

Evoluzione progettuale delle opere di difesa costiera

Alessandro Mancinelli, Sara Corvaro, Carlo Lorenzoni

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura (DICEA) – Università Politecnica delle Marche, via Brecce Bianche, 60131 Ancona (AN), E-mail: a.mancinelli@univpm.it; s.corvaro@univpm.it; c.lorenzoni@univpm.it

Riassunto

Le opere di difesa della costa hanno come scopo principale la protezione dei litorali dall'azione del moto ondoso. La memoria esamina l'evoluzione delle strutture foranee di difesa analizzando quelle che sono state le criticità dei sistemi adottati, con particolare attenzione alle opere di difesa applicate nella costa adriatica. La maggior parte delle strutture foranee dissipa l'energia prevalentemente attraverso il frangimento ondoso il quale innesca, soprattutto nelle opere sommerse, un sistema di circolazione idrodinamica responsabile dell'erosione nelle testate e nei varchi e della formazione di correnti di *rip* molto intense. Per tutte le opere analizzate un'altra criticità è costituita dalla sopraelevazione del livello medio marino durante eventi estremi. In seguito a tali problematiche, lo sviluppo e l'evoluzione delle opere costiere ha portato a ricercare sistemi di protezione costiera capaci di abbattere l'energia del moto ondoso attraverso altri meccanismi, come l'elevata scabrezza o la permeabilità del fondo. Specifiche prove di laboratorio sono state eseguite con lo scopo di studiare il comportamento e l'idrodinamica indotta da tali sistemi di dissipazione graduale del moto ondoso. Le variazioni climatiche nel lungo e breve periodo potrebbero mettere in crisi le numerose opere marittime esistenti, la memoria riporta alcuni cambiamenti registrati nel clima meteomarinico dell'Adriatico nell'ultimo decennio.

Parole chiave: protezione costiera, dissipazione, permeabilità, scabrezza, variazioni climatiche

Abstract

Maritime protection works have been applied as main protection system of beaches and coasts. The work focus on the evolution of maritime structures by analyzing the criticism with particular attention on the coastal works used on the Adriatic coast. The majority of defences produce wave dissipation through the breaking phenomena which induces an hydrodynamic circulation responsible of the erosion and the formation of intense rip currents in the gaps. Another problem is the sea-level rise during storm events. As a result of these problems, the development and the evolution of coastal works has led to seek dissipating wave energy systems that do not involve the use of wave breaking phenomenon but other dissipation mechanism: high roughness and high permeability of the seabed. Specific laboratory tests were carried out on these dissipative systems with the aim of studying the hydrodynamics. Climate change could affect the efficiency of the maritime structures; in the present paper some results about the variation of the sea-level and of the significant wave height observed in the last decades on Adriatic Sea have been reported.

Key words: coastal protection, wave damping, permeability, roughness, climate change

Introduzione

Nel corso del secolo scorso, tra le opere di protezione costiera, hanno avuto un importante sviluppo quelle longitudinali emergenti, grazie al notevole grado protettivo offerto con opere relativamente semplici da

progettare e da porre in opera. Ciò ne ha decretato il grande successo e la conseguente notevole diffusione lungo molti litorali, con la disposizione di lunghissime estensioni di setti contigui di barriera in successione, specialmente nei tratti di spiagge basse e costituite da sedimenti sottili (sabbiose soprattutto). Tali opere, però hanno mostrato notevoli effetti negativi, tra cui la facile formazione di tomboli o salienti molto protesi in mare, la ridotta qualità dell'acqua e dei sedimenti depositati nella zona protetta, con conseguenti problemi di balneazione nelle spiagge, la formazione di profondi canali di erosione attraverso i varchi fra le barriere multiple disposte in posizione contigua, infine il grave effetto dell'erosione nei litorali limitrofi e sottoflutto alle opere realizzate. Tali problematiche hanno spinto la ricerca e la sperimentazione verso opere che riducessero gli inconvenienti evidenziati dalle barriere foranee emerse.

La memoria presenta alcune soluzioni alternative alle scogliere emerse largamente utilizzate nella protezione dei litoranei ed i risultati di ricerche effettuate sull'idrodinamica dei fondali porosi che potrebbero supportare la progettazione di nuove opere di difesa dei litorali. Tutte le opere, tradizionali ed alternative dovranno comunque rispondere a condizioni ambientali che stanno cambiando, sia nel breve che nel lungo periodo, la memoria analizza le variazioni del clima ondoso rilevate alla boa ondometrica della rete R.O.N. al largo di Ancona in due finestre temporali successive.

Opere foranee di difesa dei litorali

Le opere di difesa dei litorali sono realizzate con lo scopo principale di ridurre l'energia del moto ondoso incidente attraverso la dissipazione per frangimento. Si riducono così sia l'energia nella zona di *swash* sia i valori estremi del *run-up* che rappresenta la componente critica dell'inondazione della spiaggia emersa e quindi dell'erosione delle dune e dei danni alle infrastrutture balneari. Le numerose prove sperimentali hanno dimostrato che la dissipazione di energia dipende, per le barriere foranee emerse, dalla quota di sommità della struttura (sommersione), dalla larghezza dei varchi attraverso cui le onde si propagano per diffrazione e dalla permeabilità della struttura.

L'overtopping, funzione della sommersione e delle caratteristiche del moto ondoso (altezza e periodo dell'onda incidente), attiva le correnti di circolazione nell'area protetta dalle scogliere emerse con correnti di ritorno dirette verso il largo attraverso i varchi. L'effetto combinato della diffrazione e dell'*overtopping* determinano la formazione di salienti o tomboli in funzione della lunghezza dei setti di scogliera, delle larghezze dei varchi, della distanza da riva della barriera e della granulometria dei sedimenti. La formazione del tombolo riduce la qualità ambientale della spiaggia protetta perché favorisce il deposito delle frazioni fini dei sedimenti, lo specchio d'acqua rimane confinato in prossimità dei varchi dove si trovano subito profondità elevate rendendo pericolosa la balneazione. La pendenza della mantellata e la permeabilità determinano inoltre la riflessione delle onde verso mare e quindi l'approfondimento dei fondali al largo delle barriere emerse. In molte situazioni reali le scogliere emerse sostengono la spiaggia emersa diventando dei piccoli *reef*, le alte profondità lato mare rendono difficoltosi gli interventi di risanamento anche ambientale delle aree protette. La progettazione di un nuovo sistema di difesa con scogliere foranee emerse richiederebbe un'analisi dettagliata dei fattori sopra richiamati per evitare la formazione del tombolo e mantenere quindi una circolazione idrica efficiente. L'inconveniente più grave delle opere foranee rimane comunque lo spostamento dell'erosione sottoflutto prodotto ancora dalla diffrazione e dal gradiente di portata solida dovuto al deposito dei sedimenti nella zona protetta. L'erosione sottoflutto prodotta dai numerosi porti canali o foci fluviali armate presenti sulla costa (le cause dell'erosione sono molteplici e ben descritte nei piani di difesa e di gestione della costa dell'Emilia Romagna delle Marche e dell'Abruzzo) è stata contenuta all'inizio con pochi setti di scogliere emerse che sono diventate nel corso del '900 oltre 150 km sulle regioni Adriatiche: si insegue l'erosione sottoflutto con la costruzione di nuovi setti (es. a nord del porto di Rimini, di Fano, di Senigallia, di Pescara, ecc.).

Con tale sviluppo, la ricerca in ambito costiero ha affrontato le criticità riscontrate nell'applicazione delle scogliere foranee emerse attraverso due approcci principali. Nel primo approccio si sperimentano strutture prefabbricate in c.a. di diversa forma e caratteristiche, ma con lo scopo principale di sopperire all'esaurirsi delle cave di prestito dei massi naturali e di aumentare la permeabilità della struttura. Quest'ultimo aspetto, favorendo una migliore circolazione idrodinamica, dovrebbe evitare il deposito dei limi e permettere il passaggio delle sabbie (le sperimentazioni sono effettuate su litorali sabbiosi). Strutture in c.a. di tipo permeabile sono state realizzate lungo i litorali marchigiani: le barriere in elementi prefabbricati incrociati realizzate dall'ente Ferrovie dello Stato nel litorale di Fontespina di Civitanova Marche (MC) negli anni '60-'70 (Fig. 1a) e le barriere

“Ferran”, in elementi prefabbricati composti da pali verticali infissi e stelle a tre punte in superficie (Cipriani et al., 1984), realizzati in due distinti interventi nella spiaggia di Porto Recanati (MC) negli anni '80 (Fig. 1b). I due interventi con le barriere “Ferran” sono ancora funzionanti, i dissesti che alcuni pali hanno subito sono dovuti all'insufficiente sezione resistente ed alla limitata lunghezza di infissione dei pali.

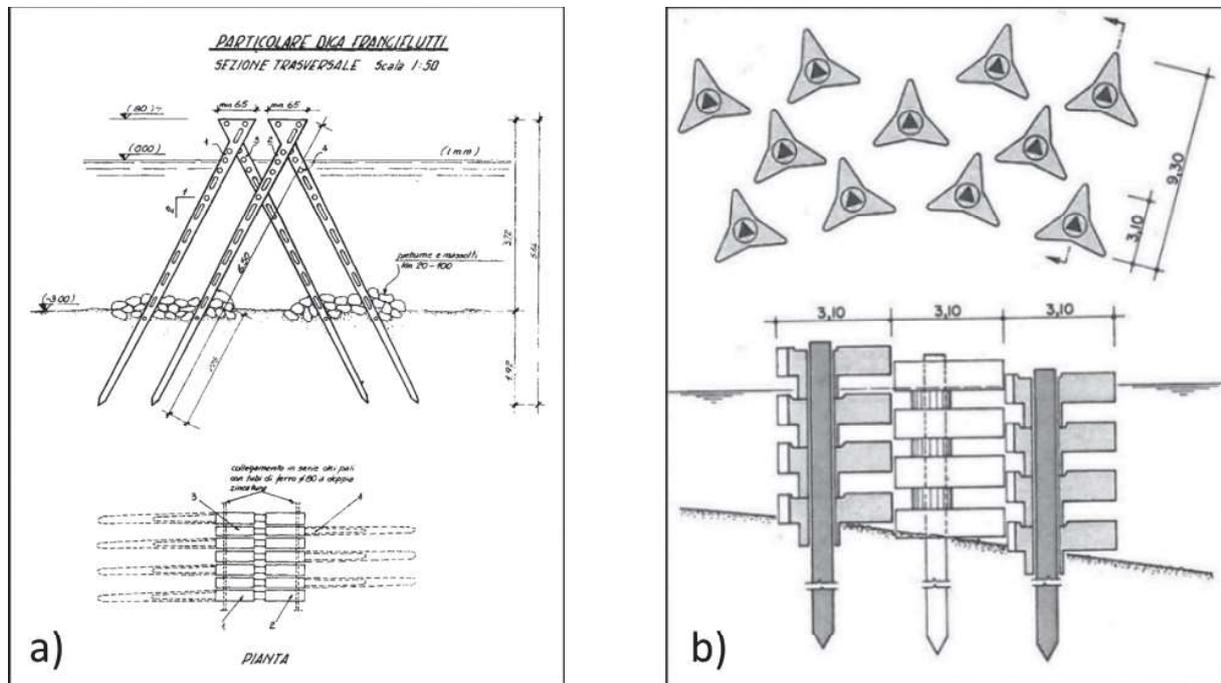


Figura 1. Schemi di pianta e sezione di: a) barriera permeabile in elementi prefabbricati realizzata sull'arenile di Fontespina di Civitanova Marche (MC); b) barriere c.d. Ferran realizzate sul litorale di Porto Recanati (MC)

L'altro approccio, molto più importante per le numerose applicazioni, sperimentazioni, studi e progetti di ricerca effettuati, è quello dell'introduzione delle barriere foranee sommerse, la cui quota di sommità viene portata sotto il livello medio del mare. In genere, si tratta ancora di scogliere (vedi Fig. 2a). Lo scopo è quello di dissipare solo l'energia delle onde più alte attraverso il frangimento sulla berma e la mantellata mantenendo quindi una circolazione idrodinamica più attiva con le onde non frangenti. Le prime applicazioni, con larghezza della berma insufficiente, evidenziano forti erosioni lato terra delle strutture, il frangente prodotto sopra la berma defluisce a cascata nella parte interna con formazioni di grandi fosse di erosione. La larghezza della berma pari a 3 m nelle prime opere viene portata a 10÷14 m nelle successive realizzazioni riducendo significativamente il problema. Grandi erosioni si evidenziano nei varchi e nelle testate, non si formano tomboli ma l'effetto sottoflutto è comunque presente anche se più attenuato rispetto alle barriere foranee emerse.

Le numerose sperimentazioni effettuate nei laboratori marittimi in Italia ed all'estero contribuiscono a chiarire il funzionamento delle barriere emerse e sommerse (*Low-Crested Structures*) come riassunto da Burcharth *et al.* (2007). Le prime sperimentazioni sulle barriere sommerse si concentrano sulla fisica delle onde e sulla modifica degli spettri delle onde incidenti, l'energia dello spettro incidente viene trasferita per effetto della barriera alle alte frequenze (Liberatore e Petti, 1992), il fenomeno è più evidente per le onde lunghe, la barriera riduce il periodo delle onde trasmesse, non è chiaro il ruolo giocato dalla permeabilità delle strutture. Successivamente le sperimentazioni su canale si concentrano sulla determinazione del coefficiente di trasmissione e sul *piling up* (Ruol *et al.*, 2004) che risulta fondamentale per capire la circolazione idrodinamica prodotta da una serie di barriere sommerse foranee. Il complesso sistema delle due circolazioni idriche, primaria e secondaria con la formazione di forti correnti di *rip* attraverso i varchi, viene individuato e chiarito, come schematizzato nella Fig. 2b e approfondito in Lorenzoni *et al.* (2005).

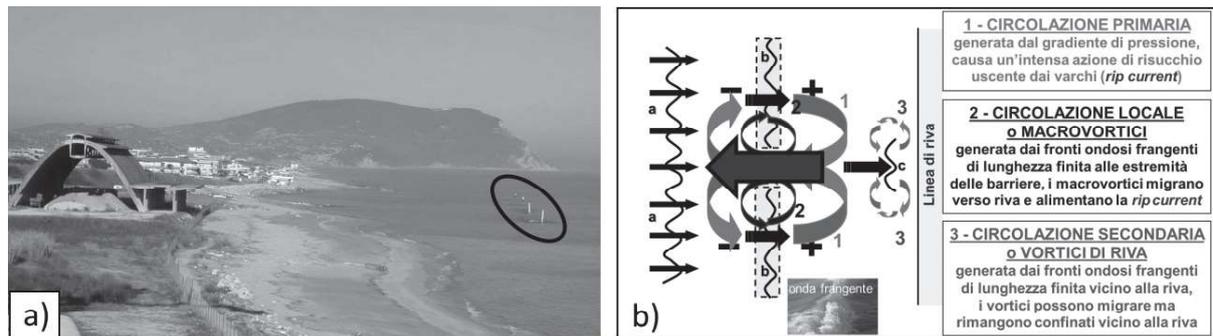


Figura 2. Litorale di Scossicci di Porto Recanati con indicata la scogliera sommersa realizzata a partire dalla primavera del 1983, con i pali di segnalazione in sostituzione degli originali isolotti in scogli (a); circolazione idrodinamica con barriere sommersive in batteria (b), schema modificato da Haller et al. (1997)

La sopraelevazione del livello medio mare nella zona protetta lato costa alle barriere dipende dall'altezza e dal periodo dell'onda incidente, dalla sommergenza, dalla profondità dell'acqua, dalla larghezza della berma e dal diametro medio dei massi che formano la struttura. Le correnti di *rip* attraverso i varchi sono molto pericolose per i bagnanti, in tratti di costa difesi da scogliere sommersive si sono verificati anche alcuni incidenti mortali in occasione di mareggiate intense. Le forti erosioni verificatesi in molti casi, in corrispondenza delle testate, viene correlata alla formazione di vorticità prodotta dalla differenza di frangimento alle estremità della scogliera. La vorticità a grande scala prodotta dal frangimento intensifica la circolazione idrodinamica dietro le barriere. Il fattore che comunque riduce maggiormente l'efficacia di un sistema di difesa con barriere foranee sommersive è la sopraelevazione del livello marino (*storm surge*) che si verifica in occasione di particolari mareggiate. Nell'Adriatico i massimi valori di *storm surge* si verificano per mareggiate provenienti da est-sudest, manifestandosi con dislivelli dell'ordine di 0.80÷1.30m. Aumentando la sommergenza, aumenta l'energia ondosa trasmessa verso la spiaggia. Il coefficiente di trasmissione K_t (rapporto tra altezze dell'onda incidente e di quella trasmessa) dipende infatti dalla sommergenza, dall'altezza e dal periodo dell'onda incidente, dalla larghezza della berma, dal diametro dei massi e dalla profondità a cui è posta la struttura (Van der Meer *et al.* 2005; Buccino e Calabrese, 2007; Cappietti *et al.*, 2009). La combinazione di scarsa protezione a cui risulta soggetta la spiaggia durante le mareggiate più intense (la frequenza dei fenomeni di *storm surge* sembra aumentata in frequenza e altezza) e di effetti negativi prodotti dalla circolazione idrodinamica (erosioni localizzate nelle testate e nei varchi, trasmissione elevata con *storm surge*, ecc.) non è stata in grado di assicurare risultati sempre positivi nelle applicazioni delle strutture sommersive nella difesa dei litorali. Le maggiori criticità si sono avute quando le barriere sommersive sono state realizzate abbassando alcune scogliere emerse preesistenti: il comportamento idrodinamico delle due tipologie, emerse e sommersive, è molto diverso e quindi la progettazione richiederebbe distanza dalla riva e larghezza dei varchi diverse nei due casi.

Soluzioni non tradizionali o soluzioni alternative di protezione

Le criticità di tipo ambientale dovute sia alle difese con scogliere foranee emerse (bassa qualità di acqua e sedimenti nella zona protetta, spostamento sottoflutto dell'erosione, ecc.) e sia nella difesa con opere sommersive (erosioni localizzate, forti correnti di *rip*, debole dissipazione dell'energia ondosa con *storm surge*) hanno indirizzato la ricerca verso soluzioni alternative. Si può pensare di adottare sistemi di protezione costiera alternativi che lavorino su altri fenomeni dissipativi diversi da quello del frangimento ondoso (Postacchini *et al.*, 2011).

Tra le soluzioni per il sistema di difesa del litorale, vi sono quelle che ipotizzano una dissipazione graduale dell'energia ondosa in sostituzione del frangimento repentino sulle opere, al fine di evitare il fenomeno del *piling up* ed attivare una circolazione idrodinamica con le correnti dirette verso riva.

Le particolari barriere longitudinali foranee sommersive costituite da lame rigide verticali o inclinate verso il largo, come proposto da Nobuoka *et al.* (2000) offrono un esempio di questo tipo. Questo sistema, comunque di non facile ingegnerizzazione nella realtà prototipale, è stato oggetto di prove sperimentali su modelli fisici in scala ridotta, sia in Giappone che in Italia, nel Laboratorio di Idraulica e Costruzioni marittime dell'Università Politecnica delle Marche, Ancona (Lorenzoni *et al.*, 2010), fornendo esiti incoraggianti per molte delle

condizioni ondose testate. Il sistema, essendo in grado di generare macrovortici ad asse orizzontale con verso alternato, a seconda del passaggio di cavo e cresta ondosa, sulla sommità delle lame, ha fornito, risultati positivi sul dislivello idrico nella zona protetta con un sovrizzo di trascurabile entità o addirittura un abbassamento, attivando la riduzione o l'inversione del verso della corrente di ritorno attraverso i varchi tra le barriere contigue (Fig. 3a). Rimangono non risolte le problematiche legate alla stabilità delle lame ed allo *storm surge*.

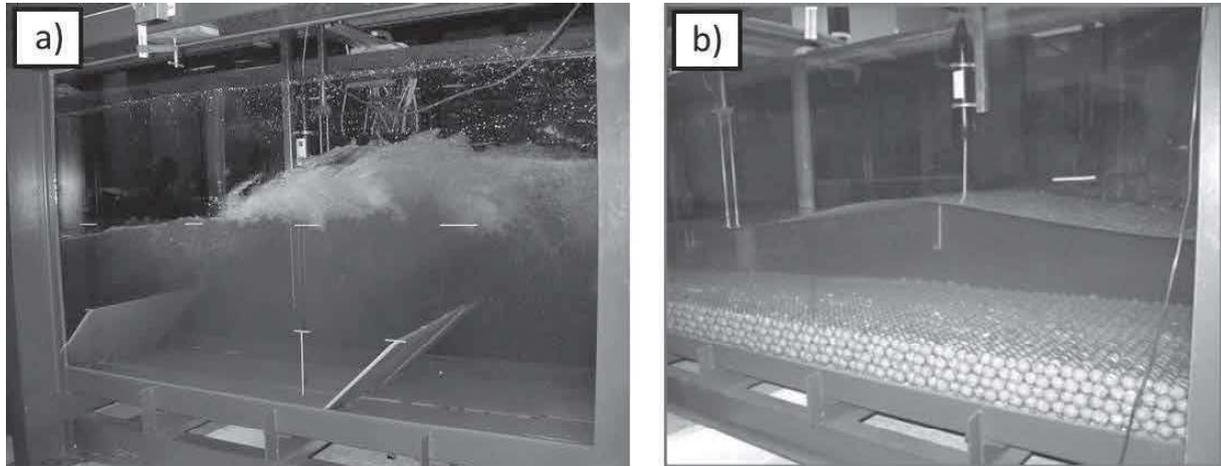


Figura 3. Fasi delle prove sperimentali su modello fisico in scala ridotta nella canaletta per onde del sistema di difesa sommerso a lame rigide inclinate verso il largo (a) e di un tratto di fondale permeabile (b)

La dissipazione graduale dell'energia delle onde può essere attivata in presenza di fondali scabri ed assorbenti, naturali o artificiali, che consentono di sfruttare i contributi dissipativi dell'attrito di fondo (Piattella e Mancinelli, 2006) e le dissipazioni che si instaurano all'interno del mezzo poroso (Corvaro *et al.*, 2010, 2014), producendo forti riduzioni dell'altezza d'onda anche in assenza del frangimento. Le prove sperimentali effettuate con fondale permeabile hanno fornito risultati sicuramente positivi sull'efficacia di tali sistemi sulla dissipazione dell'energia ondosa (Fig. 3b), si è infatti osservata una riduzione dell'altezza d'onda incidente comparabile con quella prodotta dalle tradizionali barriere sommerse, a parità di volume di materiale impiegato. Tali studi possono ritenersi propedeutici alla progettazione di isole sommerse in cui sia possibile sfruttare la permeabilità e la scabrezza del fondo per attenuare gradualmente l'energia ondosa. Negli ultimi anni le amministrazioni competenti e gli operatori turistici hanno realizzato numerosi interventi di difesa delle spiagge di tipo provvisorio e temporaneo, da utilizzare durante le stagioni invernali e da rimuovere dalla spiaggia in prossimità della stagione estiva. A partire dalla fine del secolo scorso, lungo le spiagge centro-settentrionali dell'Adriatico italiano, si usano realizzare, in autunno, delle dune artificiali

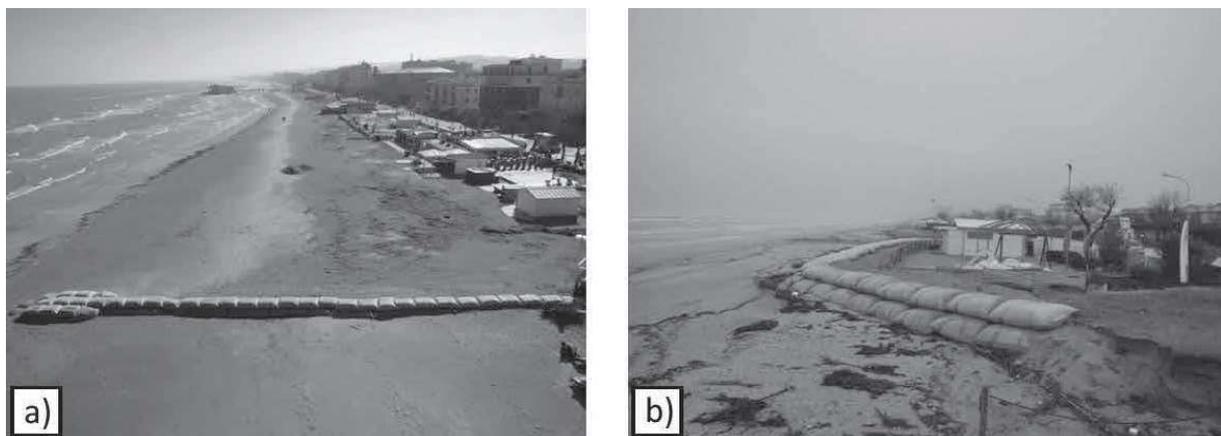


Figura 4. Applicazioni di un pennello (a) e di una barriera radente (b) realizzate sul litorale di Senigallia (AN) con geocontenitori a forma di sacchi in geotessuto riempiti di sabbia

mediante il semplice accumulo del sedimento della spiaggia stessa, in modo da costituire una protezione provvisoria delle strutture balneari e/o di quelle presenti sulla spiaggia. In via sperimentale, nel litorale di Senigallia (AN), su iniziativa del locale Comune, sono state realizzate delle opere di tipo provvisorio, in particolare un pennello ed una barriera radente, costituiti da sacchi di geotessuto, riempiti di sabbia sfruttando quella presente nella spiaggia stessa. Il geotessuto, di cui sono costituiti i sacchi, ha caratteristiche tecniche tali da resistere a qualsiasi atto vandalico e di contenere efficacemente la sabbia di riempimento con perdite praticamente nulle (Fig. 4).

Tale sistema di protezione è risultato di estrema efficacia, versatilità e facilità di impiego, a partire dalle semplici operazioni di riempimento e del relativo svuotamento in prossimità della stagione. Un altro vantaggio dei geocontenitori è che, una volta vuotati, essi possono essere facilmente rimossi e depositati. Questo tipo di intervento ha avuto un forte successo, infatti è stato riproposto nelle successive stagioni invernali, anche a protezione temporanea di diversi altri tratti di litorale.

Fattori meteomarini

La complessità della progettazione di un sistema di difesa della costa è incrementata dalle variazioni dei parametri ambientali nel breve e nel lungo periodo. Le previsioni sull'innalzamento del livello del mare sembrano convergere a valori di notevole rischio, in tempi relativamente brevi, soprattutto per l'Adriatico settentrionale.

Ciò comporterà una serie di adeguamenti delle strutture di protezione esistenti da prevedere e progettare sin da ora. Nel breve periodo si è registrata, nell'Adriatico, una variazione dell'intensità e della frequenza degli eventi estremi di moto ondoso, l'analisi che segue evidenzia questo fenomeno.

Relativamente alle misure ondamiche nel Mare Adriatico centrale, si dispone dei rilievi della Rete ondometrica nazionale (R.O.N.) dalla stazione di misura della boa posta al largo di Ancona in due distinti periodi pluriennali di funzionamento degli ultimi decenni: prima finestra temporale di durata di 7 anni fra il marzo 1999 ed il marzo 2006 e seconda finestra temporale di durata di 4 anni fra il dicembre 2009 ed il novembre 2013.

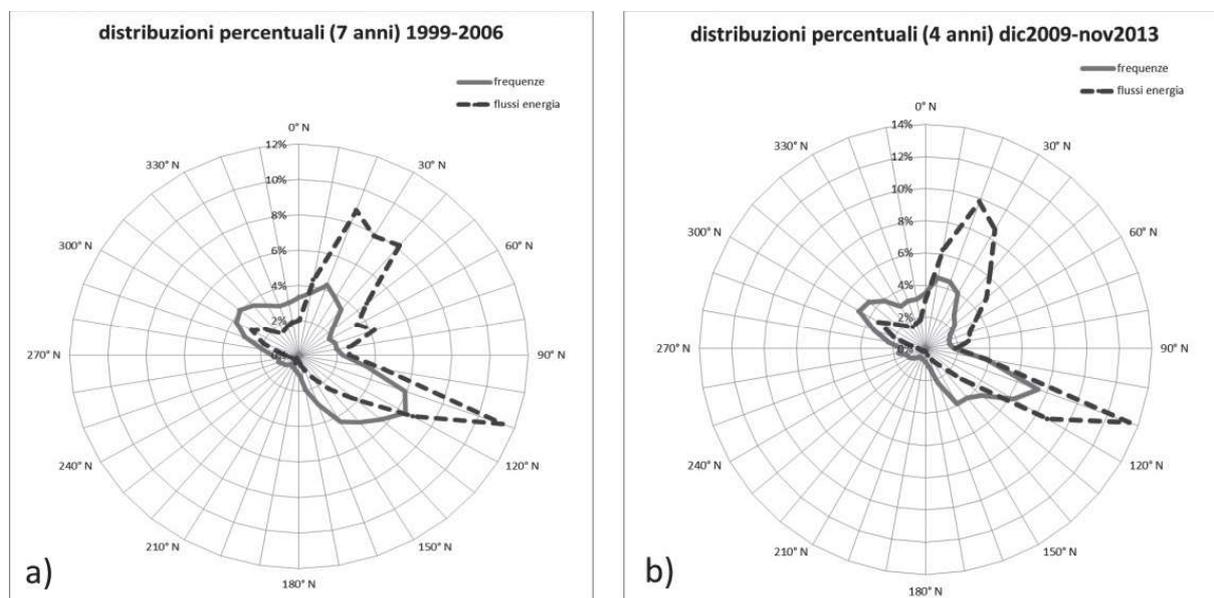


Figura 5. Distribuzioni direzionali percentuali della frequenza e del flusso di energia per metro di lunghezza di cresta delle onde registrate dalla stazione di misura ondometrica della R.O.N. al largo di Ancona nei 2 periodi di funzionamento di 7 anni dal marzo 1999 al marzo 2006 (a) e di 4 anni dal dicembre 2009 al novembre 2013 (b)

Dal loro confronto, evidenziato dai grafici della Figura 5 e della Figura 6, si rileva, nonostante l'esiguità del periodo di osservazione, che il regime ondoso direzionale medio si è mantenuto sostanzialmente

invariato nelle due finestre temporali, sia in frequenza che in flusso di energia, mentre, sembra che l'altezza ondosa media delle stagioni con mareggiate più intense (invernali) si sia evoluta verso un progressivo aumento: in 3 dei 5 inverni più recenti (secondo periodo temporale) sono stati superati i valori massimi mensili dei 7 inverni precedenti (primo periodo temporale). Anche la frequenza degli eventi ondosi più intensi (mareggiate), mostra una progressiva tendenza all'intensificazione. Infatti, nel periodo temporale più recente (dicembre 2009-novembre 2013) si sono verificati 612 eventi di mareggiata in cui le onde hanno superato il metro di altezza d'onda significativa (cioè, mediamente, ben 153 all'anno), mentre nel primo periodo (marzo 1999-marzo 2006) se ne contarono 497 (cioè 71 all'anno).

Così proseguendo l'analisi, essa mostra che nel periodo temporale più recente si sono contati 115 eventi in cui l'altezza d'onda ha superato i 2m di valore significativo (cioè 28,75 all'anno), 35 eventi con picchi superiori ai 3m (8,75 all'anno), 9 eventi con picchi superiori a 4m (2,25 all'anno) e 5 volte superiori ai 5m di altezza d'onda significativa (1,25 all'anno). In confronto, nel primo periodo temporale gli eventi superiori ai 2m erano stati 133 (19 all'anno), 37 superiori ai 3m (circa 5,3 all'anno), 5 superiori ai 4m (circa 0,7 all'anno) e 2 volte superiori ai 5m (circa 0,3 all'anno). In definitiva, limitatamente ai soli periodi di monitoraggio che è stato possibile analizzare, la frequenza degli eventi di mareggiata più intensi sembrano essersi all'incirca raddoppiati. Limitatamente ai periodi analizzati, le misure ondametriche a disposizione sul Mare Adriatico, mostrano come il regime ondoso marino stia subendo una progressiva evoluzione, che sembra portare ad una intensificazione soprattutto degli eventi ondosi più intensi, anche se tale variazione risulta molto altalenante e poco stabile, quindi non ci sono conferme che si tratti di un processo di cambiamento climatico generale in atto, soprattutto per la carenza di misure prolungate.

Per quanto riguarda i fenomeni dello *storm surge* si può citare, a titolo di esempio, un evento verificatosi di recente nel Medio Adriatico. La notte fra il 5 ed il 6 febbraio 2015, per effetto di una circolazione ciclonica con bassa pressione centrata sulle coste tirreniche centro-meridionali, l'Adriatico è stato interessato da importanti venti sciroccali, che hanno alimentato una notevole mareggiata accompagnata da un notevole ingorgo da vento, soprattutto lungo le coste fra il Medio e l'Alto Adriatico. Il mareografo di Ancona della Rete mareografica Nazionale (R.M.N., vedi ISPRA, 2015) ha mostrato, in corrispondenza con il passaggio del minimo barometrico, fra le ore 1:00 e 3:00 del mattino del giorno 6, un sovrizzo superficiale oltre il metro di dislivello, piuttosto elevato ed inconsueto per il paraggio in questione (si veda la Fig. 7). Se questi cambiamenti del regime delle onde saranno confermati nel prossimo futuro sarà necessario adeguare i sistemi di difesa esistenti e/o ricorrere alle difese provvisorie in modo più sistematico utilizzando materiali idonei a questo tipo di intervento.

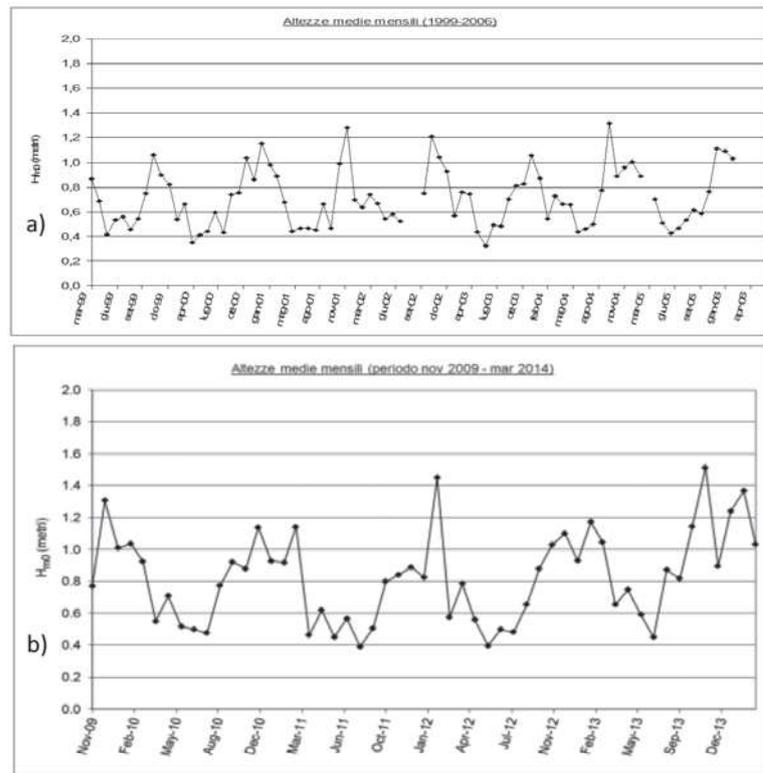


Figura 6. Andamento cronologico dei valori dell'altezza d'onda significativa media mensile rilevati dalla boa ondometrica della R.O.N. al largo di Ancona nei due periodi di funzionamento dal marzo 1999 al marzo 2006 (a) e dal novembre 2009 al marzo 2014 (b).

Conclusioni

L'ampia diffusione delle scogliere foranee emerse nella costa adriatica ha posto notevoli problemi ambientali. La ricerca di soluzioni che eliminassero le criticità legate all'utilizzo delle difese emerse ha portato principalmente all'utilizzo di scogliere sommerse. Tali opere hanno prodotto dei benefici, ma introdotto nuove problematiche. Tali questioni sono state affrontate approfonditamente nelle numerose ricerche analitico-sperimentali che consentono oggi di avere strumenti più adeguati per affrontare la progettazione di tali sistemi di difesa. Qualsiasi trasformazione delle opere foranee esistenti (da emerse a sommerse o viceversa) richiede un'analisi dettagliata di tutti i fattori in gioco (tracimazione, trasmissione, sovrizzo del livello superficiale, ecc.) per ottimizzare il risultato. Negli ultimi anni si sono ricercati sistemi alternativi di dissipazione dell'energia ondata, sfruttando la permeabilità e la scabrezza. L'ingegnerizzazione di tali sistemi è ancora carente, l'unica possibilità sarebbe quella di formare delle isole ecologiche in cui si sfruttino le macroscabrezze e la permeabilità per dissipare gradualmente l'energia ondata. I cambiamenti climatici sembrano indurre variazioni anche nel breve periodo, come risulta dall'analisi dei dati ondometrici al largo di Ancona. Tutto ciò induce gli operatori economici ad optare per sistemi di difesa provvisori, da utilizzare d'inverno, per contrastare i fenomeni di allagamento della spiaggia emersa forniti da livelli eccezionali di *storm surge*.

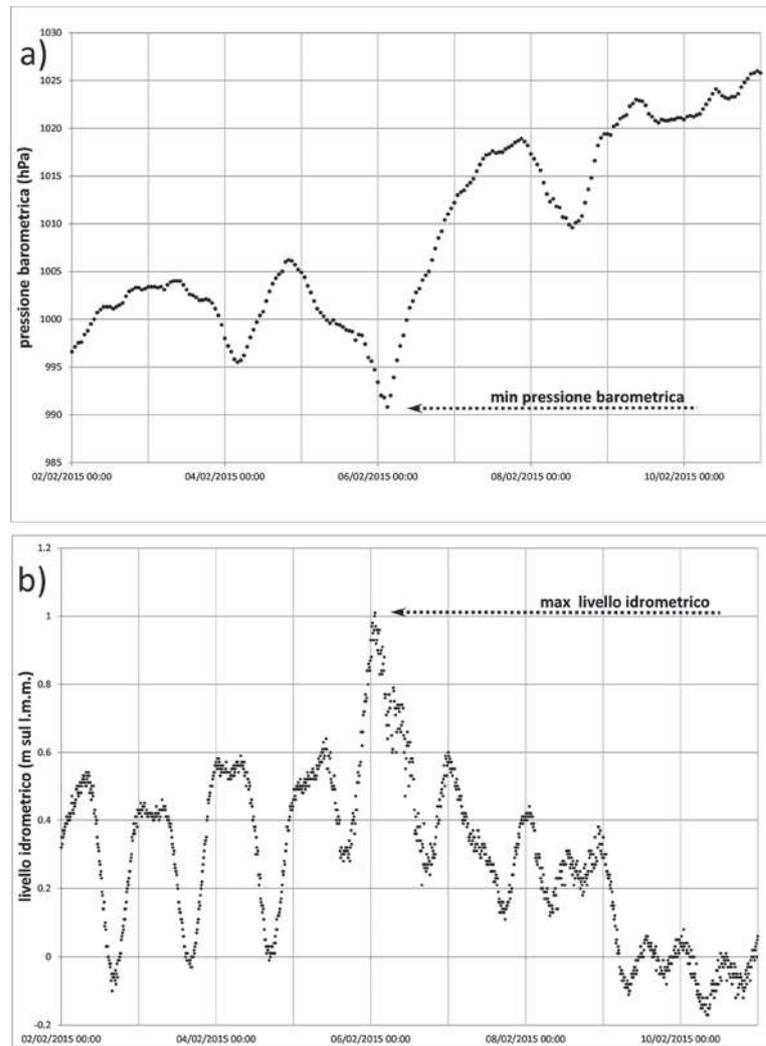


Figura 7. Andamento cronologico delle misure di pressione barometrica (a) e del livello idrometrico superficiale (b) rilevate alla stazione di misura di Ancona della Rete Mareografica Nazionale nel periodo dal 2 al 10 febbraio 2015 con il fenomeno di sovrizzo del livello medio superficiale del 5-6 febbraio 2015.

Bibliografia

- Burcharth H. F., Hawkins S. J., Zanuttigh, B., Lamberti, A. (2007) - Environmental design guidelines for low crested coastal structures, Elsevier, Oxford, U.K., pp. 448.
- Buccino M., and Calabrese M. (2007) - Conceptual approach for prediction of wave transmission at low-crested breakwaters, *J. Waterway, Port, Coastal, Ocean Eng.*, 133: 213–224.
- Cappietti L., Aminti P.L.; Gironella X., Arcilla A.S. (2009) - Large and Small Scale experiments on wave transmission at submerged wide-crested breakwaters, *Proc. 31st International Conference Coastal Engineering, ASCE.*, Stolberg Zillekens, pp. 323-330.
- Cipriani M., Mancinelli A. e Vitale A. (1984) - Strutture in elementi prefabbricati per la difesa delle spiagge: risultati sperimentali conseguiti con l'impiego della barriera frangiflutti nell'arenile di Porto Recanati (Macerata) e considerazioni sul dimensionamento di tali strutture, XIX Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Pavia, C-22, pp. 1-11.

- Corvaro S., Mancinelli A., Brocchini M., Seta E. e Lorenzoni C. (2010): On the wave damping due to a permeable seabed, *Coastal Engineering*, Elsevier, volume 57: 1029-1041.
- Corvaro S., Seta E., Mancinelli A. e Brocchini, M. (2014): Flow dynamics on a porous medium, *Coastal Engineering*, Vol. 91, 280-298.
- ISPRA (2015) - Rete mareografica nazionale (RMN), www.mareografico.it.
- Haller M.C., Dalrymple R.A., Svendsen I.A. (1997) - Rip channels and nearshore circulation, *Proceedings of Coastal Dynamics'97*, ASCE, 1, 594-603.
- Liberatore G., Petti M. (1992) - Wave transformations over a submerged bar: experiments and theoretical interpretations, *Proc. of 23rd International Conference Coastal Engineering*, ASCE., vol. 1, pp. 447-459.
- Lorenzoni C., Piattella A., Soldini L., Mancinelli A. e Brocchini M. (2005) - An experimental investigation of the hydrodynamic circulation in the presence of submerged breakwaters, *Proceedings of the Fifth International Symposium WAVES 2005*, Madrid, 3-7 July 2005, CD-ROM.
- Lorenzoni C., Soldini L., Brocchini M., Mancinelli A., Postacchini M., Seta E. e Corvaro S. (2010) - Working of defence coastal structures dissipating by macro-roughness, *Journal of Waterways Port Coastal and Ocean Engineering*, 136: 79-90.
- Nobuoka H., Irie I., Kato H. e Mimura N. (1996) - Regulation of nearshore circulation by submerged breakwater for shore protection, *Proceedings of the 25th International Conference of Coastal Engineering*, Orlando, Florida, 2394-2403.
- Piattella A. e Mancinelli A. (2006) - Idrodinamica costiera generata da strutture dissipative, *Atti del 30° Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche*, IDRA 2006, Roma, CD-ROM.
- Postacchini M., Brocchini M., Corvaro S., Lorenzoni C. e Mancinelli A. (2011) - Comparative analysis of sea wave dissipation induced by three flow mechanisms, *Journal of Hydraulic Research*, 49: 554-561.
- Ruol P., Faedo A., Paris A. (2004) - Prove sperimentali sul comportamento di una scogliera a cresta bassa e sul fenomeno del piling-up a tergo di essa, *Studi Costieri*, 7, 41-59.
- Van der Meer J. W., Briganti R., Zanuttigh B., Wang B. (2005) - Wave transmission and reflection at low-crested structures: Design formulae, oblique wave attack and spectral change, *Coastal Eng.*, 52, 915-929.

Ricevuto il 04/08/2016; accettato il 9/02/2017