

Morfologia del Saliente Is Morus - Pula (Ca) e idrodinamica attorno allo scoglio antistante

Andrea Atzeni ¹, Claudia Pedone ², Andrea Sulis ³

¹ Università di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria del Territorio, Sezione di Idraulica. Email: aatzeni@unica.it

² Università di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria del Territorio, Sezione di Idraulica. Email: pedone.c@gmail.com

³ Università di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria del Territorio, Sezione di Idraulica. Email: asulis@unica.it

Sommario

Le strutture sommerse raccolgono oggi ampio consenso dovuto principalmente alla loro capacità di poter assicurare, in prospettiva, una efficace protezione dei litorali senza un impatto paesaggistico negativo. Sebbene un'ampia letteratura sia disponibile, la risposta della spiaggia alla presenza di queste strutture sommerse non è completamente chiara. In particolare queste strutture potrebbero produrre condizioni di erosione o di accrescimento della spiaggia. Questo articolo presenta i risultati della applicazione di modelli numerici alla spiaggia di Is Morus (Sardegna) dove un ostacolo naturale sommerso ha creato un accumulo di sedimento nella forma di un saliente. I risultati appaiono in accordo con i modelli empirici forniti dalla letteratura per la previsione delle proprietà geometriche e della forma del saliente.

Parole chiave: salienti, frangiflutti sommersi, onde morfologicamente equivalenti, flusso di energia del moto ondoso.

Abstract

Submerged structures are becoming increasingly popular due to their capacity of providing necessary beach protection without negative aesthetic impacts. Although large literature is available, the shoreline response to submerged structures is not well understood at the present. Results show that these structures may induce shoreline erosion as well as shoreline accretion. This paper aims to present the results of numerical modeling tests applied to the Is Morus beach (Sardinia) where a natural submerged reef has created a widening of the beach in the form of salient. Results are in accordance with empirical relationships provided by literature for predicting salient shape and geometrical properties.

Keywords: salients, submerged breakwaters, equivalent morphologic waves, wave energy flux.

Introduzione

Le opere di difesa rigide come i pennelli e soprattutto i frangiflutti distaccati dalla riva realizzate a protezione dei litorali sono state costruite quasi sempre con il coronamento emergente rispetto al livello medio del mare. La ragione di questa scelta progettuale risiede nel fatto che le opere emergenti ostacolando l'energia del moto ondoso, che viaggia prevalentemente attorno al livello medio del mare, creano una zona protetta ove l'onda penetra quasi esclusivamente per diffrazione attorno alle testate. Queste opere possono essere realizzate riducendo la larghezza al coronamento al minimo necessario alla stabilità, la qual cosa soddisfa adeguatamente l'aspetto economico. Secondo la classificazione di Kobayashi et al. (1985) esse sono efficaci o almeno moderatamente efficaci anche

per contrastare i disastri prodotti dagli eventi estremi, ma inadatte e non accettabili dal punto di vista paesaggistico e poco adeguate per il rinnovo delle acque nella zona protetta, almeno nel caso di incidenza normale del moto ondoso. Per contro le opere di difesa sommerse appaiono ben accette dal punto di vista paesistico e sono efficaci per il rinnovo delle acque, ma nel contempo possono risultare poco o del tutto inefficaci agli effetti della protezione dei litorali (Dean et al., 1997). Tuttavia, a conferma della possibilità che gli ostacoli sommersi siano in grado di proteggere i litorali, esistono numerosissimi esempi di scogli naturali sommersi a ridosso dei quali sono presenti salienti e tomboli ben stabilizzati (Black and Andrews, 2001). A fronte di questi risultati derivanti da constatazioni su forme di protezione naturali gli esempi di opere realizzate dall'uomo hanno mostrato molto spesso una scarsa efficacia protettiva (Ranasinghe e Turner, 2006). Anche i risultati degli studi su modello fisico a fondo fisso e mobile riportati dalla letteratura hanno mostrato quasi sempre l'inefficacia dell'azione protettiva delle opere di difesa sommerse (Ranasinghe e Turner, 2006).

Una rassegna di casi studio dei frangiflutti distaccati trascinabili (Mancinelli et al., 2005) considera otto interventi sui litorali di cinque regioni italiane. Da questi casi non possono però trarsi sicure informazioni sull'efficacia protettiva di queste opere in quanto trattasi quasi sempre di realizzazioni effettuate a protezione di ripascimenti, la qual cosa rende difficile valutare l'evoluzione e distinguere gli effetti sul sedimento in situ da quello di riporto. Gli interventi sono comunque del tipo lineare a cresta relativamente stretta (massimi dell'ordine di 10-12 m), talvolta segmentati e sommergezza variabile da zero a 1 m. Sono compresi anche due casi di frangiflutti emergenti, ma trascinabili in quanto ritenuti comunque a cresta bassa. In questi casi studio è stata rilevata quasi sempre la presenza di intense correnti longitudinali prodotte dal moto ondoso che favoriscono il ricambio idrico della zona ridossata, ma anche la tendenza ad allontanare i sedimenti da tale zona.

Studi su modello fisico della circolazione della corrente prodotta dal moto ondoso attorno ad un frangiflutto isolato e sommerso mostrano la corrente trascinare sull'opera verso riva e ritornare a largo nelle zone di estremità (Dean et al., 1997). Risultati analoghi si ottengono da studi su modello numerico (Nobuoka et al. 1996) nel caso di un ostacolo sommerso di forma quadrata, investito da un moto ondoso normale alla riva.

Lo studio su un'opera di difesa distaccata emergente e isolata (Zyserman e Johnson, 2002), condotto mediante il modello numerico MIKE 21 implementato dal Danish Hydraulic Institute (DHI), indica che attorno al frangiflutto la circolazione delle correnti prodotte dal moto ondoso agente con un angolo di incidenza diverso da 90° si intensifica verso riva nella zona ridossata di monte e verso valle nella zona prossima all'opera. Gli autori, utilizzando il modello di trasporto dei sedimenti non coesivi Q3D del pacchetto MIKE 21 (una versione più avanzata del precedente modello 2DH) calcolano l'accumulo dei sedimenti nell'area ridossata dal frangiflutto. Il saliente, o il tombolo, che si forma a ridosso del frangiflutto è la diretta conseguenza del campo di velocità delle correnti; il volume accumulato è funzione della posizione relativa del frangiflutto rispetto alla linea dei frangenti. Anche nel caso di frangiflutti distaccati e discontinui le correnti prodotte dal moto ondoso attorno ai varchi sono diverse passando dai frangiflutti emergenti a quelli sommersi, come risulta da prove su modello fisico (Loveless e MacLeod, 1999).

Per quanto riguarda la capacità di accumulo di sedimenti nell'area protetta da un frangiflutto emergente distaccato dalla riva un esame condotto da Hsu e Silvester (1990) su 46 risultati di ricerche riguardanti in gran parte prove su modello fisico, ma anche su prototipi e modelli numerici fornisce una legge sull'avanzamento del saliente. Tale legge stabilisce la relazione tra la distanza del frangiflutto dalla linea di riva originaria e la lunghezza del frangiflutto.

La geometria dei salienti e dei tomboli prodotti da ostacoli naturali emergenti e sommersi è stata studiata su 149 spiagge sabbiose della Nuova Zelanda e dell'Australia (Black e Andrews, 2001). Da questo studio emerge la validità dei risultati di Hsu e Silvester di cui sopra, con la differenza che nel caso dei salienti e tomboli prodotti da ostacoli naturali emergenti e sommersi l'accumulo dei sedimenti nelle zone protette dagli ostacoli naturali è più consistente di quello che si verifica a ridosso di frangiflutti distaccati. Black e Andrews giustificano questo risultato ricorrendo alla considerazione che nello studio di Hsu e Silvester i risultati derivano in prevalenza da studi su modello fisico (ove sono presenti effetti di scala), da studi su prototipi in cui probabilmente il tempo di azione

del moto ondoso non ha portato ancora alla piena condizione di equilibrio del saliente, e da modelli numerici. Un'altra interpretazione di queste differenze tra le risposte delle spiagge protette da ostacoli artificiali emergenti dello studio di Hsu e Silvester e delle spiagge protette da ostacoli naturali sommersi è fornita da Ranasinghe e Turner (2006) secondo i quali gli ostacoli naturali o artificiali sommersi ed estesi a mo' di piattaforme di abrasione, in certe circostanze, dipendenti dalla estensione di queste e dalla loro posizione rispetto alla riva, sono in grado di favorire un accumulo maggiore di sedimenti rispetto ai frangiflutti emergenti.

Ranasinghe et al. (2006) hanno studiato la circolazione delle correnti prodotte dal moto ondoso in prossimità di un frangiflutti sommerso con coronamento piano orizzontale a forma di triangolo isoscele, con il vertice dei lati uguali rivolto verso il largo. Lo studio, eseguito su modello fisico a fondo fisso e su modello numerico, ha riguardato diverse posizioni del frangiflutti rispetto alla linea di riva, due valori di sommergezza (-0.5 e -1.0 m) e due diversi attacchi ondosi, uno perpendicolare alla riva e uno obliquo, con onde regolari e irregolari (spettro JONSWAP). In tutti i casi la corrente tracima sull'ostacolo, ma se questo è troppo vicino alla riva a valle di esso la corrente diverge dalla zona protetta verso i lati. Viceversa quando l'ostacolo si allontana dalla riva entrambi gli attacchi ondosi producono a valle del frangiflutti due vortici che favoriscono lungo riva la convergenza della corrente verso la zona ridossata. Il modello numerico adottato era quello commerciale MIKE 21 mediante il quale oltre allo studio di trasformazione delle onde e delle correnti da esse prodotte, con il modulo Sediment Transport (ST) 2DH è stato studiato anche il trasporto solido e l'evoluzione dell'accumulo o dell'erosione a ridosso dell'ostacolo. I risultati di questa parte dello studio sono in linea con quanto risulta dalla distribuzione delle correnti nei diversi casi esplorati. In particolare è emerso che nell'accumulo, rappresentato dall'avanzamento del saliente rispetto alla linea di riva originaria, è importante la posizione della linea dei frangenti, la distanza del vertice lato mare dell'ostacolo dalla linea di riva e la sua larghezza.

Il massimo avanzamento del saliente si ha intorno ad una distanza doppia del vertice dell'ostacolo rispetto a quella dei frangenti dalla linea di riva. Inoltre, l'avanzamento del saliente è maggiore nel caso delle onde incidenti normali e nel caso di sommergezza dell'ostacolo inferiore. Questo risultato è in linea con quello ottenuto da Zyserman e Johnson (2002) per il caso del frangiflutti emergente lineare di cui si è detto in precedenza.



Figura 1 - Vista panoramica del saliente di Is Morus (Pula, CA) dove sono evidenti due piccoli promontori e lo scoglio sommerso.

Da quanto esposto appare evidente che anche i frangiflutti sommersi sono in grado di favorire l'accumulo di sedimenti nella zona sotto il loro riparo, in maniera almeno altrettanto efficace di quelli emergenti. Si tratta solo di concepirli non semplicemente abbassando la quota del coronamento sotto il livello del mare dei frangiflutti

emergenti di tipo tradizionale, ma di attribuire loro una forma planimetrica bidimensionale capace di comportarsi come una piattaforma di abrasione ossia un basso fondale capace di attenuare l'azione erosiva delle onde. Queste forme sono state concepite grazie all'osservazione dei numerosi esempi esistenti in natura di cui Black e Andrews (2001) hanno fornito diversi casi, come si è visto.

Con lo scopo di aggiungere un contributo, il presente studio è dedicato all'esame di un saliente prodotto da un ostacolo naturale sommerso costituito da uno scoglio relativamente esteso in planimetria, la cui quota massima è intorno a -0.20 m rispetto al livello medio del mare. Il saliente si trova nella costa meridionale della Sardegna in località Is Morus (Pula, CA). La morfologia della linea di riva è stata confrontata con le forme analitiche ottenute da Black e Andrews (2001) su un totale di 27 profili planimetrici di salienti di varie dimensioni osservati nelle coste della Nuova Zelanda e dell'Australia, interessati da differenti condizioni di mare vivo e di mare morto e costituiti da corpi sedimentari, alcuni dei quali caratterizzati da sabbie quarzose di granulometria medio-fine, altri da sabbie fini pesanti, comunemente conosciute come sabbie nere (*black sands*). L'ampiezza del saliente è stata verificata attraverso il confronto con la funzione che stabilisce il suo legame con le dimensioni e la posizione dell'ostacolo rispetto alla linea dei frangenti.

Dal punto di vista idrodinamico, partendo dal clima ondoso al largo sono state determinate le onde morfologicamente equivalenti che interessano la zona del saliente. Di queste onde è stata eseguita la trasformazione verso riva e determinati i campi di velocità delle correnti attorno allo scoglio.

Morfologia del saliente della spiaggia di Is Morus

La Figura 1 mostra una vista panoramica del saliente di Is Morus, appartenente a una costa frastagliata con brevi promontori rocciosi tra i quali si inseriscono piccole spiagge (*pocket-beach*) non particolarmente ricche di sedimenti sabbiosi. Forse a causa della ridotta ampiezza della spiaggia emersa, limitata dalla presenza di una scarpata rocciosa, nella spiaggia emersa (retro-riva, *back shore*) di Is Morus, mancando qualunque segno di berma di tempesta, è presente solo la berma ordinaria. Nella Figura 2 è riportato il fuso granulometrico dei sedimenti campionati superficialmente nei punti della spiaggia indicati con la numerazione progressiva da uno a cinque in Figura 3.

Come mostra la figura il campione n. 3 appartiene alla spiaggia adiacente. Il corpo sedimentario è costituito da una sabbia ben assortita di granulometria medio-fine e il campione n. 3 risulta interno al fuso.

Nella Figura 3 sono riportate la planimetria della linea di riva del saliente e le isobate, rilevate recentemente, che mettono in evidenza l'ostacolo dovuto allo scoglio sommerso e la presenza di un piccolo promontorio roccioso a sud. Nella stessa figura sono riportate le grandezze geometriche che caratterizzano un saliente fornendone nel seguito una definizione per quanto possibile rigorosa.

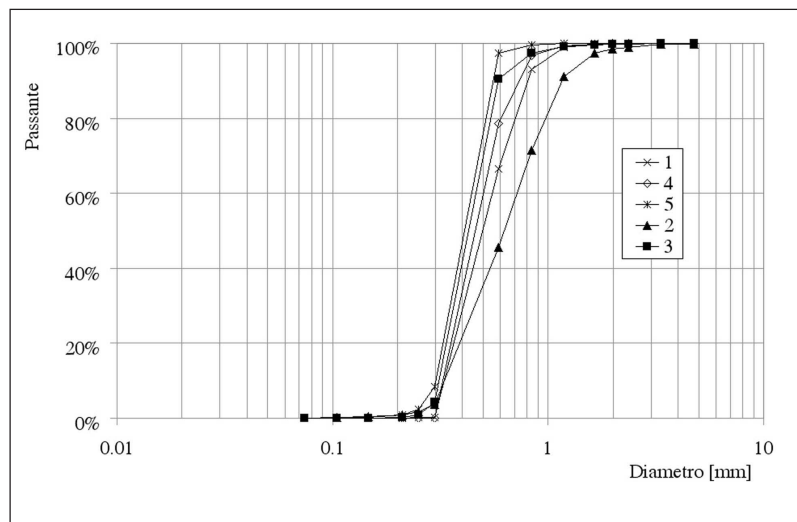


Figura 2 - Fuso granulometrico dei sedimenti della spiaggia di Is Morus ottenuto da cinque punti di campionamento (Fig. 3).

In particolare:

Linea di riferimento: la linea di riferimento è la linea tangente alla linea di riva indisturbata nei suoi due punti più arretrati nei due lati del saliente;

Lunghezza dell'ostacolo (B): la lunghezza dell'ostacolo è la sua massima dimensione dell'ostacolo parallelamente alla linea di riferimento;

Ampiezza del saliente (Y_{off}): l'ampiezza del saliente è la distanza tra la linea di riferimento e l'apice del saliente misurata nella direzione ortogonale alla linea di riferimento;

Distanza dell'ostacolo (S): la distanza dell'ostacolo è misurata rispetto alla linea di riferimento nella direzione ortogonale alla linea stessa.

La Figura 3 riporta anche la direzione risultante dei vettori flusso di energia del moto ondoso il cui orientamento si scosta di 13° dalla normale alla linea di riferimento. Anche a nord del saliente è presente un promontorio roccioso appena accennato (Fig. 3).

Secondo la classificazione di Black e Andrews (2001) si tratta di un *pocket beach salient*: per questi autori la linea di riva dei salienti è riconducibile a una forma analitica del tipo:

$$y' = a + \frac{b}{\left\{ 1 + \exp \left[-\frac{(x' - d \ln(2^{1/d} - 1) - c)}{d} \right] \right\}^d} \quad (1)$$

ove le coordinate di ciascun punto sono rese adimensionali rispetto all'ampiezza, del saliente (Y_{off}) e a, b, c e d sono delle costanti con $a = -0.052$. L'equazione (1) deriva da una minuziosa analisi di 49 linee di riva estratte da fotografie aeree senza alcun riferimento alla morfologia dei fondali e dell'ostacolo. Variando i parametri b, c e d dell'equazione (1) si riproducono tutte le 49 linee di riva con un coefficiente di correlazione superiore a 0.99.

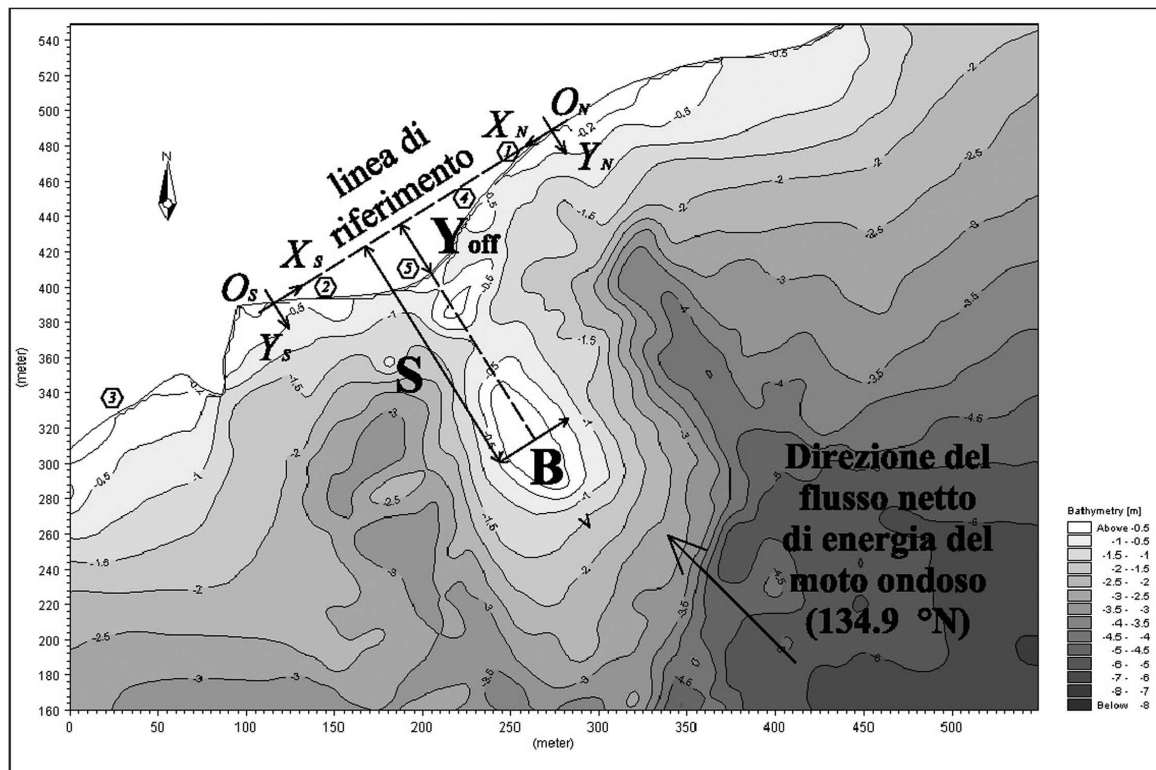


Figura 3 - Planimetria della linea di riva del saliente e delle isobate rilevate nel corso del presente studio: i numeri cerchiati indicano le posizioni dei campionamenti di sedimenti, i due sistemi di riferimento con origine O_s e O_n riguardano rispettivamente la riva meridionale e settentrionale del saliente (rilievo batimetrico in data 26.09.2008, rilievo della linea di riva in data 20.01.2009).

In particolare, le tre curve in Figura 4 indicate con “max”, “medio” e “min” sono riferite alla risposta massima, media e minima tra tutte le 49 linee di riva oggetto di studio da parte di Black and Andrews.

Per la sua forma adimensionale, l'equazione (1) ha il solo scopo di individuare la forma tipo dei salienti e non di fornire le reali dimensioni geometriche degli stessi esaminate nel seguito di questo articolo. Nella Figura 4 sono riportati anche i profili delle linee di riva meridionale e settentrionale del saliente di Is Morus. Mentre il profilo settentrionale è abbastanza in linea con una (quella massima) delle curve, ricavata con la (1), quello meridionale se ne discosta notevolmente, forse a causa del disturbo offerto dal promontorio meridionale che produce un ostacolo particolare alla modellazione del sedimento.

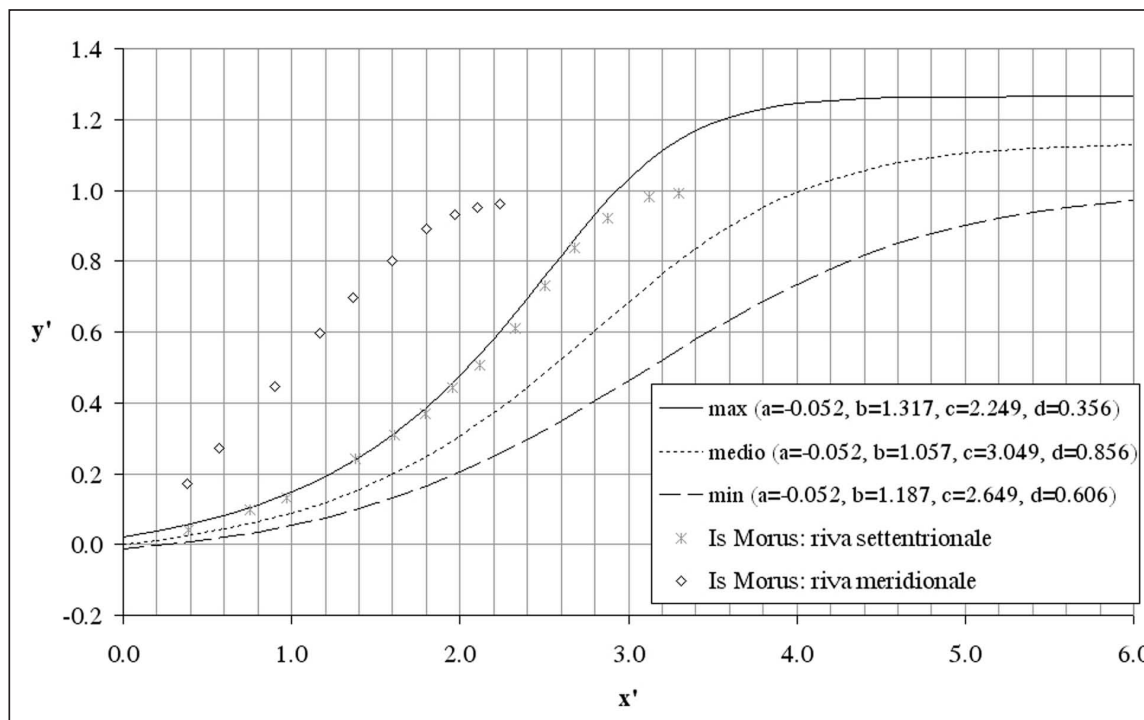


Figura 4 - Confronto tra le linee di riva ottenute da Black e Andrews (2001) e quelle dei due rami del saliente di Is Morus.

In base alle dimensioni caratteristiche riportate nella Figura 3 l'ampiezza del saliente di Is Morus ricade nel punto indicato nella Figura 5 in cui sono riportati i grafici dell'aggetto dei salienti risultanti dagli studi di Hsu e Silvester (1990) e di Black e Andrews (2001).

Come mostra la figura il saliente di Is Morus è intermedio rispetto alle forme prodotte dagli ostacoli emergenti studiate da Hsu e Silvester e a quelle degli ostacoli naturali di Black e Andrews, ma più vicina a queste ultime, addirittura appartenente alla curva $(S-Y_{\text{off}})/B=0.40(B/S)^{-1.52}$ che questi ultimi autori hanno riscontrato per le morfologie dei salienti prodotti da isole. In realtà nel caso di Is Morus la morfologia del saliente non è prodotta da un'isola ma da uno scoglio sommerso, anche se quasi affiorante. Sembra comunque si possa dire che i frangiflutti e gli ostacoli sommersi possano essere in grado di produrre accumuli di sedimenti anche superiori a quelli forniti dagli ostacoli emergenti, come ritenuto da Ranasinghe e Turner (2006).

Clima ondoso e calcolo delle onde morfologicamente equivalenti

Il clima ondoso utilizzato nel presente studio è tratto dalla serie storica esaoraria (dal 1992 al 2002) dei dati di moto ondoso ricostruito dal CNR di Venezia (ISMAR) nel punto di coordinate geografiche 9.5° E, 39.0° N, al largo di Capo Carbonara. Nella Figura 6 è riportato uno stralcio della carta della Sardegna contenente la rosa

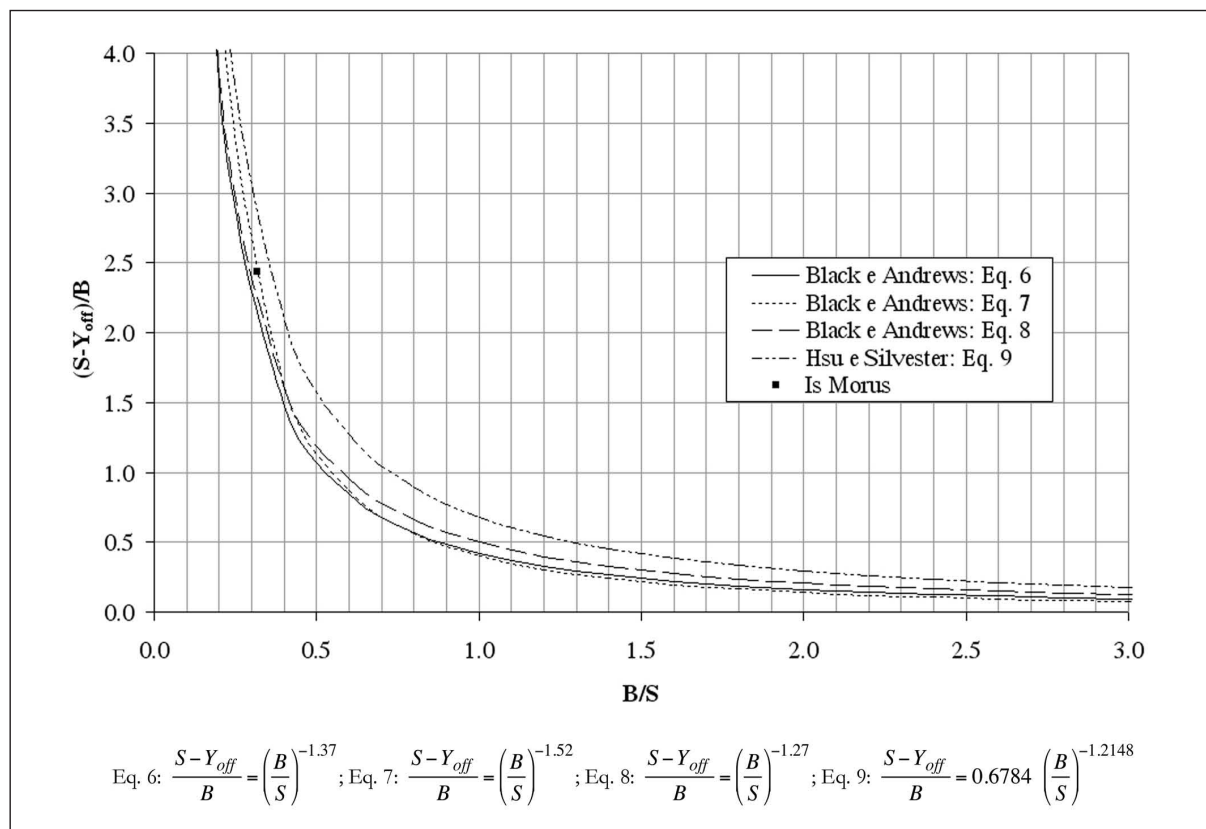


Figura 5 - Aggetto dei salienti risultanti dagli studi di Hsu e Silvester (1990) e di Black e Andrews (2001) a confronto con l'aggetto del saliente di Is Morus (per il significato dei simboli vedi Figura 3).

delle frequenze del moto ondoso, ubicata nel punto di ricostruzione e la posizione del saliente di Is Morus. Per Onde Morfologicamente Equivalenti (OME) si intende un numero limitato di onde che agendo sul litorale per un calcolato numero di ore all'anno producono un trasporto solido uguale alla popolazione di onde del clima ondoso.

Il calcolo delle OME può farsi utilizzando il parametro di flusso longitudinale di energia del moto ondoso di cui esistono diverse forme approssimate, suggerite dallo Shore Protection Manual (SPM, 1984), in funzione dei dati di moto ondoso disponibili. Nel presente studio, disponendosi delle statistiche bivariante delle altezze d'onda significative al largo H_{0s} , e dei periodi medi T_m per settori di direzione di 10° , il flusso è stato calcolato mediante la formula:

$$P_{lbs} = \frac{\pi \times K_s^3}{8\sqrt{gk}} \sqrt{\frac{g}{k}} \rho g \frac{H_{0s}^3}{T_s} \sqrt{|\cos \alpha_0|} \sin 2\alpha_0 \quad (2)$$

ove K_s è il coefficiente di shoaling, k è il rapporto tra l'altezza d'onda al frangente e la corrispondente profondità, T_s è il periodo significativo (si è posto $T_s = T_m$) e α_0 l'angolo della direzione dell'onda al largo rispetto alla normale alla spiaggia. Nel presente studio K_s e k sono stati assunti costanti ($K_s = 1.07$; $k = 0.78$) secondo quanto riportato rispettivamente nello Shore Protection Manual (SPM, 1984) e in Munk (1949).

A rappresentare gli effetti morfologici del clima ondoso sono state scelte quattro onde appartenenti alle direzioni di 95°N (per le onde del settore $50-100^\circ \text{N}$), 135°N (per le onde del settore $100-140^\circ \text{N}$), 145°N (per

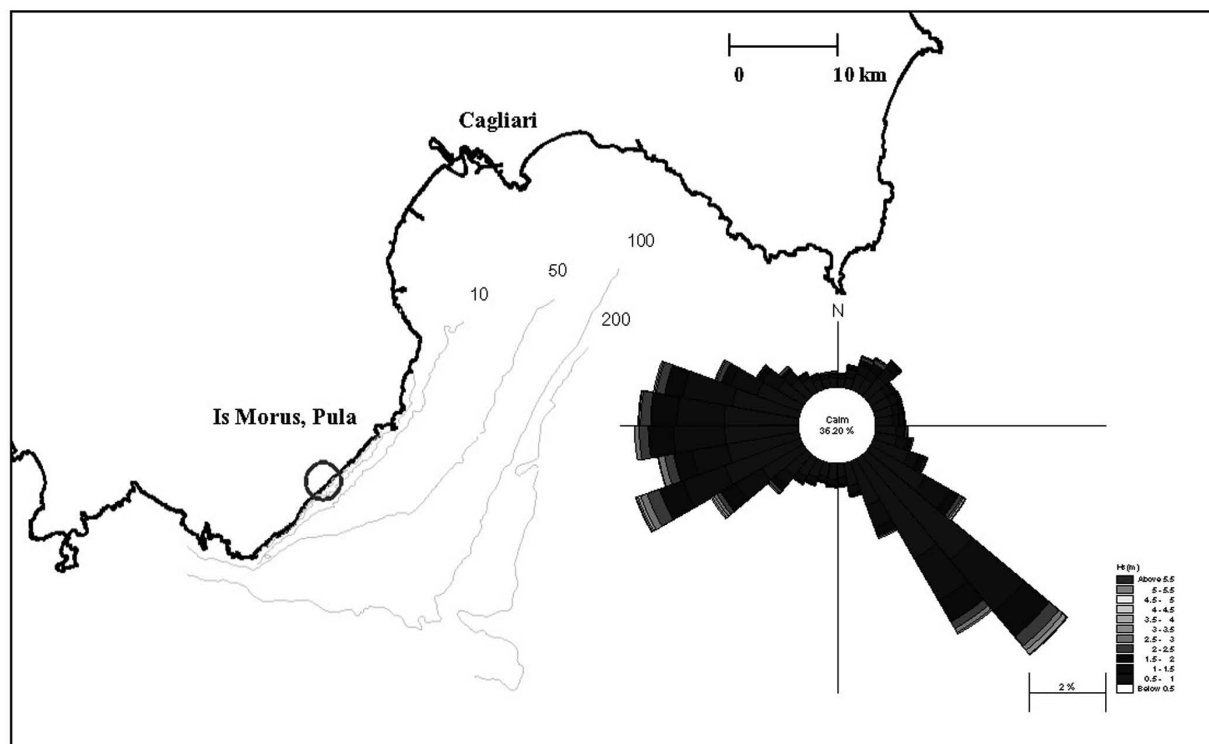


Figura 6 - Stralcio della Sardegna meridionale contenente la rosa delle frequenze del moto ondoso ubicata nel punto di ricostruzione e la posizione del saliente di Is Morus.

le onde del settore 140-150 °N) e 225 °N (per le onde del settore 150-230 °N). Le altezze d'onda equivalenti H_{ec} sono ottenute calcolando la media pesata delle altezze d'onda del settore con peso i flussi di energia:

$$H_{ec} = \frac{\sum \left\{ H_{0sj}^4 \sqrt{|\cos(DirN - DirH)|} \text{sen}[2(DirN - DirH)] f_j / T_{sj} \right\}}{\sum \left\{ H_{0sj}^3 \sqrt{|\cos(DirN - DirH)|} \text{sen}[2(DirN - DirH)] f_j / T_{sj} \right\}} \quad (3)$$

essendo f_j la frequenza delle osservazioni e $DirN - DirH = \alpha_o$ l'angolo della direzione dell'onda rispetto alla normale alla spiaggia. Come altezza d'onda morfologicamente equivalente H_{ec} del settore è stata scelta quella con la massima frequenza e che più si avvicina ad H_{ec} . La frequenza dell'onda morfologicamente equivalente si ottiene dalla relazione:

$$f_e = \frac{\sum \left\{ H_{0sj}^3 \sqrt{|\cos(DirN - DirH)|} \text{sen}[2(DirN - DirH)] f_j / T_{sj} \right\}}{H_e^3 \sqrt{|\cos(DirN - DirH)|} \text{sen}[2(DirN - DirH)] / T_e} \quad (4)$$

I risultati del calcolo delle OME sono riportati nella Tabella 1 .

In considerazione della modesta persistenza dell'onda morfologicamente equivalente da 95°N (frequenza pari a circa 1.9 giorni per anno), il calcolo della trasformazione di quest'onda pur essendo stato eseguito, per brevità, non viene presentato nel seguito.

Tabella 1 - Onde morfologicamente equivalenti, loro frequenze e persistenze.

H_c (m)	DirH ($^{\circ}$ N)	T_e (s)	Frequenza		Persistenza		
			f_e	N° oss./100.000	Ore	Giorni	Giorni/ anno
2.25	95	7.21	0.0107	529.49	463.83	19.33	1.93
2.25	135	7.16	0.0858	4257.36	3729.45	155.39	15.54
1.25	145	6.14	0.135	6702.25	5871.17	244.63	24.46
1.75	225	6.69	0.1277	6341.09	5554.79	231.45	23.14

Trasformazione delle onde morfologicamente equivalenti

Il calcolo della trasformazione delle OME nella propagazione verso riva è stato eseguito con l'impiego dei moduli numerici di calcolo implementati dal Danish Hydraulic Institute (DHI) nel software MIKE 21: il modulo denominato Near Shore Waves (NSW) (DHI, 2008a) e quello denominato Parabolic Mild-Slope (PMS) (DHI, 2008b). L'NSW è un modello spettrale che descrive la propagazione, la crescita e il decadimento del moto ondoso nell'area di trasformazione risolvendo le equazioni di conservazione dell'azione delle onde (Holtuijensen et al., 1989). Il modello, che è stato applicato per la trasformazione da largo fino all'area di trasformazione ($d_{min} = 10$ m), calcola la rifrazione, lo shoaling, la variazione di altezza d'onda dovuta al vento e la perdita di energia dovuta alla resistenza del fondo e al frangimento parziale. L'area sottoposta a modellazione occupa l'estensione di 20000 x 18000 m con la maglia di 20 x 60 m. La batimetria nella zona più lontana dalla riva è stata ricavata dalla cartografia nautica IIMM, mentre nella zona vicina alla spiaggia e attorno allo scoglio si è provveduto ad eseguire un apposito rilievo batimetrico. Anche della linea di riva è stato eseguito un apposito rilievo planimetrico.

Nella Tabella 2 sono riportati i risultati delle trasformazioni subite dalle onde nel passare dalle acque profonde fino al punto di acque di trasformazione le cui altezze e direzioni sono stati assunti come dati di ingresso per l'applicazione del modello PMS.

Il modello numerico PMS è basato sull'approssimazione parabolica della "mild-slope equation" (Kirby, 1986) e contempla gli effetti di rifrazione, shoaling, diffrazione, frangimento, dispersione direzionale, dispersione in

Tabella 2 - Trasformazioni delle onde morfologicamente equivalenti ottenute con il modulo NSW.

T_e (s)	A largo		Sottocosta ($d=10$ m)	
	H_c (m)	DirH ($^{\circ}$ N)	H_c (m)	DirH ($^{\circ}$ N)
7.16	2.25	135	2.04	136
6.14	1.25	145	1.58	143
6.69	1.75	225	0.90	185

avanti (*forward scattering*) e resistenza opposta all'onda incidente da parte del fondo. Quest'ultimo modello è stato applicato in tutta l'area di acque basse a partire dall'area di trasformazione in cui come dati d'ingresso sono stati utilizzati i valori di altezza d'onda forniti dall'NSW. Il modello PMS ha interessato diverse aree di calcolo per le quattro onde con una estensione pari a 900 x 1300 m (onda 135 $^{\circ}$ N), 900 x 1060 m (onda 145 $^{\circ}$ N) e 1400 x 1040 m (onda 225 $^{\circ}$ N). Per tutte le aree di calcolo sono state scelte maglie quadrate di dimensione 4 x 4 m.

La resistenza al moto offerta dal fondo è stata messa in conto nell'applicazione di entrambi i modelli assumendo la scabrezza geometrica $k_N = 2$ mm di Nikuradse.

Nelle Figure 7, 8 e 9 sono riportati i risultati dei calcoli del PMS. Le tre figure mostrano una convergenza del moto ondoso verso lo scoglio sommerso, una divergenza nella zona a nord del saliente con una evidente attenuazione dell'altezza e una più modesta divergenza a sud, ma con una maggiore altezza.

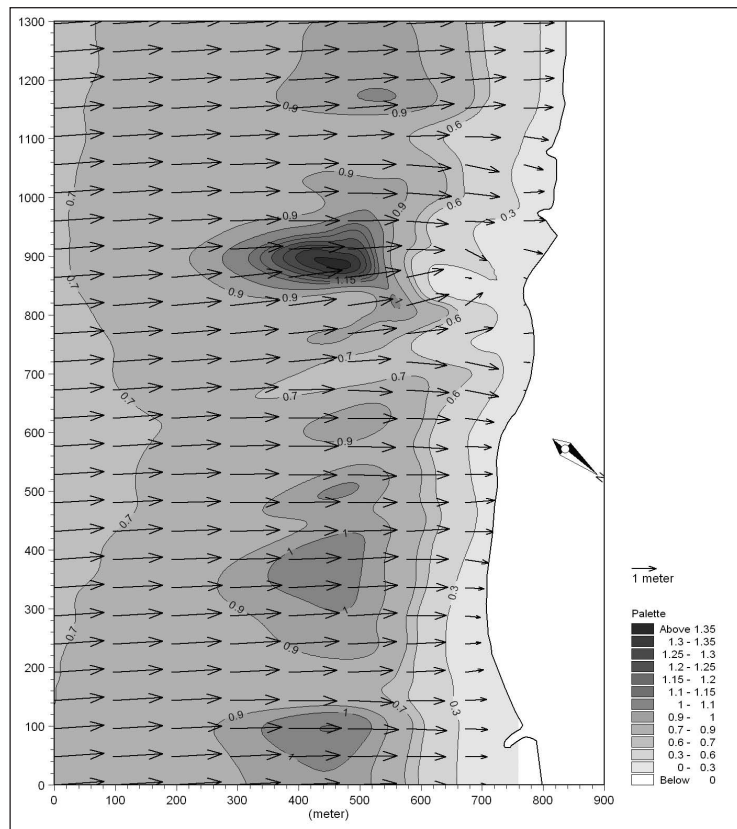


Figura 7 - Campo delle altezze d'onda e dei *radiation stress* ottenuti con l'applicazione del modello numerico PMS. Direzione dell'attacco ondoso al largo 135°N.

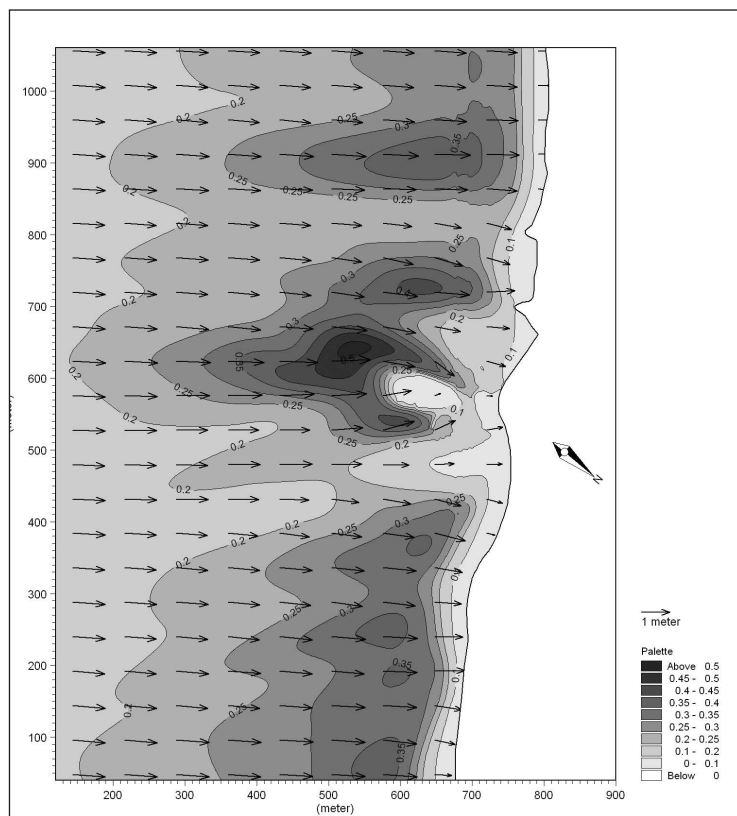


Figura 8 - Campo delle altezze d'onda e dei *radiation stress* ottenuti con l'applicazione del modello numerico PMS. Direzione dell'attacco ondoso al largo 145°N.

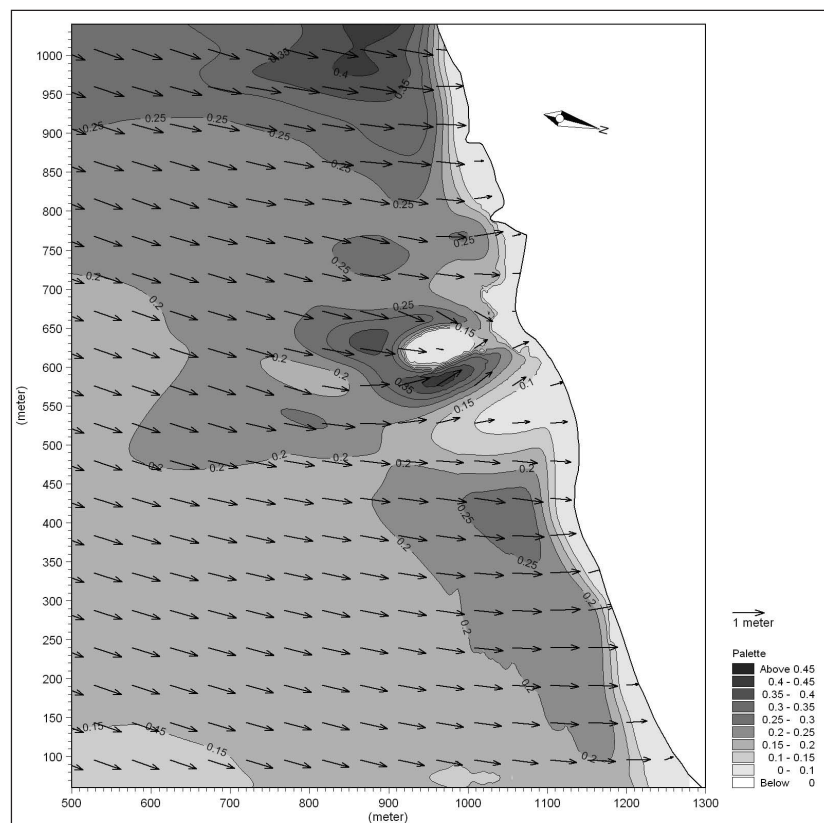


Figura 9 - Campo delle altezze d'onda e dei *radiation stress* ottenuti con l'applicazione del modello numerico PMS. Direzione dell'attacco ondoso al largo 225 °N.

Questa dissimmetria idrodinamica può almeno in parte contribuire a spiegare la differente morfologia delle due linee di riva settentrionale e meridionale del saliente. La posizione dei frangenti più esterni è stata assunta avendo a riferimento i massimi dei *radiation stress* il cui campo di distribuzione è riportato nelle tre figure.

Circolazione delle correnti prodotte dal moto ondoso

Il calcolo delle correnti prodotte dal moto ondoso è stato eseguito applicando il modulo Hydrodynamic HD del MIKE 21 (DHI, 2008c) che calcola il campo delle velocità integrate nel tirante idrico applicando le equazioni di continuità e della quantità di moto (Abbott et al., 1973; Abbott, 1979). Le forzanti messe in conto sono i gradienti del campo di radiation stress. Non sono state considerate le forzanti del vento e mareali. La modellazione ha interessato aree identiche a quelle del calcolo del PMS, ma con maglie quadrate di dimensioni doppie.

Nelle Figure 10, 11 e 12 sono riportati i risultati dei calcoli dei campi di velocità delle correnti prodotte dalle tre OME. Il campo di velocità prodotto dal moto ondoso da 135 °N è diretto verso sud (Fig. 10), con una deviazione attorno allo scoglio che protegge il saliente. Come è stato osservato anche dagli studi citati in premessa, è presente una corrente che tracimando sullo scoglio si dirige verso il saliente.

Lungo riva, la circolazione generale della corrente prodotta dal moto ondoso da 145 °N che è quasi perpendicolare alla linea di riferimento (Fig. 3), è ancora diretta da nord a sud, ma in questo caso l'intensità della corrente è sensibilmente inferiore (Fig. 11). Si notano due vortici antiorari a nord e a sud del saliente a cui sono associate le correnti che circolano attorno allo scoglio. Anche in questo caso è presente una corrente che tracima sullo scoglio. La Figura 12 mostra il campo di velocità della corrente prodotta dal moto ondoso da 225 °N che sotto costa è diretta verso nord. Anche in questo caso la corrente circola attorno allo scoglio dal quale risulta deviata.

Rispetto ai risultati dei modelli numerici di Ranasinghe et al. (2006) si nota una sostanziale differenza dei campi di velocità delle correnti. Infatti le correnti ottenute da questi autori risultano sempre dirette contro l'ostacolo, senza mai circolarvi attorno.

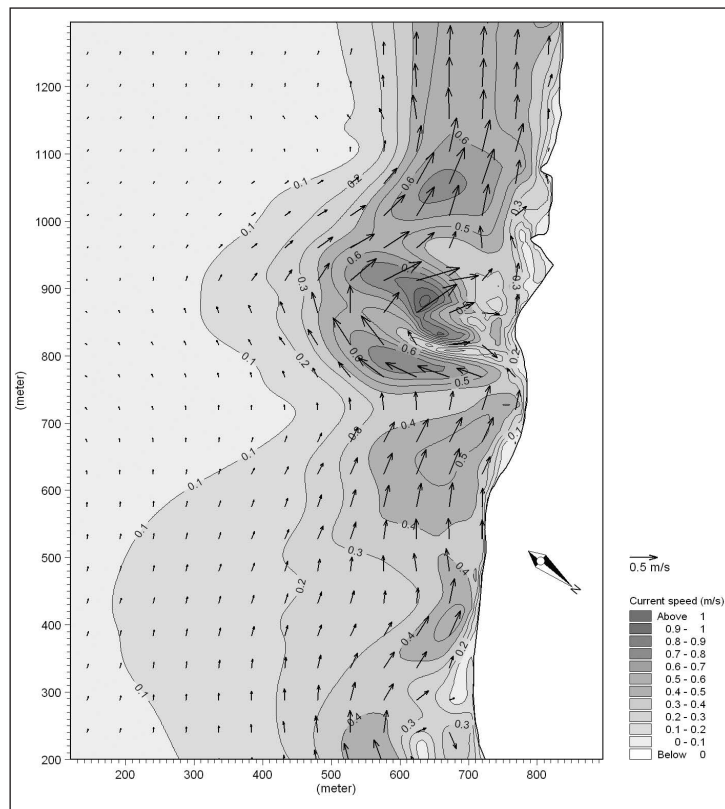


Figura 10 - Campo di velocità delle correnti indotte dal moto ondoso da 135 °N ottenuto con l'applicazione del modello numerico HD.

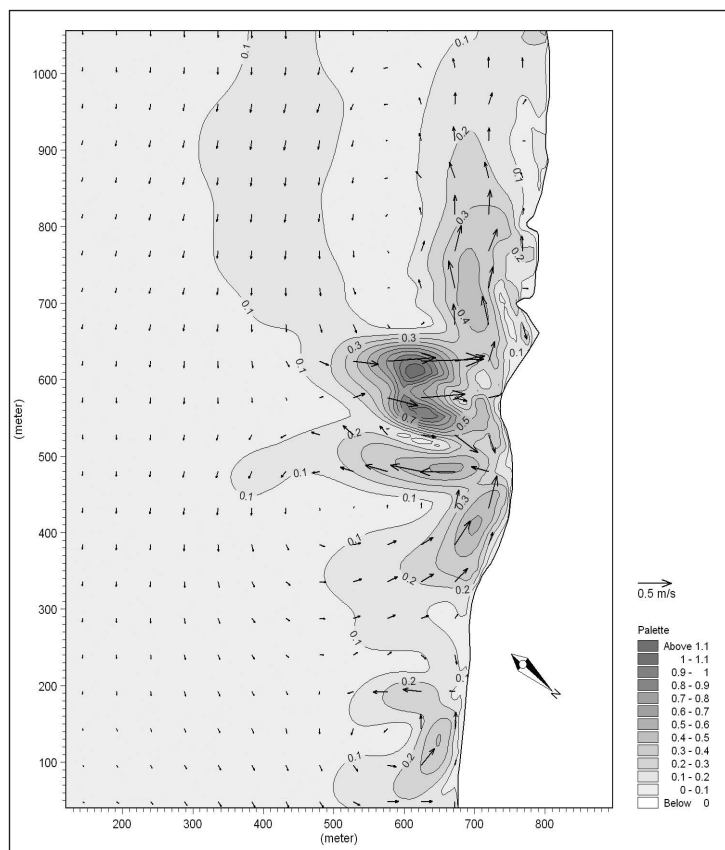


Figura 11 - Campo di velocità delle correnti indotte dal moto ondoso da 145 °N ottenuto con l'applicazione del modello numerico HD.

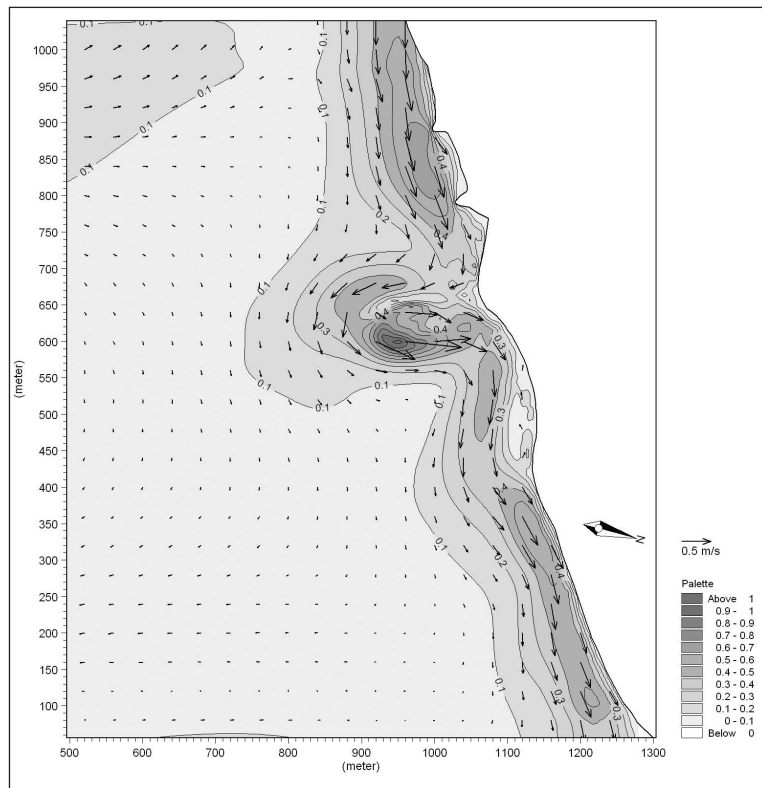


Figura 12 - Campo di velocità delle correnti indotte dal moto ondoso da 225 °N ottenuto con l'applicazione del modello numerico HD.

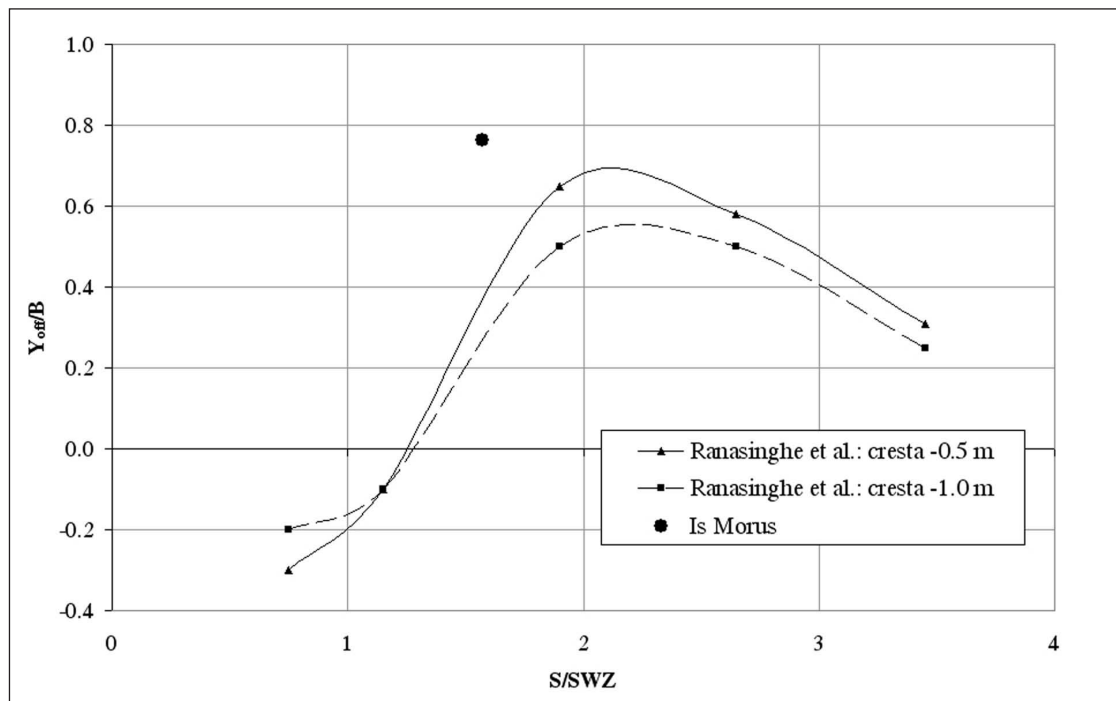


Figura 13 - Aggetto del saliente di Is Morus (riferito alla linea dei frangenti esterni prodotti dal moto ondoso da 145°N, con buona approssimazione perpendicolare alla riva) raffrontato con i risultati dello studio di Ranasinghe et al. (2006) (riferito al moto ondoso perpendicolare alla riva).

Il diverso comportamento può essere dovuto alla diversa forma dei due ostacoli: l'ostacolo artificiale di forma triangolare di Ranasinghe et al. contro lo scoglio naturale di forma approssimativamente tronco-conica, ma molto irregolare, del presente studio. Un'altra ragione può essere la forma rettilinea della linea di riva con un fondale piano acclive contro la batimetria naturale complessa del presente studio, la cui spiaggia è stata in precedenza definita come un *pocket beach salient*.

Accumulo di sedimenti a ridosso dello scoglio

Ranasinghe et al. (2006) hanno fornito i risultati della capacità di accumulo di sedimenti a ridosso del frangiflutti sommerso di loro progettazione (Fig. 13) mediante due diagrammi che riportano in ascisse la distanza del vertice lato mare del frangiflutti dalla linea di riferimento rapportata alla distanza della linea dei frangenti più esterni e in ordinate il rapporto tra l'ampiezza del saliente Y_{off} e la larghezza B del frangiflutti.

Sulla base di questi risultati, nella Figura 13 è riportata la posizione dell'oggetto del saliente di Is Morus riferito alla linea dei frangenti prodotti dal moto ondoso da $145^\circ N$ (praticamente normale alla linea di riferimento), i cui risultati sono paragonabili con quelli di Ranasinghe et al.

Come mostra la figura l'oggetto è superiore a quanto ottenuto da Ranasinghe et al. forse a causa della diversa forma dell'ostacolo di Is Morus, ma anche a causa della sua minore sommergenza rispetto al frangiflutti studiato dai suddetti autori.

Conclusioni

Il saliente di Is Morus appare abbastanza in linea con la morfologia dei salienti risultanti dalla letteratura; si tratta di un *pocket beach salient* che però si discosta, per la dissimmetria dei promontori che lo contengono, dalla forma simmetrica definita da Black e Andrews (2001). Dissimmetria riscontrata anche con il moto ondoso sotto costa delle onde morfologicamente equivalenti (OME).

I campi di velocità delle correnti sotto costa prodotte dal moto ondoso delle OME si presentano sempre con una direzione longitudinale. In corrispondenza dello scoglio sommerso, i campi di velocità subiscono una deviazione, allontanandosi dalla riva a monte di esso e ritornando verso riva a valle. Si nota sempre una corrente che tracima sullo scoglio, come nei casi studiati da Ranasinghe et al. (2006) per i frangiflutti sommersi di forma planimetrica triangolare. Però a differenza di quanto riportato da questi autori, in cui le correnti di moto ondoso non aggirano l'ostacolo, ma lo superano restando dirette contro la riva, nel presente studio le correnti circondano sempre l'ostacolo. La causa di questa differenza è da attribuirsi alle diverse forme del frangiflutti artificiale rispetto allo scoglio naturale.

Un altro aspetto interessante riguarda la prominente del saliente di Is Morus la cui lunghezza che misura la capacità dell'ostacolo di accumulare sedimenti, è risultata superiore a quella ottenuta da Ranasinghe et al. (2006). Questa maggiore efficacia protettiva dell'ostacolo naturale oggetto del presente studio è dovuta verosimilmente alla diversa forma ed alla minore sommergenza rispetto al frangiflutti, ma anche all'effetto combinato dell'ostacolo e della pocket beach, da cui deriva il diverso comportamento rispetto al frangiflutti di Ranasinghe et al. (2006) inserito a protezione di una spiaggia rettilinea.

Ringraziamenti

Gli Autori ringraziano l'Autorità Portuale di Cagliari per aver messo a disposizione i dati del clima ondoso, senza i quali questo articolo non sarebbe stato possibile.

Bibliografia

- Abbott M.B. (1979) - *Computational Hydraulics-Element of the theory of free surface flows*. Pitman, London.
 Abbott M.B., Damsgaard A. e Rodenhuis G. S. (1973) - *System 21 Jupiter. A design system for two-dimensional nearly-horizontal flows*. Journal Hydraulic Research, 1.
 Black K. e Andrews C. (2001) - *Sandy shoreline response to offshore obstacles: Part I. Salient and tombolo geometry*

- and shape*. Journal of Coastal Research, Special Issue 29 Natural and Artificial Reefs for Surfing and Coastal Protection: 82-93.
- Danish Hydraulic Institute (2008a) - *MIKE 21 Nearshore Spectral Wind-Wave Module*. Release 2008. User Guide and Scientific Documentation.
- Danish Hydraulic Institute (2008b) - *MIKE 21 Parabolic Mild-Slope Wave Module*. Release 2008. User Guide and Scientific Documentation.
- Danish Hydraulic Institute (2008c) - *MIKE 21 Hydrodynamic Module*. Release 2008. User Guide and Scientific Documentation.
- Dean R.G., Chen R. e Browder A.E. (1997) - *Full scale monitoring study of a submerged breakwater*. Coastal Engineering, 29: 291-315.
- Holtuijensen L.H., Booij N. e Herbers T.H.C. (1989) - *A prediction model for stationary, short created waves in shallow water with ambient currents*. Coastal Engineering, 13: 23-54.
- Hsu J.R.C. e Silvester R. (1990) - *Accretion behind single offshore breakwater*. Journal of Waterway, Ports, Coastal and Ocean Engineering, 116: 362-381.
- Kirby J.T. (1986) - *Rational approximations in the parabolic equation method for water waves*. Coastal Engineering, 10: 355-378.
- Kobayashi H., Tanaka T. e Shoyama S. (1985) - *Beach nourishment in Yokohama Marine Park*. PIANC 26th International Navigation Congress.
- Loveless J. e MacLeod B. (1999) - *The influence of set-up currents on sediment movement behind detached breakwater*. Proceeding Coastal Sediments '99, ASCE, Long Island, USA, 2026-2041.
- Mancinelli A., Aminti P.L., Archetti R., Atzeni A., Canu V., Cappiotti L., Lorenzoni C. e Zanuttingh B. (2005) - *Opere di difesa realizzate con strutture sommerse ed a cresta bassa ad Alghero (SS), Perd'e Sali (CA), Marina di Massa (MS), Marina di Pisa (PI), Porto di Recanati (MC), Marina di Montemarciano (AN), Lido di Dante (RA) e Pellestrina (VE)*. Studi Costieri, 9: 7-50.
- Munk, W.H. (1949) - *The solitary wave theory and its application to surf problems*. Annals of the New York academy of sciences, Vol. 51: 376-462.
- Nobuoka H., Irie L., Kato H. e Mimura N. (1996) - *Regulation of nearshore circulation by submerged breakwater for shore protection*. Proceedings of 25th International Conference on Coastal Engineering, ASCE, Orlando, USA, 2391-2403.
- Ranasinghe R. e Turner J.L. (2006) - *Shoreline response to submerged structures: A Review*. Coastal Engineering, 53: 65-79.
- Ranasinghe R., Turner J.L. e Symonds G. (2006) - *Shoreline response to multi-functional surfing reefs: A numerical and physical modelling study*. Coastal Engineering, 53: 589-611.
- Shore Protection Manual (1984) - *US Army Coastal Engineering Research Center, Dept. of the Army, Corps of Engineers. 4th ed., Vol.1 and Vol.2*, Washington, DC.
- Zyserman J.A. e Johnson K.H. (2002) - *Modelling morphological processes in the vicinity of shore-parallel breakwaters*. Coastal Engineering, 45: 261-284.

Ricevuto il 01/04/2009, accettato il 22/09/2009.