che centri storici costieri di importante valenza sono esposti a dinamiche naturali parossistiche che minano la stabilità della linea di costa e la difesa del suo patrimonio. Ne conseguono situazioni di rischio, in stretta connessione con le caratteristiche intrinseche dei corpi rocciosi affioranti, con le dinamiche morfoevolutive del territorio, dettate dai caratteri morfostrutturali e meteomarini, e con l'attività antropica, spesso inconsapevole della propria capacità di alterare equilibri precari.

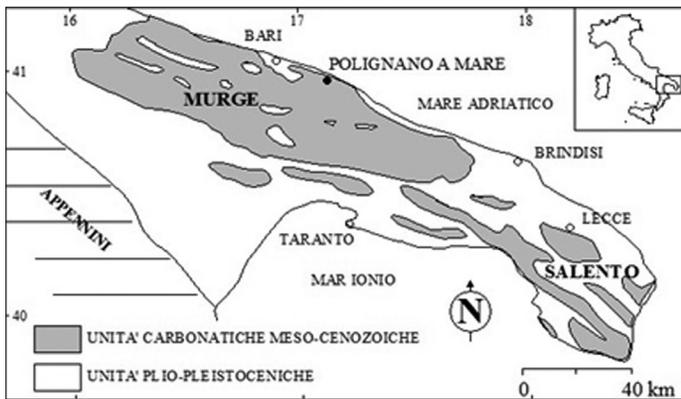


Figura 1 – Localizzazione dell'area di studio.

La falesia e il centro storico di Polignano a Mare (Fig. 1) sono senza dubbio fra i siti che meglio rappresentano la Puglia. Esse ricadono in un'area che per i suoi valori storici, architettonici, naturalistici e culturali impone particolari attenzioni nei confronti della loro salvaguardia. A tal proposito, solo attente valutazioni delle dinamiche potenziali e delle relazioni esistenti fra azioni e fattori che contribuiscono a definirne il grado di esposizione al rischio possono risultare efficaci e di utilizzo pratico.

La valutazione della suscettività al dissesto di un tratto costiero a falesia non è così semplice, come non lo è l'elaborazione di un metodo qualitativo o semi-quantitativo

utile allo scopo. Questo è dovuto alla complessità dei fenomeni di arretramento ed alla concomitanza dei fattori predisponenti e scatenanti in gioco. Al classico metodo proposto da Amadesi et al. (1977) e da Amadesi e Vianello (1978), di recente Lucchetti et al. (2013) hanno proposto un nuovo metodo (SCMR) per la classificazione geomeccanica delle falesie finalizzato alla pianificazione integrata delle aree costiere.

In questo studio viene proposto un metodo qualitativo multidirezionale per la valutazione della propensione al dissesto di falesie carbonatiche (CISA - Cliff Instability Susceptibility Assessment), attraverso un caso di studio relativo alla falesia del centro storico di Polignano a Mare.

La falesia di Polignano a Mare

Il centro storico di Polignano a Mare (Fig. 2) sorge in corrispondenza di un piccolo promontorio caratterizzato da una falesia con altezza compresa tra 13 e 22 m. Nella sua parte più bassa affiorano strati del Calcare di Bari di età mesozoica cui seguono verso l'alto, con contatto trasgressivo e discordanza angolare, le calcareniti biolitoclastiche della Calcarenite di Gravina di età plio-pleistocenica, in banchi e strati suborizzontali appena accennati. Da N a S il Calcare di Bari tende ad abbassarsi di quota, lasciando il posto ai depositi calcarenitici che di contro diventano più potenti. I calcari presentano spessori in affioramento variabili da 2 m, in corrispondenza di Largo Ardito, a 20 m circa, lungo il Bastione di S. Stefano, laddove i depositi calcarenitici mostrano spessori rispettivamente di 10-12 e di 2-3 m (Fig. 5).



Figura 2 – Tratto costiero tra Lama Monachile e Largo Ardito: settori S (sinistra) e N (destra).

La successione stratigrafica affiorante del Calcarea di Bari è costituita da calcari micritici, in strati di spessore decimetrico e metrico. Le inclinazioni degli strati variano mediamente da pochi gradi fino a circa 15° con immersione verso mare. L'assetto tettonico del Calcarea di Bari è condizionato, infatti, dalla presenza di un'ampia e blanda anticlinale con asse orientato NE-SO, lungo l'allineamento Lama Monachile - S. Angelo, variazioni locali della giacitura dei calcari cretacei sono imputabili alla presenza di pieghe e di faglie transpressive ad estensione limitata che ne hanno determinato un'intensa fratturazione (Festa, 2003). La Calcarenite di Gravina è rappresentata da depositi caotici grossolani, al contatto con i sottostanti calcari cretacei ed in corrispondenza di superfici di abrasione segnate da marcata bioerosione, e da depositi a grana medio-fine che sfumano verso l'alto a calcareniti a grana media con tessitura packstone (Andriani e Walsh, 2007a). Nel complesso si tratta di facies a cementazione molto variabile ed elevata porosità (Andriani e Walsh, 2002; 2010). Il contatto trasgressivo tra le due formazioni, a luoghi marcato da brecce intraformazionali e terre rosse residuali, è sempre ben evidente per il contrasto litologico legato ai differenti caratteri tessiturali e al diverso grado di cementazione (Tropeano e Sabato, 2000).

Dal punto di vista morfologico la costa è estremamente differenziata con forme risultanti dall'azione combinata degli agenti meteomarinari e del carsismo su morfostrutture di origine tettonica; si pensi, ad esempio, all'intero tratto in falesia che sembrerebbe impostato lungo un piano di faglia. Il modellamento costiero è strettamente condizionato dalla composizione carbonatica delle rocce che, attraverso il carsismo, ha determinato la formazione di condotti, grotte, marmitte e varie altre forme e microforme distruttive o costruttive (Fig. 3). Non sono trascurabili inoltre le profonde modifiche paesaggistiche dovute all'uomo e frutto della volontà secolare di assoggettare il litorale all'uso e al bisogno della popolazione residente.

Nel complesso la parete della falesia è verticale o localmente aggettante e prosegue al di sotto del livello marino per 2-5 m, coronata dalla presenza di una spiaggia sommersa; al suo piede non è difficile ritrovare depositi da crollo, rappresentati da blocchi calcarenitici e subordinatamente calcarei, di dimensioni medie di qualche dm^3 fino ad un massimo poco inferiore a 10 m^3 . Lungo il litorale da Lama Monachile a Largo Ardito sono presenti 5 grotte di dimensioni maggiori (PU 1063 Grotta Piana; PU 1064 Grotta sotto il bastione di S.Stefano; PU 67 Grotta dell'Arcivescovado; PU 66 Grotta Palazzese; PU 63 Grotta Ardito del Catasto Grotte della Regione Puglia: www.catasto.fspuglia.it) e una serie di piccole cavità poste a varie quote sulla parete o ubicate al di sotto del livello marino. Si tratta di grotte d'interstrato nella formazione mesozoica (Grotta Piana, Grotta sotto il bastione di S.Stefano) e di grotte impostatesi al contatto calcarea-calcareniti (Grotta dell'Arcivescovado, Grotta Palazzese e Grotta Ardito); nelle cavità al livello del mare è evidente l'azione demolitrice esercitata dal moto ondoso. Le piccole cavità hanno in prevalenza uno sviluppo orizzontale, a testimonianza di un modellamento indotto dal carsismo e dal deflusso delle acque sotterranee.

Al piede della parete e per tutto il tratto litoraneo esaminato, a luoghi è possibile osservare piccole superfici di taglio d'onda (wave cut platform sensu Sunamura, 1992), poste tra il livello di bassa e quello di alta marea, limitate a pochi metri sia in larghezza sia in lunghezza. Ne sono esempi i tratti a ridosso di Grotta Palazzese e, in particolare, quello tra la stessa grotta ed il Bastione di S. Stefano.

Solchi di abrasione si ritrovano in vicinanza della linea di riva, lungo i tratti in cui la spiaggia sommersa è

prossima al livello del mare e dove c'è disponibilità di materiale ciottoloso-sabbioso, ossia nelle pocket beach (e.g. Lama Monachile).

Descrizione del metodo CISA e risultati ottenuti

La metodologia CISA (Cliff Instability Susceptibility Assessment) prevede, in primo luogo, la suddivisione del tratto esaminato in settori costieri elementari (Fig. 3), sulla base delle loro caratteristiche morfologiche principali (promontori, insenature etc.). Congiuntamente, è stata scelta una serie di parametri ritenuti fondamentali ai fini della valutazione della propensione al dissesto di una falesia. Ai parametri proposti nel metodo di Amadesi et al. (1977) e Amadesi e Vianello (1978), con un approccio basato sul principio della “valutazione esperta”, ne sono stati aggiunti altri, per un totale di 23 parametri (Tab. 1), suddivisi per tipologia in geomeccanici (12), morfologici (5), ondometrici (5) e infine antropici (1). Per ciascun parametro considerato, sono state individuate 5 classi di valutazione, contraddistinte da un coefficiente numerico variabile da 1 a 5; ai valori più bassi competono le condizioni più critiche. I settori costieri individuati sono stati, quindi, classificati in base al rating complessivo ottenuto dalla somma dei pesi di ogni singolo parametro. L'elaborazione dei dati è stata effettuata in ambiente GIS per mezzo del software Quantum GIS 1.6.0 Copiapò. La base topografica è costituita dalle “Carte Tecniche Regionali” in scala 1:5.000 (www.sit.puglia.it) georeferenziate secondo il sistema “WGS84-UTM zone 33N.

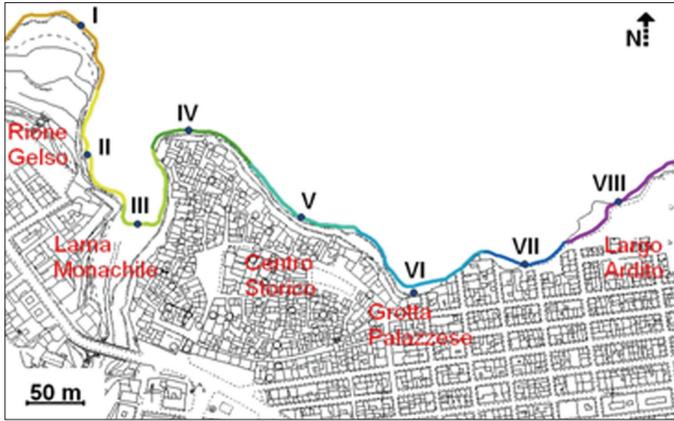


Figura 3 – Suddivisione del litorale del centro storico di Polignano a Mare in settori costieri elementari.

La descrizione quantitativa delle discontinuità degli ammassi rocciosi è stata eseguita in riferimento agli standard ISRM (1978). La criticità dei giunti è stata valutata in rapporto all'angolo tra inclinazione degli stessi e quella del versante, sulla base del potenziale cinematico del movimento di versante. Relativamente al parallelismo dei giunti, la condizione più critica ipotizzata nel metodo è quella determinata dalla presenza di fratture da rilasci tensionali, ossia di soluzioni di continuità tendenzialmente parallele alla direzione della ripa costiera. La valutazione dell'indice RQD (Rock Quality Designation) (Deere, 1964) è stata effettuata seguendo il metodo di Palmström (2005) e confrontando i valori ottenuti con quelli determinati direttamente da Andriani e Walsh (2007a). Sia per i calcari sia per le calcareniti, i parametri di resistenza utilizzati sono stati ricavati da dati di test di laboratorio eseguiti da Andriani e Walsh (2007a) su provini cilindrici, secondo gli standard ISRM (1978, 1979) (Tab. 2). Ulteriori test in situ con il Martello di Schmidt hanno consentito valutazioni dell'indice di resistenza sclerometrica (I_r) degli ammassi rocciosi mesozoici. È stato invece impossibile eseguire misurazioni con il Martello di Schmidt sulle Calcareniti di Gravina a causa della bassa resistenza l.s. degli ammassi affioranti. Pertanto, per le calcareniti è stato assegnato un valore uniforme dell'indice di resistenza pari a zero. L' I_r complessivo per ciascun settore è stato, pertanto, ricavato dalla media pesata in rapporto agli spessori delle due unità litotecniche valutati sulla parete rocciosa. Per ciascun settore è stata calcolata l'altezza critica della falesia assumendo come criterio di rottura quello di Mohr-Coulomb e adottando il teorema statico, applicabile ad uno schema di pendio di altezza limitata. I valori di coesione non drenata in situ sono stati ricavati correggendo i valori determinati in laboratorio con la relazione di Manev e Avramova-Tacheva (1970). Un approccio cautelativo ha suggerito di assegnare alla coesione non drenata il valore minimo per ciascuna unità litotecnica. Anche per la determinazione dell'altezza critica, definita come altezza massima oltre la quale la falesia, intesa a tutti gli effetti come un versante, non è più in grado di auto sostenersi, per ciascun settore è stata effettuata la media ponderata dei pesi di volume e della coesione non drenata, in rapporto agli spessori delle due unità litotecniche affioranti sulla falesia. Per la porzione di falesia sommersa è stato considerato il valore medio del peso di volume immerso. Successivamente è stato determinato l'Indice di Stabilità (I_s) (Mastronuzzi et al., 1992) dato dal

Tabella 1 – Classi di valutazione e parametri considerati nel metodo CISA per l'analisi qualitativa di stabilità di una falesia costiera carbonatica.

Parametri	Molto sfavorevole	Sfavorevole	Mediamente favorevole	Favorevole	Molto favorevole
	1	2	3	4	5
Goemeccanici	GIUNTI				
Spaziatura	< 0.06 m	0.06 - 0.2 m	0.2 - 0.6 m	0.6 - 2.0 m	> 2.0 m
Apertura	> 1 m	0.01 - 1 m	0.002 - 0.01 m	0.0005-0.002 m	< 0.0005 m o chiusa
Rugosità	Levigata	Liscia	Leggermente rugosa	Rugosa	Molto rugosa
Alterazioni	Estremamente alterate	Molto alterate	Mediamente alterate	Leggermente alterate	Non alterate
Riempimenti	Soffice/radici	Soffice	Compatto	Duro	Assente
Condizioni idrauliche	Forti venute	Deboli venute	Bagnata	Umida	Asciutta
Parallelismo giunti-versante	0° - 20°	20° - 40°	40° - 60°	60° - 80°	80° - 90°
Inclinazione giunti-versante	Molto sfavorevole	Sfavorevole	Mediocre	Favorevole	Molto favorevole
Geologia Tecnica AMMASSI ROCCIOSI					
RQD	< 10	10 - 40	40 - 70	70 - 90	> 90
Indice rimbalzo	0 - 10	10 - 45	45 - 65	65 - 80	> 80
Altezza critica	< di almeno 5 m rispetto all'h della falesia	tra 0 e 5 m < rispetto all'h della falesia	Uguale all'h falesia	tra 0 e 5 m > rispetto all'h della falesia	> di almeno 5 m rispetto all'h della falesia
Dissesti	Diffusamente presenti	Presenti al livello del mare	Presenti non al livello del mare	Scarsamente presenti	Assenti
Morfologici	PECULIARITA' della falesia				
Altezza della falesia	> 20 m	20 - 15 m	15 - 10 m	10 - 5 m	< = 5 m
Profilo costiero	Aggettante	Localmente aggettante	Verticale	Digradante Convesso	Digradante Piano
Grotte e cavità	Diffusamente presenti	Presenti al livello del mare	Presenti non al livello del mare	Scarsamente presenti	Assenti
Frangiflutti naturali	Assenti	Molto limitati	Limitati	Diffusi	Molto diffusi
Ampiezza traversia	> 160 °	160° - 120 °	120° - 80 °	80° - 40 °	< 20 °
Ondametrici	PECULIARITA' del MOTO ONDOSO				
Fetch efficace	> 250 km	250 - 200 km	200 - 150 km	150 - 100 km	< 100 km
Profondità di rottura	< 6.0 m	6.0 - 6.5 m	6.5 - 7.0 m	7.0 - 7.5 m	> 7.5 m
Altezza di rottura	> 6.5 m	6.5 - 6.0 m	6.0 - 5.5 m	5.5 - 5.0 m	< 5.0 m
Altezza di frangenza	> 3.0 m	3.0 - 2.25 m	2.25 - 1.5 m	1.5 - 0.75 m	< 0.75 m
Tipologia frangenza	Plunging	Collapsing	Surging	Spilling	Assente
Antropici	Tecniche di rinforzo dei terreni				
Interventi di consolidamento	Assenti	Localizzati	Mediamente diffusi	Molto diffusi	Versante consolidato

rapporto tra l'altezza effettiva e quella critica della falesia (Tab. 3). Laddove per inaccessibilità dei luoghi non è stato possibile ottenere dati diretti, sono state effettuate misurazioni dell'assetto strutturale e valutazioni del cinematismo possibile con traguardi da imbarcazioni a mare; altre informazioni sono state derivate dal confronto di immagini storiche e recenti.

Tabella 2 – Principali parametri fisico-meccanici della Calcarenite di Gravina e del Calcare di Bari affioranti lungo il litorale di Polignano a Mare (da Andriani e Walsh, 2007a, modif.).

Parametri fisico-meccanici	Calcarenite di Gravina			Calcare di Bari		
	min	max	medio	min	max	medio
Gravità Specifica, G_s			2.70			2.70
Peso volume secco, ρ_d (kN/m ³)	13.34	15.10	14.05	21.09	25.30	23.41
Peso volume saturo, ρ_{sat} (kN/m ³)	18.20	19.32	18.66	21.11	25.32	23.42
Porosità, n (%)	42.96	49.63	46.93	4.44	20.37	11.59
Contenuto di acqua a saturazione, w_a (%)	27.90	36.49	32.84	1.64	9.90	4.87
Grado di saturazione massimo, S_r (%)			100	0.32	3.22	1.28
Tensione di rottura monoassiale (secco), σ_n (MPa)	1.72	3.45	2.49	18.15	24.03	21.33

Tabella 3 – Altezza critica (teorema statico) e Indice di Stabilità della falesia costiera del centro storico di Polignano a Mare.

Settori costieri	Altezza falesia sommersa (m)	Altezza falesia emersa (m)	Altezza critica (m)	Indice di Stabilità
1	3.5	6.0	20.7	0.45
2	3.0	16.0	17.5	1.09
3	0.0	20.0	15,9	1.26
4	4.5	22.0	18,0	1.48
5	5.5	20.0	17.7	1.44
6	5.0	18.0	15.5	1.49
7	3.5	18.0	14.7	1.47
8	3.5	16.0	13.0	1.50

Tabella 4 – Ampiezze delle traversie, lunghezze dei Fetch geografici e dei Fetch efficaci per gli otto settori costieri individuati.

Settori e traversie	Long. E	Lat. N	Traversia °N	F.geogr. max km; °N	F. eff. km
I Maestrale	2706538.627	4540926.684	315-000	620/325	277
I Tramontana	2706538.627	4540926.684	315-045	620/325	124
I Grecale	2706538.627	4540926.684	000-090	215/020	193
II Tramontana	2706543.886	4540811.484	015-045	195/015	191
II Grecale	2706543.886	4540811.484	015-075	210/020	192
III Tramontana	2706587.530	4540749.658	350-010	215/000	196
IV Maestrale	2706631.779	4540833.307	320-000	615/325	296
IV Tramontana	2706631.779	4540833.307	320-045	615/325	238
IV Grecale	2706631.779	4540833.307	000-075	215/020	194
V Maestrale	2706730.582	4540756.326	320-000	615/325	320
V Tramontana	2706730.582	4540756.326	320-045	615/325	244
V Grecale	2706730.582	4540756.326	000-080	215/020	194
VI Maestrale	2706827.567	4540689.042	325-000	615/325	320
VI Tramontana	2706827.567	4540689.042	325-045	615/325	243
VI Grecale	2706827.567	4540689.042	000-055	210/000	192
VII Maestrale	2706923.946	4540713.895	315-000	615/325	276
VII Tramontana	2706923.946	4540713.895	315-045	615/325	233
VII Grecale	2706923.946	4540713.895	000-050	210/000	193
VIII Maestrale	2707005.170	4540769.661	315-000	615/325	293
VIII Tramontana	2707005.170	4540769.661	315-045	615/325	233
VIII Grecale	2707005.170	4540769.661	000-050	210/000	193

L'analisi dei fattori legati all'ampiezza della traversia e alla lunghezza del Fetch efficace dei punti in corrispondenza di promontori o di insenature (Tab. 4) è stata completata in ambiente GIS. La fascia costiera è stata suddivisa individuando di ogni punto le traversie di Maestrale, di Tramontana e di Grecale, venti a cui è esposto il litorale. Per questi venti la traversia si sviluppa al massimo per 90°, ovvero considerando un settore di traversia di ampiezza di 45° rispetto alla loro direzione di provenienza (315°N per il Maestrale, 0°N per la Tramontana e 45°N per il Grecale). Il Fetch efficace è stato ottenuto applicando l'algoritmo proposto dal Coastal Engineering Research Center degli Stati Uniti (1975), il cui impiego è riservato a bacini poco estesi come è stato considerato il Mar Adriatico. Dall'elaborazione in ambiente GIS dei dati delle Carte Nautiche dell'Istituto Idrografico della Marina e dei dati dei rilievi batimetrici con interferometro e Side Scan Sonar eseguiti per l'area di Polignano a Mare nel 2006 dalla Sub Technical Edil Service s.n.c. (comm. pers.), è stato possibile estrapolare i valori di profondità e di pendenza dei fondali, per ognuno dei punti considerati e per le direzioni dei venti su citati.

Dati batimetrici e ondometrici massimi, rilevati nel periodo da Luglio 1989 ad Aprile 2008 dalla boa della Rete Ondometrica Nazionale, ubicata al largo di Monopoli (Bari) alle coordinate WGS84 Long. 17°22'36" e Lat. 40°58'30", sono stati utilizzati per l'analisi del moto ondoso e della sua frangenza attraverso le relazioni empiriche sviluppate da Goda (1970), Sunamura e Horikawa (1974), e Sunamura (1984; 1992) (Tabb. 5-6).

Tabella 5 – Parametri ondometrici massimi registrati dalla boa al largo di Monopoli (BA).

Direzione del moto ondoso	Hs media m	Tp medio s
Maestrale	04.50	09.10
Tramontana	04.80	09.50
Grecale	05.20	10.00

Tabella 6 – Parametri determinati per ciascun settore costiero per i 3 venti principali: h, profondità del piede della falesia; $\tan \square$, pendenza del fondale; Ho, altezza dell'onda al largo; Lo, lunghezza d'onda al largo; hb, profondità di rottura (Goda, 1970); Hb, altezza di rottura (Goda, 1970); H, altezza d'onda frangente. Per i settori costieri: m = Maestrale; t = Tramontana; g = Grecale.

Settori e traversie	h (m)	$\tan \square$	Ho (m)	Ho/Lo	hb/Ho	hb (m)	h/hb	Hb (m)	H/Hb	H (m)
I Maestrale	2.500	0.080	4.500	0.035	1.230	5.530	0.452	5.670	0.460	2.600
I Tramontana	2.500	0.083	4.800	0.034	1.230	5.900	0.423	6.050	0.440	2.660
I Grecale	2.500	0.117	5.200	0.033	1.230	6.390	0.391	6.550	0.490	3.210
II Tramontana	2.500	0.026	4.800	0.034	1.520	7.290	0.343	5.230	0.230	1.200
II Grecale	2.500	0.029	5.200	0.033	1.490	7.750	0.323	5.980	0.240	1.430
III Tramontana	0.000	0.024	4.800	0.034	1.520	7.290	0.000	5.230	0.050	0.260
IV Maestrale	3.000	0.035	4.500	0.035	1.490	6.700	0.447	5.170	0.320	1.650
IV Tramontana	3.000	0.061	4.800	0.034	1.440	6.910	0.434	5.760	0.360	2.070
IV Grecale	3.000	0.043	5.200	0.033	1.440	7.490	0.401	6.240	0.310	1.930
V Maestrale	3.500	0.052	4.500	0.035	1.440	6.490	0.540	5.400	0.440	2.370
V Tramontana	3.500	0.061	4.800	0.034	1.440	6.910	0.506	5.760	0.450	2.590
V Grecale	3.500	0.078	5.200	0.033	1.230	6.390	0.548	6.550	0.530	3.470
VI Maestrale	3.500	0.087	4.500	0.035	1.230	5.530	0.632	5.670	0.620	3.510
VI Tramontana	3.500	0.084	4.800	0.034	1.230	5.900	0.593	6.040	0.580	3.500
VI Grecale	3.500	0.078	5.200	0.033	1.230	6.390	0.547	6.550	0.530	3.470
VII Maestrale	3.500	0.078	4.500	0.035	1.230	5.530	0.632	5.670	0.600	3.400
VII Tramontana	3.500	0.069	4.800	0.034	1.440	6.910	0.506	5.760	0.470	2.700
VII Grecale	3.500	0.105	5.200	0.033	1.230	6.390	0.547	6.550	0.600	3.930
VIII Maestrale	2.500	0.158	4.500	0.035	1.230	5.530	0.452	5.670	0.550	3.120
VIII Tramontana	2.500	0.167	4.800	0.034	1.230	5.900	0.423	6.040	0.550	3.320
VIII Grecale	2.500	0.069	5.200	0.033	1.440	7.490	0.391	6.240	0.350	2.290

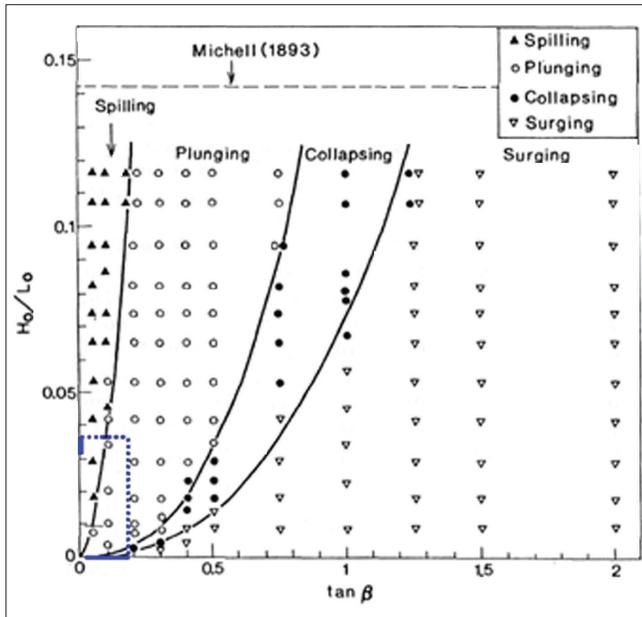


Figura 4 – Tipologia di frangenza del moto ondoso desunta dal diagramma di Okazaki e Sunamura (1991). Il punteggiato in blue evidenzia gli intervalli di interesse per il litorale oggetto di studio.

Sono state prese in considerazione le registrazioni dell'altezza spettrale del moto ondoso al largo (H_s) e del periodo di picco del moto ondoso al largo (T_p); da quest'ultimo è stata calcolata la lunghezza dell'onda al largo (L_o) applicando la teoria lineare di Airy (1845). I valori dei parametri ondometrici considerati per le mareggiate provenienti da NO, N e NE sono quelli massimi registrati con provenienza appunto dalle traversie di Maestrale ($315^\circ\text{N} - 0^\circ\text{N}$), di Tramontana ($315^\circ\text{N} - 45^\circ\text{N}$) e infine di Grecale ($0^\circ\text{N} - 45^\circ\text{N}$). È stato quindi ottenuto il valore della profondità di rottura dei treni d'onda incidenti (h_b) e baltezza di rottura delle onde (H_b) applicando le relazioni empiriche proposte da Goda (1970).

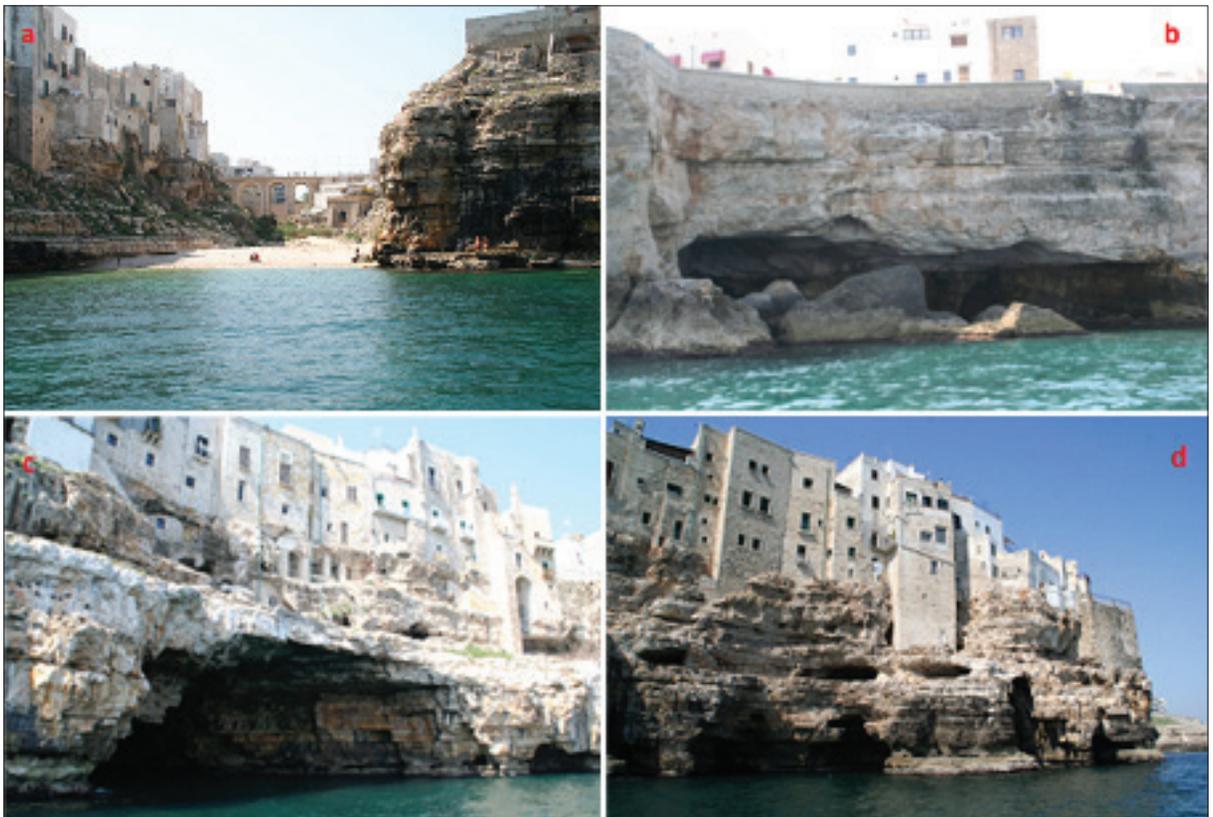


Figura 5 – (a) *Lama Monachile* in prossimità dello sbocco, caratteristico per la presenza di una pocket beach sabbioso-ciottolosa, sulla sinistra della foto il centro storico di Polignano a Mare e sulla destra il rione Gelso; (b) *Grotta Ardito*, sulla volta si osserva il passaggio tra il Calcarea di Bari e la Calcarenite di Gravina, in primo piano i blocchi calcarenitici distaccatisi il 7 Gennaio 1777; (c) *Grotta dell'Arcivescovado* con pareti costituite da strati calcarei e la volta quasi interamente da banchi calcarenitici, al contatto delle due Formazioni si osservano piccoli cunicoli di forma circolare la cui genesi è imputabile al deflusso idrico sotterraneo; (d) *Bastione di S. Stefano* con cavità intrastratali a sviluppo orizzontale di origine carsica e cavità verticali da frattura; a luoghi si osserva la presenza di limitate superfici di abrasione.

L'altezza H dell'onda alla frangenza è stata, in seguito, determinata dalle curve di decadimento dell'altezza d'onda sviluppate da Sunamura (1984). Infine, i dati ottenuti sono stati riportati sul diagramma di Okazaki e Sunamura (1991) per definire la tipologia di frangenza del moto ondoso sul tratto costiero (Fig. 4).

Tabella 7 – Rating parziale e complessivo ottenuti dall'applicazione del metodo CISA (Cliff Instability Susceptibility Assessment) per i settori costieri considerati.

Settori Costieri								
Parametri geomeccanici	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Spaziatura	1	1	1	1	1	2	1	1
Apertura	3	3	3	3	3	4	4	4
Rugosità	4	4	3	3	3	3	3	3
Alterazioni	4	3	3	3	3	3	2	2
Riempimenti	2	3	2	2	1	3	2	2
Condizioni idrauliche	3	3	3	3	3	3	3	3
Parallelismo giunti-versante	2	3	3	2	1	1	1	1
Inclinazione giunti-versante	3	3	3	2	2	3	2	2
RQD	4	3	2	2	2	2	2	2
Indice rimbalzo	5	4	4	4	4	3	3	3
Altezza critica	5	3	1	1	1	1	1	1
Dissesti	5	4	3	2	1	1	2	1
TOTALE PARZIALE	41	37	31	28	25	29	26	25
Parametri geomorfologici	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Altezza della falesia	4	2	2	2	2	3	3	3
Profilo costiero	5	3	3	1	2	2	2	2
Grotte e cavità	5	2	3	1	1	1	1	1
Frangiflutti naturali	1	1	1	1	3	3	3	3
Ampiezza traversia	2	4	4	2	2	3	3	3
TOTALE PARZIALE	17	12	13	7	10	12	12	12
Parametri ondametrici	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Fetch efficace	2	3	3	1	1	1	2	2
Profondità di rottura	1	4	4	4	3	2	3	2
Altezza di rottura	3	3	3	3	2	2	2	3
Altezza di frangenza	2	4	5	3	2	1	1	2
Tipologia frangenza	1	4	3	1	1	2	1	1
TOTALE PARZIALE	9	18	18	12	9	8	9	10
Parametri antropici	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Interventi di consolidamento	1	5	3	1	1	3	1	1
TOTALE PARZIALE	1	5	3	1	1	3	1	1
CISA RATING	68	72	65	48	45	52	48	48

Tabella 8 – Classi di valutazione della propensione al dissesto per una falesia costiera carbonatica (CISA - Cliff Instability Susceptibility Assessment).

Indice CISA	< 30	30-60	60-80	80-100	100 - 115
Classi di stabilità	I	II	III	IV	V
Descrizione	Molto scadente	Scadente	Mediocre	Buona	Molto Buona

Discussione

L'analisi percentuale dei risultati dell'indagine effettuata consente di valutare distintamente l'incidenza di ciascun parametro considerato per i settori costieri individuati.

Per quanto concerne i fattori geomeccanici, l'intero tratto costiero studiato può essere suddiviso in due macrosettori: il primo, classificato come mediamente favorevole, comprende il versante sinistro di Lama Monachile e la lama stessa; il secondo, classificato come sfavorevole, si estende dal Bastione di S. Stefano a Largo Ardito. In questo macrosettore, l'unica eccezione è rappresentata dal tratto costiero in corrispondenza della Grotta Palazzese (Settore VI), classificato come mediamente favorevole, a causa delle migliori condizioni dello stato di alterazione delle fratture e del suo riempimento, nonché di una giacitura favorevole delle discontinuità rispetto all'orientazione del versante. Nel complesso, i parametri geomeccanici che in percentuale risultano maggiormente destabilizzanti per la falesia sono quelli che determinano il volume minimo e massimo dei blocchi potenzialmente instabili, in rapporto all'orientazione della linea di costa ed ai potenziali cinematismi del dissesto. A questi seguono: ì - la spaziatura delle discontinuità, decisamente ridotta e mediamente inferiore a 0.5 m; ï - l'apertura ed i riempimenti delle fratture, costituiti da terre rosse residuali e/o da terre vegetali o, nei casi peggiori, da radici di arbusti. L'incidenza legata ai parametri litotecnici si rispecchia nella distribuzione dei valori dell'altezza critica che risulta decisamente più elevata laddove la falesia è costituita prevalentemente dai calcari cretacei.

Relativamente ai fattori morfologici, la loro incidenza sulle condizioni di instabilità aumenta procedendo da N a S. In dettaglio, per il tratto costiero I, l'incidenza dei fattori morfologici è classificata come favorevole alla stabilità, mentre per i tratti II e III come mediamente favorevole e per i tratti da IV a VIII come sfavorevole. Tali conclusioni rispecchiano la suddivisione morfologica del litorale: ì - costa dal profilo convesso digradante, priva di grotte o di cavità e con movimenti di massa praticamente assenti (Settore I); ï - versanti di lama privi di grotte rilevanti ma con diffuse piccole cavità carsiche; ïï - profilo verticale o subverticale (comunque non aggettante), con una ampiezza di traversia di soli 20° (Settori II e III); ïv - falesia con grotte di dimensioni maggiori, numerose grotte minori e cavità carsiche, con diffusa presenza di pareti aggettanti e condizioni sfavorevoli relativamente ai fattori connessi con l'esposizione (ampiezza di traversia e fetch efficace) (Settori da IV a VIII).

L'incidenza dei parametri ondometrici risulta sostanzialmente suddivisibile in tre differenti classi: ì - favorevole per i settori costieri II e III; ï - mediamente favorevole per il settore IV; ïï - sfavorevole per i settori I e per quelli da IV a VIII. Nel primo caso, per i settori II e III, pendenza e profondità basse del fondale antistante la pocket beach ed esposizione al solo moto ondoso da Tramontana con traversia di 20°, fanno in modo che per questi settori i parametri ondometrici abbiano una scarsa influenza sulla stabilità della linea di costa; per i restanti settori, pur essendo la tipologia di frangenza delle onde sostanzialmente identica, la pendenza e la profondità combinate in modo differente, rendono più o meno efficaci l'impatto delle onde (Tabb. 7-8). Per quanto concerne i fattori antropici bisogna solo menzionare la presenza di interventi di consolidamento che interessano il settore II e parzialmente il settore III, così come interventi localizzati di miglioramento e di rinforzo dei terreni, opere datate che hanno perso ormai gran parte della loro efficacia (Settore VI).

L'analisi globale dei parametri considerati porta ad una suddivisione della costa in due macrosettori a differente propensione al dissesto, in stretta relazione con i caratteri stratigrafici e litotecnici della falesia. In sostanza, il macrosettore settentrionale caratterizzato da una falesia intagliata interamente o quasi nei calcari mesozoici è quello che mostra meno propensione al dissesto. Quello meridionale invece, costituito prevalentemente dai depositi calcarenitici, suscettibili al deterioramento per fenomeni chimico-meccanici (Andriani & Walsh, 2007b; Ciantia et alii, 2013a,b), presenta caratteri che individuano una maggiore propensione al dissesto.

Conclusioni

È evidente che ciascuna operazione di protezione e di rivalutazione dei valori esistenti, per qualsivoglia categoria culturale, non possa non derivare dalla conoscenza approfondita delle relazioni fra azioni e fattori del paesaggio, della sua dinamica e dell'attività antropica.

L'insieme dei dati raccolti e le relazioni fra essi, così come presentato nelle pagine precedenti, ha permesso di raggiungere due risultati che appaiono necessari alla base di ogni processo decisionale.

Il primo, metodologico, riguarda la messa a punto di un metodo di valutazione della propensione al dissesto delle falesie che prende in considerazione i caratteri geologico-tecnici del corpo roccioso, quelli antropici, nonché quelli geomorfologici e meteomarinari del paraggio.

Il secondo, applicativo, consiste nell'aver individuato le aree che, per le relazioni esistenti fra azioni e fattori condizionanti, appaiono essere quelle più esposte a rischio di evoluzione parossistica.

Il passo successivo che deriva da queste pagine, ossia la quantificazione dei rapporti esistenti fra azioni, fattori e parametri individuati, rappresenta l'obiettivo cui la conoscenza deve mirare.

Ringraziamenti

Si ringrazia la Sub Technical Edil Service s.n.c. per i dati forniti e inerenti ai rilievi batimetrici con interferometria e Side Scan Sonar eseguiti per l'area di Polignano a Mare nel 2006.

Un particolare ringraziamento a Domenico Aringoli e Francesco Faccini i cui suggerimenti hanno permesso di migliorare significativamente il manoscritto originale.

Il lavoro proposto è stato realizzato grazie a finanziamenti di Ateneo 2010 del progetto "Modelli geologico-tecnici, idrogeologici e geofisici per la tutela e la valorizzazione delle risorse naturali, ambientali e culturali" (Resp.: G.F. Andriani, Università degli Studi di Bari Aldo Moro) ed a quelli del progetto COFIN MIUR 2010-2011 "Response of morphoclimatic system dynamics to global changes and related geomorphological hazard" (National Coordinator: Carlo Baroni, Università degli Studi di Pisa; Resp. ULR UNIBALE: Prof. G. Mastronuzzi).

Questo lavoro è un contributo italiano all'IGCP 588 - International Geological Correlation Programme "Preparing for coastal change. A detailed response process framework for coastal change at different times" di UNESCO - IUGS (project Leaders: Dr. A.D. Switzer, Earth Observatory of Singapore (EOS), Nanyang Technological University, Dr. C. Sloss, School of Natural Resources Sciences, Queensland Univ. of Technology, Australia, Dr. B. Horton, Dep. of Earth and Environmental Sciences, Univ. of Pennsylvania, Dr. Y. Zong, Dep. of Earth Sciences, Univ. of Hong Kong, China).

Bibliografia

- Amadesi E., Vianello G., Bonfatti G., Pignone R., e Preti D. (1977) - *Guida alla realizzazione di una carta della stabilità dei versanti*. Pitagora Editrice, Bologna. pp. 72.
- Amadesi E. e Vianello G. (1978) - *Nuova guida alla realizzazione di una carta di stabilità dei versanti*. Mem. Soc. Geol. Ital., 19: 53-60.
- Andriani G.F. e Walsh N. (2002) - *Physical properties and textural parameters of calcarenitic rocks: qualitative and quantitative evaluations*. Eng. Geol., 67: 5-15.
- Andriani G.F. e Walsh N. (2007a.) - *Rocky coast geomorphology and erosional process: A case study along the Murgia coastline South of Bari, Apulia – SE Italy*. Geomorphology, 87: 224-238.
- Andriani G.F. e Walsh N. (2007b) - *The effects of wetting and drying, and marine salt crystallization on calcarenite rocks used as building material in historic monuments*. Geological Society, London, Special Publications, 271: 179-188.
- Andriani G.F. e Walsh N. (2010) - *Petrophysical and mechanical properties of soft and porous building rocks used in Apulian monuments (south Italy)*. Geological society, London, Special Publications, 333: 129-141.
- Ciantia M.O. e Hueckel T. (2013a) - *Weathering of submerged stressed calcarenites: chemo-mechanical coupling mechanisms*. Geotechnique, 63: 1-18.
- Ciantia M.O., Castellanza R., Di Prisco C. e Hueckel T. (2013b) - *Experimental Methodology for Chemo-mechanical Weathering of Calcarenites*. Multiphysical Testing of Soils and Shales, Springer Ed., 331-336.
- Coastal Engineering Research Center (U.S.) (1975) - *Shore protection manual*. U.S. Army Coastal Engineering Research Center Ed., Washington. pp. 528.
- Deere D.U. (1964) - *Technical description of rock cores for engineering purpose*. Rock Mech. Eng. Geol., 1: 16-22.

- Festa V. (2003) - *Cretaceous structural features of the Murge area (Apulian Foreland, Southern Italy)*. *Eclogae Geol. Helv.*, 96: 11-22.
- Goda Y. (1970) - *A synthesis of breaker indices*. *Trans. Jap. Soc. Civil Eng.*, 2 (2), 227-230.
- ISRM (1978) - *Suggested Methods for the Quantitative Description of Discontinuities in Rock Masses*. *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 15: 319–368.
- ISRM (1979) - *Suggested methods for determining water content, porosity, density, absorption and related properties and swelling and slake-durability index properties*. *Int. J. of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 16 (2): 141–156.
- Lucchetti A., Brandolini P., Robbiano A., Firpo M. e Faccini F. (2013) - *The Sea Cliff Mass Rating geomechanical classification for the rocky coastal management plan*. 12th European Geoparks Conference National Park of Cilento, Vallo di Diano and Alburni Geopark- Italy, 4th-6th September 2013, 158-161.
- Manev G. e Avramova-Tacheva E. (1970) - *On the valuation of strength and resistance condition of the Rock in Natural Rock Massif*. *Proceedings of the Second Congress of the International Society for Rock Mechanics*. Beograd, 21-26 September 1970, 59-64.
- Mastronuzzi G., Palmentola G. e Sansò P. (1992) - *Some theoretic aspect of rocky coast dynamics*. *Boll. di Oceanologia Teorica ed Applicata*, 10: 109-115.
- Okazaki S. e Sunamura T. (1991) - *Re-examination of breaker type classification on uniformly inclined laboratory beaches*. *Jour. Coastal Res.*, 7: 559-564.
- Palmstrom A. (2005) - *Measurements of and correlations between block size and rock quality designation (RQD)*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 4: 362–377.
- Sunamura T., Horikawa K. (1974) - *Two-dimensional beach transformation due to wave*. *Proc. 14th. Coast. Eng. Conf., Am. Soc. Civil Eng.*, 920-938.
- Sunamura T. (1984) - *Onshore-Offshore sediment transport rate in the swash zone of laboratory beaches*. *Coastal Eng. Japan*, 27: 205-212;
- Sunamura T. (1992) - *Geomorphology of rocky coasts*. John Wiley & Sons Ed., Chichester. pp. 302.
- Tropeano M. e Sabato L. (2000) - *Response of Plio-Pleistocene mixed bioclastic-lithoclastic temperate-water carbonate systems to forced regressions: the Calcarenite di Gravina Formation, Puglia SE Italy*. In: Hunt D. & Gawthorpe R.L. (eds.). "Sedimentary Responses to Forced Regressions", Geological Society, London, *Spec. Publ.*, 172: 217 -243.

Ricevuto il 29/01/2014, accettato il 09/06/2014.