

Il rischio per i bagnanti in presenza di opere di difesa delle spiagge

Pier Luigi Aminti^{1,2}

¹Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Firenze

²GNRAC - Gruppo Nazionale per la Ricerca sull'Ambiente Costiero

Via S. Marta 3, Firenze. Email: pierluigi.aminti@unifi.it

Riassunto

I fenomeni di erosione costiera che colpiscono sempre più diffusamente le coste italiane hanno dato origine ad un continuo incremento delle opere di difesa, le quali sono particolarmente concentrate sui tratti costieri intensamente utilizzati per il turismo estivo. Lungo le spiagge italiane esistono prevalentemente opere di protezione basate su barriere emerse parallele a riva ed in alcuni casi sono presenti barriere sommerse. Tratti meno lunghi ma diffusi su tutte le coste, sono protetti con pennelli ortogonali a riva. Le correnti nella *surf zone*, indotte dal moto ondoso, vengono fortemente modificate dall'interazione con le opere di difesa con la generazione di forti gradienti di velocità che possono generare condizioni di pericolo anche per nuotatori esperti. La dinamica di queste correnti è variabile in funzione della direzione di provenienza del moto ondoso ma nel complesso risulta prevedibile con modelli numerici. In particolari condizioni fondali naturali a bassa pendenza di litorali sabbiosi vengono erosi o scavati generando approfondimenti improvvisi che possono rappresentare un pericolo per nuotatori inesperti. Le nuove tecnologie disponibili per i rilievi batimetrici permettono di identificare la posizione delle zone pericolose per una loro segnalazione.

Parole chiave: turismo balneare, morfologia della spiaggia, barre, rip current.

Abstract

Coastal erosion affecting the Italian coast gave rise to a continuous increase in defence structures. These are particularly present along coastlines intensely used for summer tourism. Italian beaches are mostly protected by barriers parallel to the shore; in most cases emerged and rarely submerged reefs. Where longshore sediment transport dominates the beach morph dynamic groin field have been used. Wave induced currents are strongly affected by interaction with the defence structures with the formation of high speed currents that can cause dangerous conditions for swimmers. The dynamic of these currents is variable depending on the wave direction but generally it is predictable with the aid of numerical models. Low slope natural sandy bottoms are modified by currents and the formation of deeps holes can be dangerous for inexperienced swimmers. New technologies for bathymetric surveys allow us to identify the location of dangerous zones for their reporting.

Keywords: coastal structures, beach morphology, rip currents.

Introduzione

I fenomeni erosivi che ormai da decenni interessano le coste italiane e lo sviluppo di un'economia, che ha aumentato sempre di più la pressione antropica sulle aree costiere, hanno portato alla costruzione di opere di difesa che ormai interessano la maggior parte delle spiagge utilizzate intensivamente per il turismo estivo. Tutte le opere di difesa interagiscono col sistema di correnti e di trasporto solido e determinano importanti cambiamenti al campo idrodinamico indotto dal moto ondoso nell'intorno delle strutture e, conseguentemente, in tempi più o meno lunghi, inducono modifiche ai fondali.

Rilievi di dettaglio, eseguiti alcuni anni dopo la costruzione di opere di protezione, hanno evidenziato la formazione di approfondimenti localizzati, particolarmente evidenti in corrispondenza dei varchi ed in corrispondenza delle estremità delle opere, ma anche diffusi sui fondali immediatamente esterni ai sistemi di difesa.

I problemi indotti da correnti che si concentrano in corrispondenza di varchi e le conseguenti erosioni localizzate, sono stati studiati prevalentemente allo scopo di prevedere le opportune protezioni a garanzia della stabilità delle strutture, così come sono stati eseguiti studi riguardanti la progettazione di opere sommerse e i problemi che le correnti intorno ad esse rivestono per la stabilità del fondale sabbioso, ma anche per le scogliere.

Le ricerche svolte nei laboratori italiani e gli studi di campo sulle spiagge italiane sono state raccolte in GNRAC n. 9 (2005).

A livello europeo, nel primo decennio del 2000 è stato finanziato un importante progetto di ricerca finalizzato alla comprensione dei fenomeni che si generano nell'intorno di opere a scogliera tracimabili, che rappresentano la tipologia di opere di difesa più diffusa, con particolare riguardo alle opere sommerse molto apprezzate per il loro minore impatto sul paesaggio.

Gli studi sono stati prevalentemente eseguiti in laboratorio su modelli fisici e ancora più frequentemente con modelli numerici.

Fra i più significativi studi vanno segnalati i lavori di Withehouse e Damgaard (2000) dove sono riportati anche dati di campo, ed il lavoro di Sumer et al. (2004), i quali, mediante indagini di laboratorio, hanno analizzato l'erosione localizzata sulle testate di scogliere tracimabili. Questi esperimenti hanno evidenziato la concentrazione di velocità e soprattutto l'incremento di azioni tangenziali al fondo in corrispondenza di discontinuità nell'intorno di opere di protezione.

In Sumer et al. (2001) sono descritti due meccanismi che determinano l'erosione in prossimità delle opere. Il primo descrive l'erosione locale (*near field*) che si verifica ad una distanza inferiore ad $\frac{1}{4}$ della lunghezza d'onda. Tale erosione può interessare sia il lato mare delle strutture, dove si innesca una corrente al fondo legata al processo di riflessione ondosa amplificata dai frangenti, sia il lato riva dove si tuffa il frangente. La seconda forma di erosione invece è legata alla presenza di onde e correnti su più ampia scala, e interessa per esempio tutta l'estensione del varco. Entrambi i fenomeni sono rilevanti in termini di approfondimenti nell'intorno delle strutture e possono portare alla formazione di fosse ripide, dannose sia per la balneazione sia per la stabilità al piede delle opere.

I problemi causati dalla presenza di varchi molto stretti in opere emerse ma tracimabili, sono ampiamente sottovalutati nella progettazione soprattutto in riferimento ai pericoli che i forti gradienti di velocità causano frequentemente ai bagnanti. Gli studi condotti nell'ambito del progetto europeo DELOS sono stati pubblicati nel numero speciale Coastal Engineering, 52 (2005). In questi studi i fenomeni legati alla circolazione indotta dalle onde incidenti su scogliere tracimabili e le conseguenti modifiche dei fondali erano stati chiariti così com'erano stati individuati gli strumenti di modellistica fisica e numerica idonei a rappresentarli.

Tipologie di opere di difesa presenti sulle coste italiane

Barriere parallele isolate

I più vecchi e diffusi sistemi di difesa sono rappresentati dalle barriere parallele a riva. Una legge del 1907 imponeva agli Uffici del Genio Civile di provvedere con scogliere alla difesa degli abitati minacciati dall'erosione costiera. Con questa norma, furono realizzati sistemi di difesa particolarmente diffusi sulla costa adriatica, con lo scopo di proteggere gli insediamenti costieri che si svilupparono con grande rapidità negli anni 50 e '60 del secolo scorso. Analizzando i progetti di quel periodo si nota la totale assenza di studi di base e la scarsa conoscenza dei processi di idrodinamica costiera. Le barriere parallele avevano una lunghezza di 70 – 80 m, varchi di 20-30 m ed erano poste fra gli 80 ed i 120 m da riva, sia in Adriatico che sul Tirreno.

Quasi tutte le spiagge dei centri turistici più noti a Sud della foce del Po fino al Molise sono oggi protette da scogliere parallele che ormai fanno parte del paesaggio costiero; esse non sono più percepite come un elemento di disturbo dai turisti e ci sono continue pressioni per estendere questo tipo di opere sui tratti in erosione ancora non protetti.

I gestori di stabilimenti balneari le ritengono più interessanti per le attività economiche anche perché progettando barriere con rapporti opportuni fra la lunghezza dei singoli elementi e la distanza da riva è possibile creare dei tomboli che permettono un'utilizzazione intensiva dell'arenile e disposizione più attraente dei punti ombra (Figura 1).



Figura 1. Tomboli a tergo di un sistema di barriere parallele emerse ed utilizzo intensivo dell'arenile.

I criteri per la progettazione di queste opere furono divulgati in modo organico dalle pubblicazioni del CERC (1990) sulla base di misure di campo, valutazioni empiriche ed analisi di laboratorio eseguite da diversi ricercatori nei due decenni precedenti (Rosati, 1990).

Il successo di questo tipo di opere è stato molto evidente in tutta Europa e in America settentrionale (Lamberti et al., 2005); (Anfuso et al., 2011); (Dolphin et al., 2012); (Araujo et al., 2014); (Sane et al., 2007); (Hardaway e Gunn, 2010); (Saengsupavanch, 2013).

La stima delle variazioni morfologiche indotte dalle barriere eseguita con metodi empirici è stata superata dalle indagini con gli strumenti di modellistica numerica, talvolta tarati sui risultati di modelli fisici tridimensionali con fondo mobile.

La modellistica fisica e numerica ha permesso di chiarire aspetti difficilmente analizzabili con studi di campo, come le modifiche locali ai fondali, che si verificano durante una mareggiata ad esempio in corrispondenza dei varchi o alle estremità di una barriera parallela.

E' stato evidenziato che il sistema di circolazione indotto da uno stato di mare che si propaga con creste parallele a costa, origina due vortici simmetrici rispetto all'asse della barriera, che spiegano bene le osservazioni sulla formazione dei salienti e dei tomboli descritti e previsti con gli schemi empirici più vecchi.

Nel caso di onde oblique in determinate condizioni, si forma un solo vortice che crea un'escavazione locale sul bordo sottoflutto della barriera (Karambas, 2012), (Figura 2).

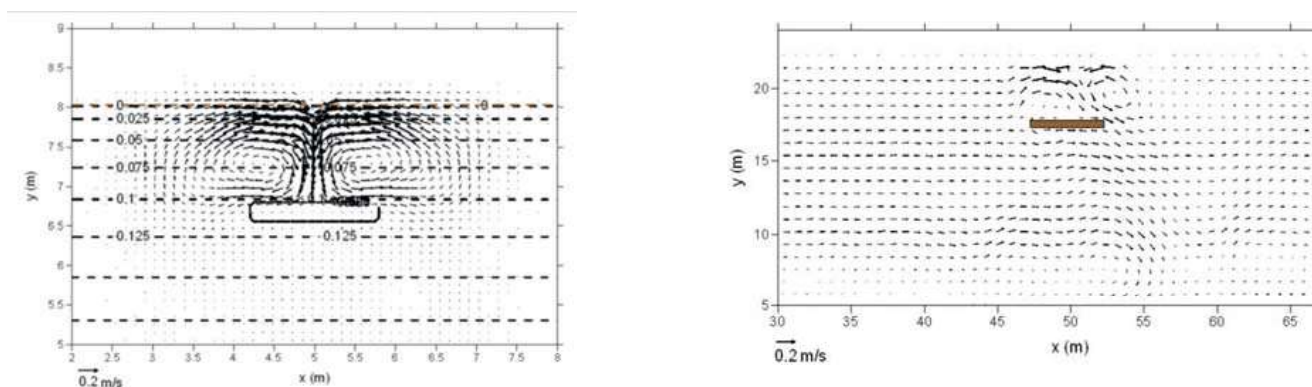


Figura 2. Sistema di circolazione indotto da uno stato di mare che si propaga a costa e formazione di vortici (Karambas, 2012).

L'effetto combinato di correnti e azioni del moto ondoso indotte dai fenomeni di riflessione, diffrazione ed azione delle onde frangenti sulle opere, inducono erosioni in prossimità di estremità o varchi di opere di difesa (*near field erosion*) o più lontane anche lungo i paramenti lato terra e lato mare (*far field erosion*). Gli approfondimenti dei fondali prevedibili con relazioni semi-empiriche, in prossimità delle estremità di opere, sono di grande importanza poiché generano situazioni di pericolo per i bagnanti, mentre gli abbassamenti più lontani lo sono di meno a causa dell'elevata pendenza dei bordi, che nel primo caso è molto maggiore. La nuova forma del fondo è, nel caso reale, talvolta effimera: una mareggiata con inclinazione diversa può riportare il fondo in condizioni diverse e solo con un rilievo molto tempestivo o con sistemi di monitoraggio continuo si possono evidenziare le modifiche previste dai modelli fisici o numerici che fanno generalmente riferimento a condizioni stazionarie. Questo aspetto è fonte di potenziali situazioni di pericolo: approfondimenti localizzati si formano durante una mareggiata e rimangono fino a quando una seconda mareggiata con caratteristiche diverse riequilibra il fondo o sposta le zone approfondite in un'altra zona. L'approfondimento improvviso, sebbene localizzato, può determinare situazioni critiche quando il fondale passa ad esempio da 2 m (relativamente) sicuro ai 3 m, sicuro solo per i nuotatori.

Gli studi sintetizzati in Aminti et al., (2005) evidenziano che in un sistema di barriere, sia emerse ma anche sommerse, in corrispondenza delle estremità si formano approfondimenti dell'ordine del metro ad una distanza dell'ordine di 20 m dall'asse della struttura e di lunghezza di qualche decina di metri misurata parallelamente all'asse della barriera. Gli studi e le informazioni empiriche hanno fornito negli anni '90 i parametri utili per la progettazione di sistemi di difesa che permettessero di stabilizzare la linea di costa con forme di salienti o tomboli anche per rendere le spiagge maggiormente fruibili per usi turistici; con lo sviluppo delle conoscenze e con l'utilizzo della modellistica numerica è ora possibile prevedere, per i diversi stati di mare, il campo di correnti generate dall'interazione con le barriere.

Note le condizioni di moto ondoso più frequente è possibile quindi prevedere la presenza di approfondimenti dei fondali in prossimità delle estremità e dei varchi fra le barriere, rendendo possibile l'identificazione delle zone e delle condizioni di mare che possono comportare la formazione di una corrente in grado di trascinare un bagnante verso una zona di acque profonde.

Barriere sommerse e sistemi di barriere emerse ma trascinabili

I sistemi di barriere parallele provocano il frangimento delle onde e la riduzione della velocità delle correnti indotte dalle onde nel tratto protetto, tuttavia l'intensità delle correnti risulta incrementata all'esterno delle barriere dove si hanno forti fenomeni di turbolenza indotti dalle onde frangenti e riflesse. Conseguentemente, risulta aumentata la capacità di trasporto nella fascia prossima alle scogliere ed in tempi lunghi si ha un approfondimento dei fondali.

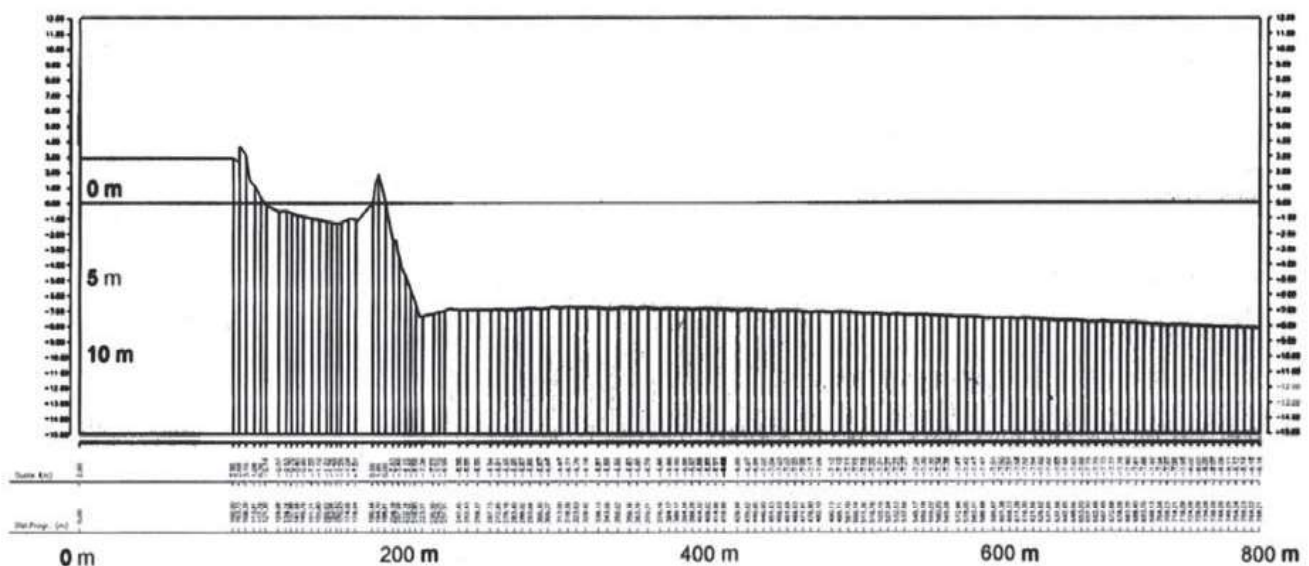


Figura 3. Profilo del fondale antistante le barriere parallele emerse che proteggono un tratto del litorale di Marina di Pisa.

In Figura 3, è riportato un esempio di variazione a lungo termine dei fondali antistanti le barriere a difesa di Marina di Pisa dove risulta evidente un fondale sostanzialmente piano alla profondità di 6 m al largo di barriere dove la profondità nella zona protetta non raggiunge mai i 2 m. Questi forti gradienti di profondità in spazi limitati possono creare situazioni di pericolo per nuotatori poco esperti che attraversando un varco fra due scogliere vengono a trovarsi in acque molto più profonde di quelle della zona protetta.

Negli ultimi decenni sono state realizzate numerose difese con barriere sommerse facendo tesoro degli interventi più estesi e studiati di Ostia e Pellestrina.

In Toscana l'intervento più rilevante è quello realizzato nel Golfo di Follonica, dove il sistema di barriere parallele è stato sostituito con una unica barriera sommersa lunga 5.5 km (Figura 4).



Figura 4. Sistema di barriere parallele emerse a protezione del litorale del Golfo di Follonica (in alto); la barriera sommersa lunga 5.5 km, che ha sostituito il sistema di barriere emerse (in basso).

Gli studi su modelli fisici e numerici hanno evidenziato che l'idrodinamica nell'intorno delle barriere sommerse è governata dal sovrizzo, che si genera nella zona protetta ed è causato dalla massa d'acqua trasportata dalle onde frangenti che passano sopra la scogliera. La massa d'acqua entrata nella zona protetta può uscire sia riattraversando la berma della barriera sia dalle sue estremità.

Se la barriera è molto lunga e sono presenti dei varchi, questi rappresentano delle vie preferenziali di uscita con la presenza di correnti permanenti a velocità elevata.

Il modello concettuale che spiega l'idrodinamica intorno a barriere sommerse, o emerse a cresta bassa oppure non tracimabili ma con struttura permeabile, è sostanzialmente lo stesso: la massa entrante per tracimazione,

oppure attraverso la struttura permeabile della barriera, genera un sovrizzo che sostiene le correnti in uscita. In particolare, nel caso di barriere permeabili sottoposte ad un attacco ondoso di modesta altezza, in relazione al quale non si verificano tracimazioni, si determina sul paramento lato mare uno stato di sovrappressione dovuto al set-up ed alla spinta idrodinamica. Questa sovrappressione genera un flusso attraverso la struttura fino a quando il livello interno s'innalza in modo tale da produrre una spinta idrostatica sul paramento lato terra uguale e contraria alla spinta totale (idrostatica ed idrodinamica) presente sul paramento esterno (Figura 5).

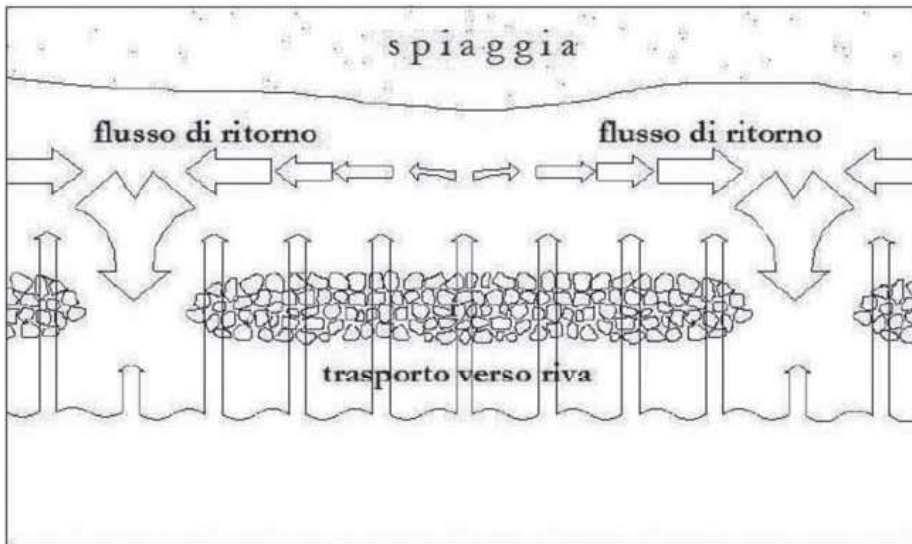


Figura 5. Schema dell'interazione onde-struttura in corrispondenza di una scogliera a cresta bassa.

Questo sovrizzo del livello nella zona protetta genera un flusso in uscita in corrispondenza dei varchi con una portata media equivalente alla portata entrante per filtrazione attraverso la barriera; un flusso in uscita governato dallo stesso sovrizzo si genera con direzione parallela alla riva, in corrispondenza della sezione terminale del sistema di barriere o di una lunga barriera sommersa senza varchi.

Ai fini della pericolosità per i bagnanti possono verificarsi situazioni molto insidiose dato che, nella zona protetta il moto ondoso è praticamente assente, e per un bagnante è impossibile vedere le onde che frangono sul paramento esterno della scogliera; quindi in assenza di tracimazioni, è difficile avere una informazione sulle reali condizioni di agitazione del mare.

Se i varchi sono particolarmente stretti le velocità locali possono essere elevate tali da trascinare all'esterno delle difese anche un nuotatore molto esperto che viene a trovarsi nelle stesse condizioni di trascinamento da parte di una *rip-current* in ambiente naturale.

Alcune barriere parallele sono molto lunghe ed un ipotetico bagnante trascinato all'esterno della barriera si potrebbe trovare nella situazione di non poter rientrare attraverso i varchi per la forte velocità in uscita e potrebbe non riuscire a spostarsi parallelamente a riva fino al termine del sistema di difesa. In questa situazione è essenziale la presenza di mezzi di soccorso.

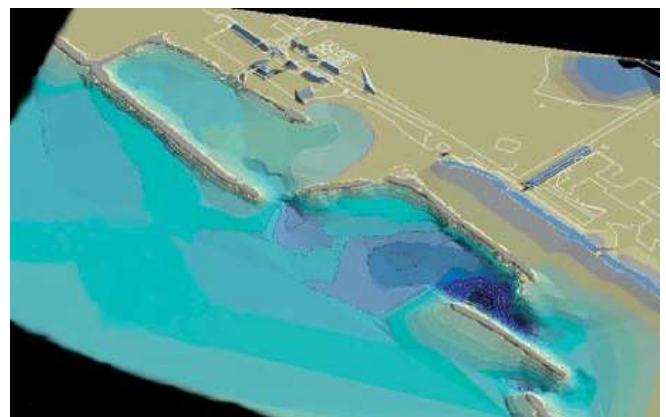
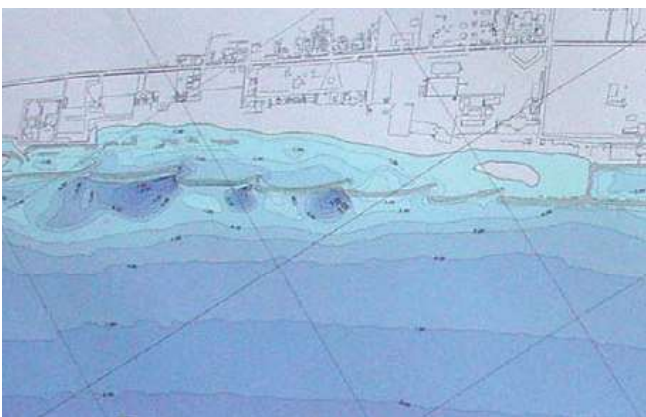


Figura 6. Approfondimento dei fondali in corrispondenza di varchi su barriere parallele.

In fase di progetto per una maggior sicurezza dei bagnanti sarebbe opportuno prevedere dei varchi di larghezza adeguata a permettere l'uscita con velocità non troppo elevate della portata in entrata. A lungo termine la morfologia dei fondali assume configurazioni in genere abbastanza stabili caratterizzate dalla presenza di buche anche molto profonde in corrispondenza dei varchi (Figura 6). Interviste condotte recentemente hanno evidenziato che solo una minima parte dei turisti che frequentano le spiagge sono a conoscenza dell'esistenza di barriere sommerse utilizzate per la difesa della costa, e quindi vengono ignorati i potenziali pericoli di queste opere (GNRAC n. 25, 2017).

Pennelli

Le scogliere ortogonali alla linea di costa hanno lo scopo di interagire con le correnti litoranee ed intercettare il trasporto dei sedimenti lungo costa. Tali opere di protezione comportano, a lungo termine, una forma della linea di riva modificata rispetto a quella iniziale.

Secondo una recente indagine (Simeoni et al., 2017) queste opere sono percepite dai turisti che frequentano le spiagge come opere a basso impatto sul paesaggio costiero, insieme alle barriere sommerse (Figura 7).



Figura 7. Esempi di pennelli e modifiche indotte a lungo termine, sulla linea di riva.

Rilievi batimetrici di dettaglio condotti con strumentazione *multi beams* ad alta risoluzione permettono di evidenziare la diversa pendenza dei fondali sul lato sopraflutto e sottoflutto dei pennelli; ad una diversa posizione della linea di riva sui due lati corrisponde anche una diversa pendenza.

Sul lato sopraflutto dove si ha deposito le pendenze sono dell'ordine di 1/50 – 1/100, sul lato sottoflutto possono essere dieci volte più alte.

I modelli numerici evidenziano le modifiche indotte alle correnti litoranee dovute alla presenza di pennelli isolati o equi spaziatati per proteggere tratti più estesi di costa (Bolzano et al., 2005).

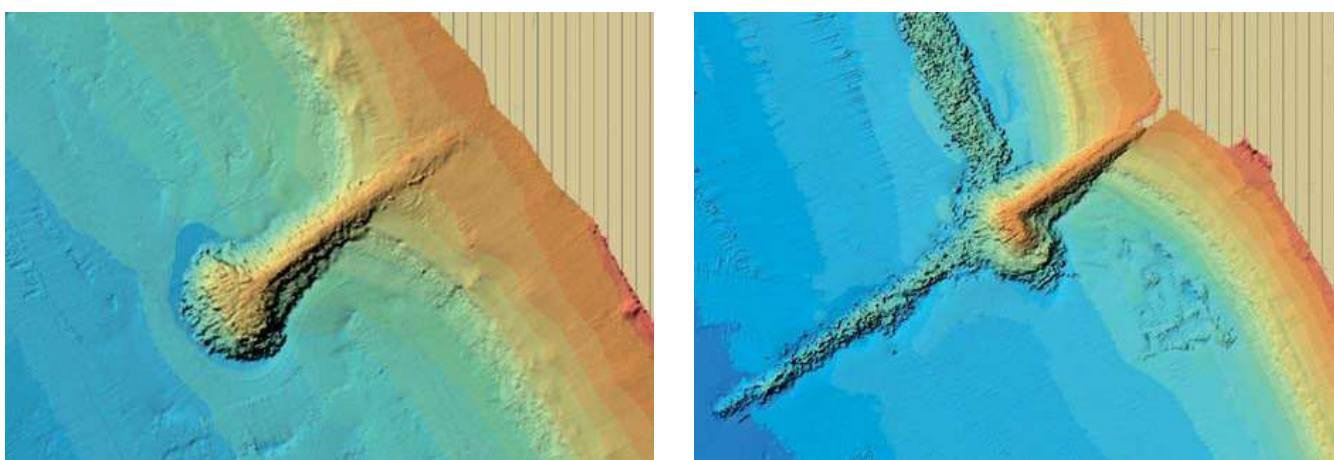


Figura 8. Rilievi che mostrano le erosioni localizzate del fondo intorno a pennelli emersi (sinistra) e pennelli emersi con un prolungamento sommerso (destra).

Le correnti parallele a costa vengono deviate lungo il paramento sopraflutto del pennello e in corrispondenza della testata si ha una concentrazione di velocità che provoca, a lungo termine anche modifiche ai fondali. Per la protezione di ripascimenti artificiali o per motivi di impatto ambientale i pennelli sono costruiti talvolta con un tratto sommerso ed in questo caso sia i gradienti di velocità sia le modifiche del fondo sono minori. In Figura 8, sono riportati i rilievi dove sono evidenziate le variazioni del fondale intorno a pennelli. I rilievi mostrano che le erosioni localizzate del fondo sono localizzate in corrispondenza delle testate dove si verificano aumenti di velocità locali delle correnti che aggirano la testata. In presenza di pennelli emersi con un prolungamento sommerso, le correnti che aggirano la parte emersa vengono deviate verso l'alto per superare la parte sommersa ed i fenomeni erosivi sono molto meno intensi, ma i fondali sottoflutto hanno in generale profondità maggior di quelli sopraflutto. Per ridurre gli effetti dei pennelli sulla linea di costa indotti dagli accumuli sul lato sopraflutto vengono utilizzati pennelli interamente sommersi o con tratti emersi molto limitati. In questi casi se le opere hanno la sommità poco sotto il livello del mare, deviano le correnti litoranee e si hanno modifiche relativamente modeste sui fondali.

In Figura 9 è riportato un esempio di modifiche dei fondali osservate dopo la costruzione di un pennello in geocontenitori riempiti di sabbia. Si può osservare che dopo una fase iniziale in cui sono presenti intorno al setto sommerso accumuli fino ad oltre 2 m, a distanza di oltre un anno si sono formati approfondimenti localizzati all'esterno della testata come accade frequentemente per i pennelli emersi.

Si può osservare che dopo una fase iniziale in cui sono presenti intorno al setto sommerso accumuli fino ad oltre 2 m, a distanza di oltre un anno si sono formati approfondimenti localizzati all'esterno della testata come accade frequentemente per i pennelli emersi.

La pericolosità di queste opere è comunque relativamente bassa dato che la perturbazione al campo di corrente, che lungo il paramento evidenzia valori elevati, ha in generale una estensione molto limitata così

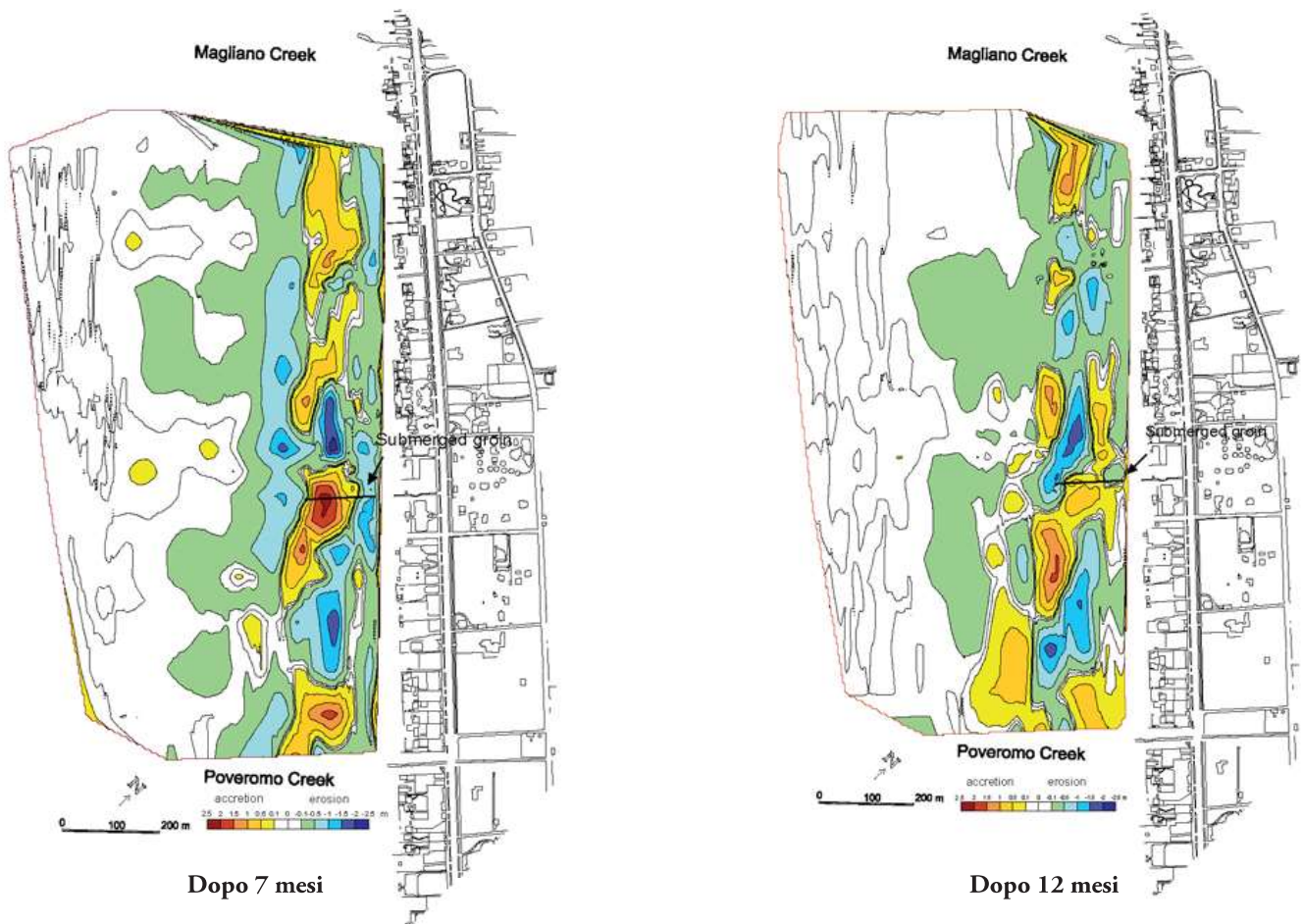


Figura 9. Modifica del fondale rilevata a seguito della costruzione di un pennello in geocontenitori riempito di sabbia, dopo 7 mesi dalla messa in opera (sinistra) e dopo un anno (destra). Da Aminti et al., 2004.

come le perturbazioni sui fondali, a distanza dell'ordine di qualche decina di metri dal pennello, si riportano a valori paragonabili alle irregolarità di un fondale sabbioso con la presenza di barre.

I pennelli sono spesso percepiti come dei punti privilegiati di accesso al mare non solo per la balneazione, ma anche come punto di osservazione e di sosta ed in molti casi sono progettati per una facile accessibilità posizionando massi superficiali piatti e ben accostati o con percorso centrale realizzato con solette in calcestruzzo. In questo caso si possono creare situazioni di pericolo di caduta in mare quando un'onda della mareggiata sormonta la sommità del pennello. Il rischio di trascinarsi di una persona a piedi ad opera di onde che sormontano opere marittime è stato studiato nell'ambito del sormonto di opere difesa di porti o difese radenti analizzando i fenomeni di overtopping, quindi in presenza di getti d'acqua che cadono dopo aver superato un muro paraonde.

Ricerche svolte recentemente per valutare la stabilità di persone investite da una corrente indotta da un'erosione fluviale, possono fornire importanti indicazioni sulla stabilità di una persona che si trova su pennello investito da un'onda.

Analisi sperimentali hanno portato alla definizione di una correlazione fra l'altezza della lama d'acqua che investe una persona in piedi e la velocità della corrente che ne provoca la caduta. Arrighi et al. (2019) hanno proposto la condizione limite per la stabilità, mediante la relazione determinata sperimentalmente dalla curva riportata in Figura 10, dove H è l'altezza della lama d'acqua che investe una persona in piedi di altezza H_p , Fr è il numero di Froude, $V/(gH)^{0.5}$ dove V è la velocità della corrente, che in prima approssimazione a bassa profondità può essere stimata come la celerità d'onda che investe la barriera.

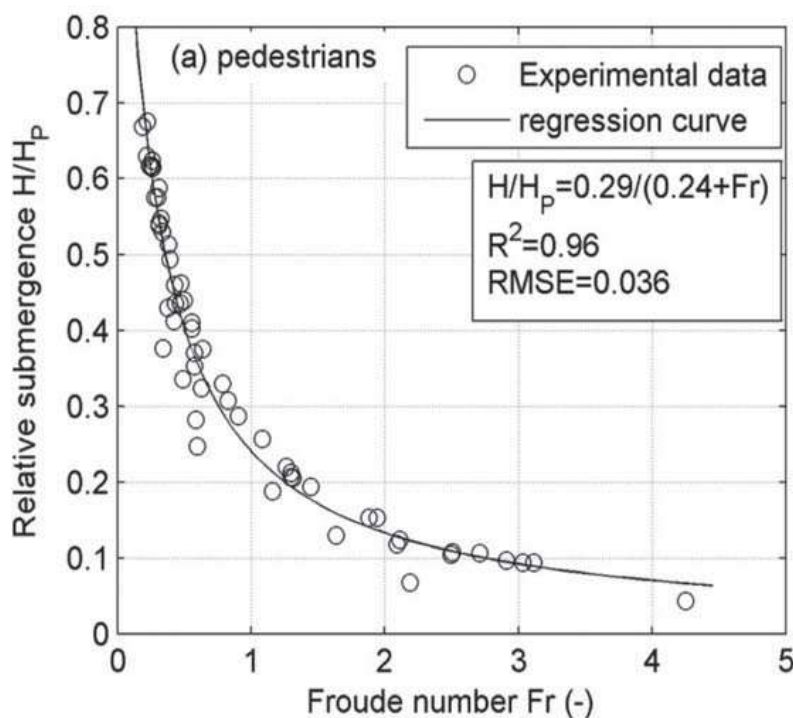


Figura 10. Condizione limite per la stabilità, relazione determinata sperimentalmente da Arrighi et al. (2019).

Lo stesso tipo di analisi può essere eseguita per valutare la stabilità di una persona in piedi su una barriera o un pennello con cresta al livello del mare. Ipotizzando che l'opera di difesa sia posizionata ad una profondità di 2-3 m, da questa relazione si può stimare che una lama d'acqua di altezza di soli 20 cm, raggiunta anche solo una volta nel corso della mareggiata, è sufficiente a provocare la caduta di una persona.

Bibliografia

- Aminti P., Cammelli C., Cappietti L., Jackson N.L., Nordstrom K.F. e Pranzini E., 2004. *Evaluation of Beach Response to Submerged Groin Construction at Marina di Ronchi, Italy, Using Field Data and a Numerical Simulation Model*. Journal of Coastal Research, Vol. 33, 99-120.
- Anfuso G., Pranzini E., Vitale G., 2011. *An integrated approach to coastal erosion problems in northern Tuscany (Italy): littoral morphological evolution and cell distribution*. Geomorphology, 129: 204-214.