

## L'influenza delle opere sommerse nella morfodinamica costiera: uno studio numerico

Matteo Postacchini

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura, Università Politecnica delle Marche,  
Via Brecce Bianche, 60131 Ancona.

Tel: +39 071 2204539, Fax: +39 071 2204528, E-mail: m.postacchini@univpm.it

### Riassunto

Negli ultimi anni, le mareggiate risultano avere un impatto sempre più importante sull'economia dei litorali, incidendo pesantemente anche sul mantenimento delle strutture ricettive/turistiche, specialmente se hanno luogo nel periodo estivo. La progettazione delle tradizionali opere di difesa della costa risulta determinante nella protezione di tali strutture. Per questo motivo sono state effettuate alcune simulazioni mediante un solutore numerico idro-morfodinamico che risolve le equazioni delle acque basse e l'equazione di Exner. Sono stati realizzati test numerici con lo scopo di valutare i) l'effetto di mareggiate reali con diverse caratteristiche spettrali e ii) l'influenza della distanza da riva di una coppia di scogliere sommerse sulla morfologia della spiaggia. I risultati delle simulazioni hanno evidenziato una variazione minima nelle forme di erosione/accrecimento al variare delle caratteristiche spettrali delle mareggiate. La morfodinamica che si realizza intorno alle scogliere e nel varco è invece fortemente influenzata dalla posizione delle opere: le variazioni del fondale sono tanto maggiori, quanto più lontane sono le opere da terra. La zona di battigia, invece, è poco influenzata dalla distanza da riva delle scogliere.

**Parole chiave:** opere di difesa della costa, mareggiata, equazioni delle acque basse, morfodinamica.

### Abstract

*In the last few years, sea storms appear to be more and more important in the economy of coastal areas, strongly affecting the maintenance of recreational/tourist facilities, especially if they occur during the summer. The design of traditional coastal defense structures is crucial in the protection of such facilities. For this reason, some suitable simulations have been performed, using a numerical hydro-morphodynamic model that solves both Nonlinear Shallow Water Equations and Exner equation. Numerical tests have been run with the purpose of evaluating both i) the effect of real sea storms with different spectral characteristics, and ii) the influence of the position of two submerged breakwaters on beach morphology. The simulation results have revealed only minor variations in the erosion/accretion patterns when forced by different sea storms. On the other hand, the morphodynamics induced around the barriers and inside the gap is strongly influenced by the breakwater position: the farthest offshore are located the structures, the largest is the bed variation. Further, the swash zone is slightly influenced by breakwater position (distance from the shoreline).*

**Keywords:** coastal defense structures, sea storm, Nonlinear Shallow Water Equations, morphodynamics.

## Introduzione

L'erosione della spiaggia nella zona di battigia è dovuta principalmente al clima ondoso a cui è soggetta durante tutto l'anno. L'evoluzione della spiaggia è, quindi, un processo legato a eventi di lungo periodo, che risente sostanzialmente delle variazioni climatiche che caratterizzano le stagioni. A questo proposito (vedi, ad esempio, Kraus, 1992), si caratterizza la spiaggia mediante il suo profilo trasversale, che viene definito *normal profile* (profilo estivo) o *storm profile* (profilo invernale). La prima tipologia è caratterizzata dalla formazione di una berma emersa nella zona di battigia, la seconda da una barra sommersa nella zona dei frangenti.

Molto spesso, però, la morfodinamica costiera risulta fortemente condizionata anche da eventi di breve durata, come le intense mareggiate che si abbattano sul litorale sia nei periodi invernali che, specialmente negli ultimi 4-5 anni, durante la stagione estiva. A questo proposito, negli ultimi decenni, alcuni autori hanno trattato il tema dell'evoluzione della spiaggia nel breve periodo. In particolare, Kriebel e Dean (1993) hanno messo a punto il cosiddetto "metodo di convoluzione", che si basa sul concetto di profilo di equilibrio di breve periodo. Questo viene determinato a partire dal profilo di equilibrio di lungo periodo (si veda, ad esempio, Dean, 1977). Kriebel e Dean (1993) hanno esteso tale concetto, definendo il profilo di breve periodo come quota parte del profilo di lungo periodo. Il "metodo di convoluzione" permette quindi di trovare la risposta della spiaggia in funzione i) delle caratteristiche granulometriche della spiaggia, ii) della forzante ondosa e iii) della durata dell'evento.

Parallelamente, la tendenza di proteggere le coste soggette a erosione mediante opere di difesa di tipo rigido, ha stimolato lo studio dell'evoluzione della spiaggia nel lungo periodo. Alcuni autori (es. González et al., 1999) hanno sviluppato semplici modelli analitici per la previsione dell'evoluzione della spiaggia in presenza di opere di difesa sommerse infinitamente estese, svincolandosi dalla profondità di chiusura, che definisce, in presenza di spiagge libere, il termine ultimo oltre il quale non c'è più una significativa movimentazione di sedimenti. In tali modelli, il profilo di lungo periodo a tergo di una scogliera sommersa dipende dall'energia dell'onda trasmessa sopra la berma della scogliera stessa, che è quindi funzione delle caratteristiche geometriche dell'opera (Mancinelli et al., 2000).

In Italia gli esempi di scogliere emerse e sommerse poste a difesa dei litorali sono piuttosto comuni. Per quanto riguarda il Mar Adriatico, circa il 60% della costa marchigiana è protetta da opere di difesa, per lo più a gettata di massi naturali. Sin dalla prima metà del '900 sono comparse in Italia le prime scogliere emerse, con l'obiettivo di proteggere dal mare spiagge e infrastrutture. I numerosi disagi provocati da tali opere, quali, ad esempio, l'impatto ambientale, l'erosione della spiaggia sottoflutto, la scarsa circolazione nella zona protetta, hanno però spinto ad una progettazione più meticolosa delle opere, oltre che alla ricerca di una soluzione alternativa. Da qui la diffusione delle scogliere sommerse, che hanno, da una parte, parzialmente mitigato i problemi indotti dalle opere emerse, dall'altra, introdotto criticità ulteriori relativamente alla circolazione che si genera intorno a tali barriere. Infatti, il setup prodotto dal frangimento delle onde sulle scogliere sommerse produce un gradiente di pressione tra la zona protetta ed il largo, che genera una corrente diretta verso il largo (detta "*rip current*") attraverso il varco tra due scogliere contigue (es. Brocchini et al., 2004). Tale corrente mette a rischio la sicurezza dei bagnanti e provoca un forte trasporto di sedimento verso il largo.

Tra il 2008 ed il 2010, nel Laboratorio di Idraulica dell'Università Politecnica delle Marche (Ancona) sono stati effettuati alcuni esperimenti a fondo mobile, descritti in Postacchini et al. (2011), con la finalità di valutare l'efficacia di diverse tipologie di scogliera nella riduzione dell'arretramento della spiaggia, durante un evento di mareggiata. Tale esperienza ha in parte ispirato il presente lavoro. Infatti, seguendo la stessa filosofia, qui si vuole analizzare i) l'influenza della distanza da riva di una coppia di scogliere sommerse impermeabili nella protezione della costa e ii) l'effetto di diverse mareggiate sulla morfodinamica della spiaggia. A tal fine sono state fatte alcune simulazioni numeriche utilizzando un solutore che riproduce l'idro-morfodinamica costiera attraverso le equazioni per le acque basse e l'equazione di conservazione della massa solida. Nelle sezioni successive sono presentati: il modello numerico utilizzato, i test realizzati ed i risultati relativi alle configurazioni riprodotte. Le conclusioni finali chiudono il lavoro.

## Il solutore numerico

Il modello utilizzato per le simulazioni, descritto in Postacchini et al. (2012), descrive l'idrodinamica della zona vicino costa mediante l'uso delle equazioni per le acque basse (*Nonlinear Shallow Water Equations*, in seguito NSW), mentre l'equazione di conservazione della massa solida (*Exner Equation*, in seguito EE) lega l'evoluzione temporale del fondale con la variazione spaziale del flusso di sedimenti.

Le equazioni scritte in forma non conservativa sono:

$$d_{,t} + (ud)_{,x} + (vd)_{,y} = 0 \quad (1)$$

$$u_{,t} + uu_{,x} + vv_{,y} + gd_{,x} = gz_{b,x} - C_\tau \frac{|\mathbf{v}|u}{d} \quad (2)$$

$$v_{,t} + uv_{,x} + vv_{,y} + gd_{,y} = gz_{b,y} - C_\tau \frac{|\mathbf{v}|u}{d} \quad (3)$$

$$z_{b,t} + \frac{1}{\lambda} \nabla \cdot \mathbf{q} = 0 \quad (4)$$

dove  $(x, y, z)$  sono le coordinate cartesiane ( $z=0$  rappresenta il livello della superficie libera, con  $z$  coordinata che punta verso l'alto);  $d(x, y, t) = \eta(x, y, t) + z_b(x, y)$  è la profondità totale dell'acqua, mentre  $\eta$  e  $z_b$  rappresentano, rispettivamente, il livello superficiale istantaneo e la profondità del fondale rispetto al livello iniziale;  $\mathbf{v} = (u, v)$  è il vettore delle velocità mediate lungo la verticale;  $\mathbf{q} = (q_x, q_y)$  è la portata solida;  $C_\tau$  è il coefficiente di Chezy;  $\lambda = 1-p$  rappresenta l'impacchettamento dei grani e  $p$  la porosità della spiaggia.

Le NSW-E includono, quindi, il contributo dell'attrito al fondo ( $C_\tau |\mathbf{v}|/d$ ), scritto secondo la formulazione di Chezy, fondamentale nei processi che si verificano all'interno della *surf zone*. Inoltre, il complesso fenomeno del frangimento è descritto in termini di *bores*, cioè come discontinuità del livello liquido, mediante uno schema di tipo *shock capturing* (per maggiori dettagli, vedi Brocchini et al., 2001).

La morfodinamica è molto difficile da modellare, soprattutto per quanto riguarda le leggi di chiusura necessarie per calcolare la portata solida  $\mathbf{q}$ , che compare nell'EE. Per una maggiore flessibilità sono state implementate nel solutore molteplici formule di trasporto, in modo da poter scegliere, a seconda del tipo di simulazione, quella più adatta. Il codice è quindi di tipo "debolmente accoppiato", ovvero NSW-E e EE vengono risolte separatamente e indipendentemente dalla legge scelta per rappresentare  $\mathbf{q}$ , sebbene l'idrodinamica e la morfodinamica vengano aggiornate ad ogni passo temporale (per maggiori dettagli si veda Postacchini et al., 2012).

Il trasporto solido totale viene valutato come somma del trasporto al fondo ( $\mathbf{q}_b$ ) e di quello in sospensione ( $\mathbf{q}_s$ ). Per il primo dei due contributi è stata implementata la formula di Grass (1981), in cui la portata solida dipende esclusivamente dalla velocità ( $\mathbf{v}$ ) e da una costante ( $A$ ), che è funzione delle caratteristiche dei sedimenti:

$$\mathbf{q}_b = A|\mathbf{v}|^3 \quad (5)$$

Un'altra formulazione deriva da Besio et al. (2003):

$$\mathbf{q}_b = 8 \sqrt{\left(\frac{\rho_s}{\rho} - 1\right)} g d_{50}^3 \left( |\boldsymbol{\theta} - \gamma \nabla z_b| - \theta_{cr} \right)^2 \frac{\boldsymbol{\theta} - \gamma \nabla z_b}{|\boldsymbol{\theta} - \gamma \nabla z_b|} \quad (6)$$

dove  $\rho$  e  $\rho_s$  sono, rispettivamente, la densità dell'acqua e del sedimento,  $d_{50}$  il diametro medio del sedimento,  $\gamma$  il parametro che tiene conto degli effetti stabilizzanti della pendenza del fondale,  $\boldsymbol{\theta}$  il parametro di Shields e  $\theta_{cr}$  il parametro di Shields critico.

Tra le leggi di trasporto solido in sospensione, quella di Camenen e Larson (2008) rappresenta una delle più recenti e complete:

$$\mathbf{q}_s = \mathbf{v} c_R \frac{\varepsilon}{w_s} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{w_s d}{\varepsilon}\right) \right] \quad (7)$$

dove  $w_s$  è la velocità di caduta dei sedimenti,  $\varepsilon$  la diffusività del sedimento e  $c_R$  la concentrazione di riferimento al fondo, che dipende a sua volta dalla tensione tangenziale e dalle caratteristiche del sedimento.

Il modello numerico NSWEE/EE è stato validato con numerosi test analitici, numerici e di laboratorio. Alcuni, descritti in Postacchini e Brocchini (2012), hanno rivelato come il solutore sia in grado di ben rappresentare l'idro-morfodinamica che si genera sia in una spiaggia libera da ostacoli, sia in presenza di un'opera sommersa. I risultati numerici dei profili di spiaggia riprendono molto bene i dati sperimentali sia in prossimità dell'opera di difesa che nella zona di *wash*.

### Set-up numerico

Le simulazioni numeriche sono state parzialmente ispirate dagli esperimenti di laboratorio descritti in Postacchini et al. (2011), il cui obiettivo era quello di valutare l'effetto, sull'erosione della spiaggia, sia della geometria che della posizione di un'opera a gettata. Infatti, nel presente studio, tali simulazioni sono state realizzate con lo scopo di verificare l'effetto, nella morfodinamica costiera, della posizione di una coppia di scogliere contigue soggette a mareggiata.

A tale scopo, è stato necessario definire la batimetria della spiaggia e la forzante ondosa. Relativamente alla geometria dei test (vedi Fig. 1), è stata scelta una spiaggia piana con pendenza 1:60 ed un dominio di calcolo di 330m in direzione trasversale ( $x$ ) e 200m in direzione longitudinale ( $y$ ), con una profondità al largo di 4m. Le due scogliere, ciascuna caratterizzata da una berma di sommità lunga  $L_s=70$ m e larga  $B_s=10$ m, sono separate da un varco di ampiezza pari a  $L_v=30$ m. La sommergenza delle scogliere è pari a 50cm. Inoltre, le pendenze dei paramenti della scogliera sono pari a 2:5 lato mare e 2:3 lato riva. Le configurazioni provate sono riassunte in Tabella 1, ciascuna caratterizzata dalla posizione delle scogliere sia rispetto alla riva ( $X_{riva}$ ), sia rispetto al contorno lato mare ( $X_{off}$ ).

Tabella 1 - Caratteristiche delle simulazioni numeriche.

Test	$X_{riva}$ (m)	$X_{off}$ (m)
1	180	60
2	170	70
3	160	80
4	150	90
5	140	100
6	130	110
7	120	120
8	110	130
9	100	140
10	90	150

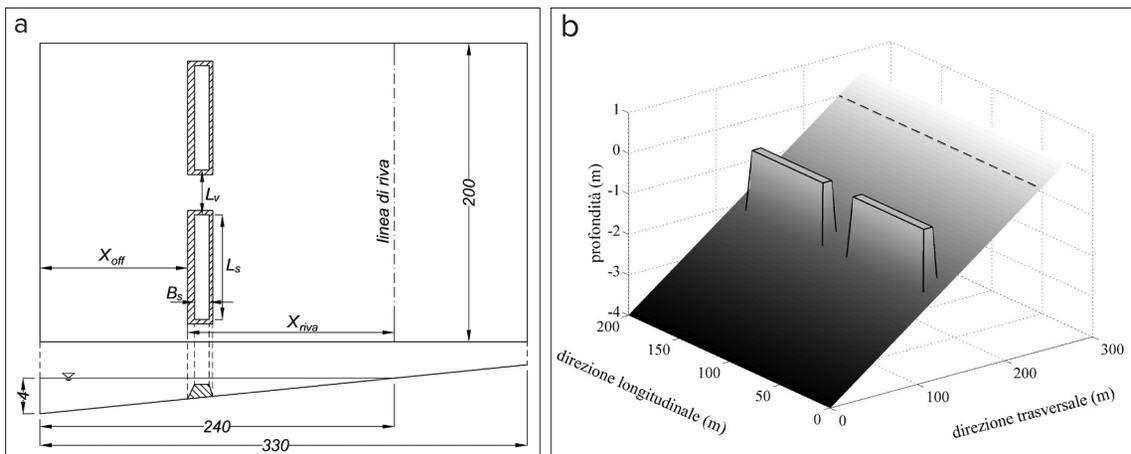


Figura 1 - Schema del dominio di calcolo usato per le simulazioni: vista dall'alto (a1), in sezione (a2) e rappresentazione 3D della batimetria iniziale (b).

La condizione al contorno delle simulazioni, ovvero la forzante ondosa imposta al bordo a mare del dominio ( $x=0$ ), è stato ricavato mediante i dati raccolti dalla boa ondometrica RON posizionata al largo di Falconara Marittima (AN). In particolare, sono state prese in esame tre diverse mareggiate registrate nel Novembre 1999, nel Novembre 2002 e nel Settembre 2004. Dal picco di ciascuna mareggiata sono stati ricavati l'altezza significativa al largo ( $H_{s0}$ ) ed il periodo di picco ( $T_p$ ). Lo spettro JONSWAP, relativo a tali caratteristiche, è stato trasferito dal largo fino alla profondità di 4m mediante il metodo AFS di Scarsi (1995). Successiva-

mente, dallo spettro ottenuto è stata estratta la serie temporale del livello superficiale, poi utilizzata come condizione al contorno per le simulazioni numeriche. La variazione della morfologia della spiaggia, in funzione delle tre diverse mareggiate provate, le cui caratteristiche a 4m di profondità sono illustrate in Tabella 2, è stata analizzata esclusivamente per la configurazione 7. Tra tutte le configurazioni provate, invece, è stato fatto un confronto tra le morfologie finali ottenute in seguito alla mareggiata del Novembre 1999.

**Tabella 2 - Caratteristiche delle mareggiate provate.**

Mareggiata	Novembre 1999	Novembre 2002	Settembre 2004
$H_s$ (m)	2.23	2.20	2.13
$T_p$ (s) 2	7.89	9.18	8.63

Relativamente al trasporto di sedimenti, è stata scelta la relazione (6) per il trasporto al fondo (Besio et al., 2003) e la (7) per il trasporto in sospensione (Camenen e Larson, 2008). I parametri utilizzati sono:  $\lambda=0.6$ ,  $\rho_s=2500 \text{ Kg/m}^3$ ,  $d_{50}=1.5\text{mm}$ ,  $\gamma=0.1$ .

**Risultati**

Le simulazioni effettuate mediante il solutore numerico idro-morfodinamico hanno permesso di fare un primo confronto tra gli effetti indotti dalle tre diverse mareggiate in esame (Tab. 2), sempre considerando che, dopo il trasferimento ondoso a 4m di profondità, la differenza tra gli spettri ottenuti risiede quasi esclusivamente nel periodo di picco  $T_p$ , che è sempre maggiore nel caso di mareggiate da levante-sirocco, come quella del Novembre 2002.

Inoltre, è stata analizzata l'evoluzione del fondale ottenuta per le diverse posizioni delle opere sommerse (vedi Tab. 1), mettendo a confronto i profili di spiaggia in corrispondenza sia della sezione centrale delle scogliere, sia del varco tra esse.

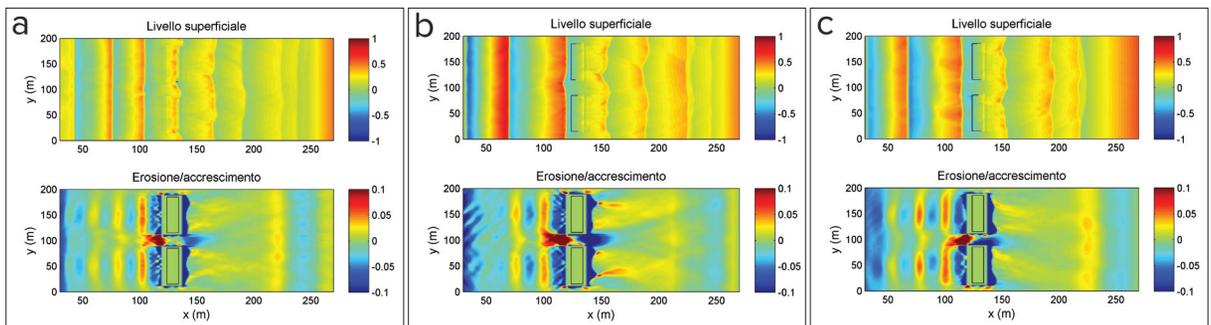
**Influenza delle caratteristiche della mareggiata**

Le tre mareggiate testate (vedi Tab. 2) danno risultati molto simili in termini di variazione del profilo di spiaggia, come si vede nei pannelli inferiori di Figura 2. Infatti, nonostante i periodi di picco ( $T_p$ ) siano abbastanza diversi tra loro, le altezze significative sono molto simili, ovvero  $H_s=(2.13-2.23)\text{m}$ .

Si nota una certa somiglianza tra i pattern di erosione/accrescimento. In prossimità della linea di riva indisturbata ( $x=240\text{m}$ ) è evidente la tendenza all'erosione e quindi all'arretramento della spiaggia. Tale comportamento è ben più visibile nel caso della mareggiata del Novembre 2002, la quale, essendo caratterizzata da un maggiore periodo di picco, interessa una parte della *swash zone*, e di conseguenza una regione di erosione, più estesa.

La stessa filosofia riguarda tutta la fascia che circonda le opere sommerse, caratterizzata da scavi localizzati, in particolare nelle zone lato terra e lato mare, dove l'erosione è ben più evidente: anche in questo caso la mareggiata del Novembre 2002 genera una zona di erosione più estesa.

La parte della spiaggia compresa tra  $x=0$  e  $x=120\text{m}$  risente della riflessione ondosa dovuta alla presenza delle opere, che genera pattern di erosione ed accrescimento in funzione della lunghezza dell'onda (e quindi del periodo di picco). Le barre sommerse che si formano (in rosso nei pannelli inferiori di Fig. 2) sono parallele



**Figura 2 - Livello liquido superficiale (sopra) e pattern di erosione/accrescimento (sotto) indotti dalle mareggiate del Novembre 1999 (a), Novembre 2002 (b), Settembre 2004 (c).**

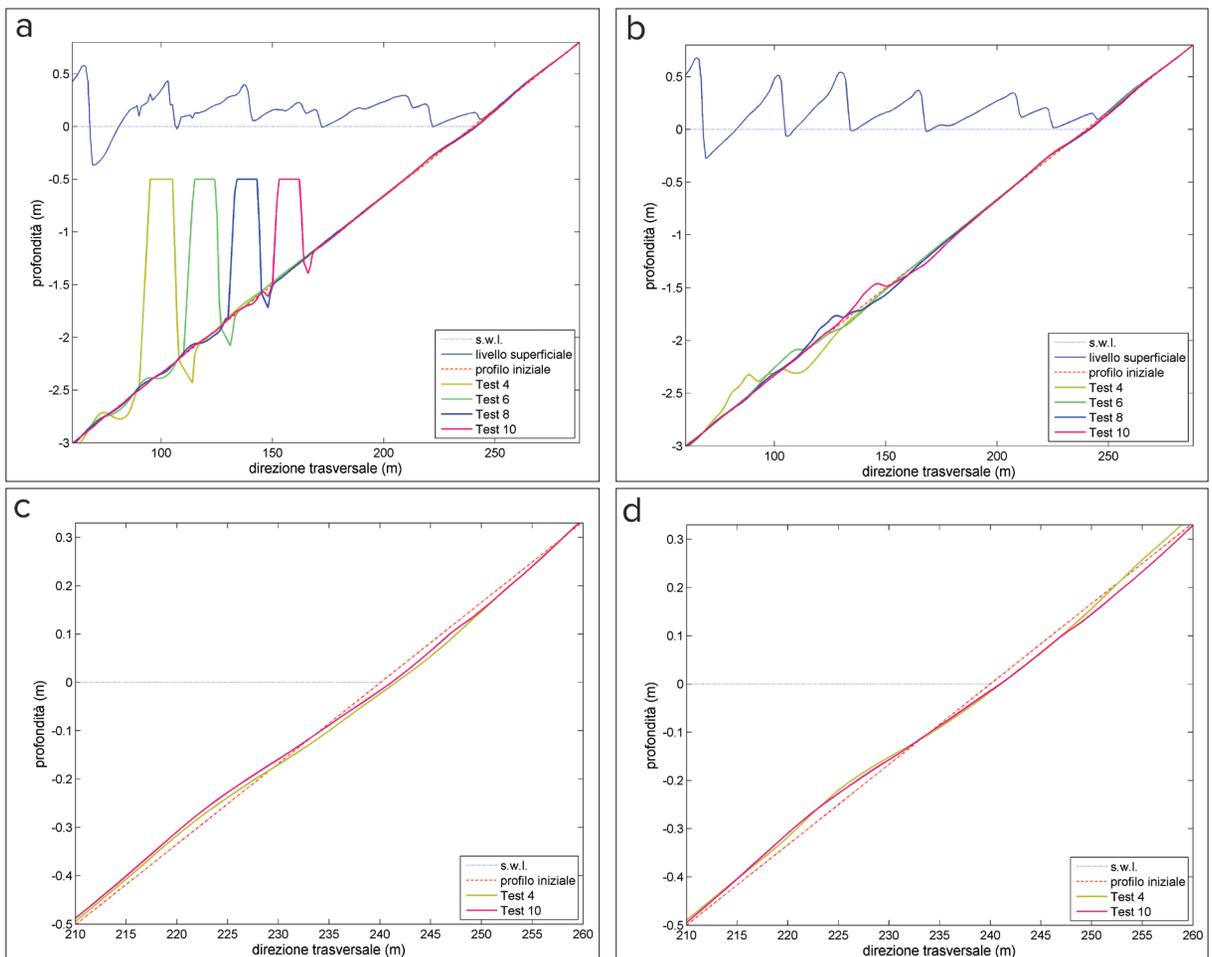
alle scogliere e si interrompono in corrispondenza del varco, dove l'idro-morfodinamica risulta piuttosto diversa. All'aumentare del periodo di picco, la distanza reciproca tra le barre aumenta.

Per quanto riguarda il varco tra le due scogliere, in ciascuna mappa si nota la generazione di una buca piuttosto evidente per  $x > 130\text{m}$  (in blu) e un altrettanto evidente accumulo per  $x < 130\text{m}$  (in rosso). Ciò evidenzia l'intenso flusso di ritorno che si muove dalla zona protetta verso il largo, generando una notevole erosione, ed un intenso flusso entrante determinato dalle onde che sopraggiungono. L'interazione tra i due flussi all'interno del varco provoca l'accumulo di sabbia nella porzione più esterna del varco stesso, che si estende per circa 30m, fino a  $x \approx 100\text{m}$ . Anche in questo caso, un periodo di picco maggiore è correlato ad un maggior accumulo di materiale.

In conclusione, tutti i pattern di erosione/accrescimento che si generano nella spiaggia sono più intensi quando il forzante esterno è una mareggiata caratterizzata da un elevato periodo di picco ( $T_p = 9.18\text{s}$ ) e meno evidenti quando il periodo di picco si riduce ( $T_p = 7.89\text{s}$ ).

### *Influenza della posizione delle scogliere*

In questa sezione verranno discussi gli effetti della posizione delle scogliere sommerse all'interno del dominio utilizzato per le simulazioni numeriche. In particolare, sono stati confrontati i profili di spiaggia ottenuti in corrispondenza delle sezioni trasversali poste a  $y = 50\text{m}$  (a metà della prima scogliera),  $y = 100\text{m}$  (in corrispondenza del varco) e  $y = 150\text{m}$  (a metà della seconda scogliera). I risultati relativi alle sezioni poste in corri-



**Figura 3** – Profili di spiaggia generati dalla mareggiata del Novembre 1999, dopo 8000s, in corrispondenza delle sezioni trasversali poste a  $y = 50\text{m}$  (a,c) e  $y = 100\text{m}$  (b,d); la distanza da riva delle opere è pari a 150m (giallo), 130m (verde), 110m (blu), 90m (magenta).

spondenza delle scogliere sono piuttosto simili a causa della simmetria del problema, perciò di seguito sono presentati i profili finali ottenuti in corrispondenza della prima scogliera (Fig. 3a,c) e del varco (Fig. 3b,d). In particolare, nella Figura 3 sono rappresentati i profili di spiaggia di alcuni dei test numerici, ottenuti dopo circa 2h15' (precisamente 8000s, corrispondente al tempo necessario affinché l'altezza significativa spettrale coincida con l'altezza significativa che si vuole riprodurre:  $H_{m0} = H_s = 2.23\text{m}$ ) per effetto della mareggiata del Novembre 1999, ovvero quella caratterizzata dalla maggiore energia spettrale. Il livello dell'acqua in quiete è rappresentato dalla linea tratteggiata blu, mentre il profilo iniziale della spiaggia è dato dalla linea tratto-punto rossa. I test scelti come rappresentativi sono quelli caratterizzati da una distanza delle scogliere dalla riva pari a 150m (Test 4, giallo), 130m (Test 6, verde), 110m (Test 8, blu) e 90m (Test 10, magenta). Quello che si evince dal confronto di Figura 3 – Profili di spiaggia generati dalla mareggiata del Novembre 1999, dopo 8000s, in corrispondenza delle sezioni trasversali poste a  $y=50\text{m}$  (a,c) e  $y=100\text{m}$  (b,d); la distanza da riva delle opere è pari a 150m (giallo), 130m (verde), 110m (blu), 90m (magenta). Si è che le scogliere più vicine a riva producono una minore movimentazione dei sedimenti. Infatti, relativamente alla parte protetta della spiaggia, lo scavo ai piedi dell'opera è molto maggiore nel Test 4 che nel Test 10, ovvero circa il doppio. Allo stesso modo, nella zona lato mare rispetto alle opere, la variazione del profilo di spiaggia è molto evidente in caso di opere poste lontano dalla riva: il fondale assume, infatti, una conformazione sinusoidale, con pattern di erosione/accrescimento marcati a causa della riflessione di onde piuttosto alte che, nella maggior parte dei casi, non arrivano sulla scogliera in condizione di frangimento. Più le opere vengono sistemate vicino a riva, minore sarà l'intensità delle onde frangenti sulle scogliere e, di conseguenza, la loro influenza sulla morfologia della spiaggia.

Dalla Figura 3 – Profili di spiaggia generati dalla mareggiata del Novembre 1999, dopo 8000s, in corrispondenza delle sezioni trasversali poste a  $y=50\text{m}$  (a,c) e  $y=100\text{m}$  (b,d); la distanza da riva delle opere è pari a 150m (giallo), 130m (verde), 110m (blu), 90m (magenta). Si nota come la movimentazione dei sedimenti in corrispondenza del varco non cambi molto tra i test effettuati, sebbene ci sia una traslazione verso riva del pattern di erosione/accrescimento, muovendosi dal Test 4 al Test 10. Il Test 4 provoca, inoltre, un'erosione molto più evidente rispetto a tutti gli altri test ( $x \approx 100\text{m}$ ).

In ciascuna delle due sezioni trasversali, la variazione del fondale in prossimità della riva risulta essere molto ridotta, con una tendenza all'accrescimento nella zona sommersa ( $d \approx -0.25\text{m}$ ) e all'erosione nella parte emersa ( $d \approx 0.1\text{m}$ ). Infatti, come si nota dagli ingrandimenti delle due sezioni analizzate (Fig. 3c e Fig. 3d), non c'è una grande differenza nella morfologia che si ottiene alla fine del test, in prossimità della battigia, se la distanza delle opere dalla riva è di 90m (magenta) piuttosto che di 150m (giallo). L'ordine di grandezza della variazione del fondale è lo stesso per quanto riguarda sia l'accrescimento nella parte sommersa, sia l'erosione nella parte emersa, in corrispondenza sia della scogliera (Fig. 3c), sia del varco (Fig. 3d). Infatti, in ogni caso non si va oltre i (2-3)cm di accrescimento o erosione. L'arretramento della linea di costa è invece sempre pari a circa 1m. Si nota qualche differenza relativamente alla conformazione del fondale nella parte emersa della sezione centrale (Fig. 3d,  $x > 248\text{m}$ ), dove la maggior prossimità a terra delle scogliere induce un'erosione più accentuata. In sintesi, ciascuno dei test numerici genera un'importante variazione del fondale, soprattutto in prossimità delle scogliere sommerse. I punti più rilevanti che sono stati evidenziati sono: i) l'aumento dello scavo, lato terra delle opere, all'aumentare della distanza da riva, ii) pattern di erosione/accrescimento, che si generano lato mare, più evidenti all'aumentare della distanza da riva, iii) la tendenza alla formazione di una barra sommersa nella zona di *swash*, iv) l'arretramento della linea di riva pressoché costante al variare della distanza da riva delle scogliere.

## Conclusioni

Nel presente lavoro sono stati illustrati i risultati di alcune simulazioni numeriche effettuate mediante un solutore numerico idro-morfodinamico basato sulle equazioni delle acque basse (NSWE) e sull'equazione di Exner. Tali simulazioni sono state realizzate con lo scopo di capire quale sia l'influenza della distanza tra un'opera di difesa e la riva sulla morfodinamica che caratterizza una spiaggia piana (pendenza 1:60). A questo scopo sono state utilizzate due opere rigide sommerse posizionate, di volta in volta, ad una distanza variabile tra 90m e 180m dalla linea di riva in quiete.

Alcune mareggiate, realmente registrate nel Mar Adriatico e trasferite dal largo fino ad una profondità di 4m, sono state utilizzate come forzanti ondosi per le simulazioni. Tali mareggiate hanno fornito risultati, in

termini di variazione del fondale, confrontabili tra loro.

Per quanto riguarda, invece, gli effetti sulla morfodinamica della posizione delle opere rigide, i pattern di erosione/accrescimento, che si generano a terra e a mare delle opere stesse, sono tanto più evidenti quanto maggiore è la distanza da riva delle strutture. La morfodinamica che si instaura all'interno del varco tra le opere consiste in un accumulo di materiale nella parte *offshore* e in uno scavo nella parte *inshore*. Tale conformazione del fondale è tanto più marcata quanto più distanti sono le opere dalla riva. Al contrario, la zona di battigia sembra non risentire quasi per niente della posizione delle scogliere: infatti, la duna che si genera nella parte sommersa e l'arretramento della linea di costa sembrano avere la stessa entità al variare della distanza da riva delle opere.

### Ringraziamenti

L'autore desidera ringraziare il Prof. A. Mancinelli, il Prof. M. Brocchini ed il Dott. C. Lorenzoni per gli utili suggerimenti e consigli che hanno permesso di sviluppare il presente lavoro.

### Bibliografia

- Brocchini M., Bernetti R., Mancinelli A., Albertini G. (2001) - *An efficient solver for nearshore flows based on the WAF method*. *Coast. Engng.*, 43: 105-129.
- Brocchini M., Kennedy A.B., Soldini L., Mancinelli A. (2004) - *Topographically-controlled, breaking wave-induced macrovortices. Part 1. Widely separated breakwaters*. *J. Fluid Mech.* 507: 289-307.
- Camenen B., Larson M. (2008) - *A general formula for noncohesive suspended sediment transport*. *J. Coast. Res.*, 24(3) : 615-627.
- Dean R. G. (1977) - *Equilibrium beach profiles: US Atlantic and Gulf Coasts*. Ocean Engineering Technical Report n. 12, Department of Civil Engineering and College of Marine Studies, University of Delaware, Newark, DE, USA.
- González M., Medina R., Losada M.A. (1999) - *Equilibrium beach profile model for perched beaches*. *Coast. Engng.*, 36: 343-357.
- Grass A.J. (1981) - *Sediment transport by waves and currents*. SERC London Cent. Mar. Technol., Report FL29.
- Kraus N.C. (1992) - *Engineering approaches to cross-shore sediment transport processes*. Proc. Short Course of the 23<sup>rd</sup> Int. Conf. on Coast. Engng., ASCE: 175-209.
- Kriebel D.L., Dean R.G. (1993) - *Convolution method for time-dependent beach-profile response*. *J. Waterw. Port Coast. Ocean Engng.*, 119 (2): 204-227.
- Mancinelli A., Lorenzoni C., Soldini L. (2000) - *Evoluzione dei profili di spiaggia in presenza di barre o barriere artificiali sommerse*. Atti del XXVII° Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Genova, IV: 277-285.
- Postacchini M., Brocchini M. (2012) - *A hydro-morphodynamic model for the nearshore region: resolution of the Exner equation*. Proc. 22<sup>nd</sup> Intern. Offshore and Polar Engng. Conf., Rodi, Grecia.
- Postacchini M., Brocchini M., Corvaro S., Lorenzoni C., Mancinelli A. (2011) - *Comparative analysis of sea wave dissipation induced by three flow mechanisms*. *J. Hydr. Res.*, 49(4): 554-561
- Postacchini M., Brocchini M., Mancinelli A., Landon M. (2012) - *A multi-purpose, intra-wave, shallow water hydro-morphodynamic solver*. *Adv. Water Resour.*, 38: 13-26.
- Scarsi G. (1995) - *Caratteristiche meteomarine: trasformazione sottocosta degli eventi di moto ondoso*. Atti delle Giornate Italiane di Ingegneria Costiera, AIPCN-PIANC, Ravenna, 12-14/10/1995.