

## Opere di protezione costiera a basso impatto ambientale: i ripascimenti protetti

Alessandra Saponieri, Leonardo Damiani

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio, Edile e di Chimica,  
Politecnico di Bari, via Amendola, 126, 70125

### Riassunto

Nel presente lavoro si riportano i principali risultati ottenuti durante una campagna sperimentale condotta presso il Laboratorio di Ingegneria Costiera del Politecnico di Bari. Le attività sperimentali mirano ad analizzare gli effetti del sistema di drenaggio spiagge accoppiato ad una barriera sommersa ad elevata sommergezza sull'evoluzione trasversale a breve termine di un ripascimento artificiale, in condizioni ondose erosive. Le prove su modello fisico 2D sono state condotte in condizioni di spiaggia non protetta e protetta, a partire dallo stesso profilo iniziale sino al raggiungimento dell'equilibrio. L'influenza dei due sistemi sui processi sottocosta è stata analizzata osservando il comportamento del sistema di drenaggio spiagge e della barriera sommersa prima separatamente e poi congiuntamente, al fine di poter scindere gli effetti di ciascun intervento sul trasporto dei sedimenti. I risultati mostrano che in presenza del sistema di drenaggio e della barriera sommersa si verifica una riduzione dell'arretramento della linea di riva con deposizione dei sedimenti nei bassi fondali, intercettati dalla presenza della struttura e quindi, potenzialmente utili per il rimodellamento della spiaggia, senza ulteriore aggravio nei costi di gestione di un ripascimento. Le misure acquisite sul modello fisico hanno consentito l'analisi delle capacità predittive del modello numerico XBeach per lo studio dell'evoluzione del profilo trasversale del ripascimento non protetto, nelle condizioni testate in laboratorio. La sensitività del modello è stata dapprima valutata in relazione alla discretizzazione spaziale della griglia e alla condizione ondosa al contorno, consentendo la definizione di un modello di base per la successiva fase di calibrazione. La calibrazione del modello è stata condotta confrontando l'evoluzione temporale del profilo trasversale del ripascimento, al variare dei principali parametri coinvolti nella modellazione analitica dei processi di idrodinamica e morfodinamica.

**Parole chiave:** barriere sommerse, drenaggio delle spiagge, ripascimenti artificiali, trasporto solido, XBeach.

### Abstract

*In the present work an alternative approach for protecting sandy beach nourishment is proposed. The short-term morphological evolution of a beach nourishment profile under erosive wave conditions is investigated in presence of a mixed defence system. Such a system is composed by a drain pipe placed inside the beach in the swash zone, parallel to the shoreline, and a submerged rubble mound breakwater characterized by a high freeboard below the mean water level, namely equal to 90% of the offshore significant wave height.*

*A new experimental campaign has been performed at the Coastal Engineering Laboratory of the Technical University of Bari (Bari, Italy). Tests on 2-D small scale physical model (according to Froude analogy, 1:10) have been conducted on both unprotected and protected sandy beach nourishment starting from the same initial profile up to equilibrium conditions (16-19 hours in model scale). The drainage system and the submerged barrier have been tested firstly separately and then deployed together, in order to be able to separate the effects of each defence system on the cross-shore sediment transport. Both the defense systems induce a landward main sediment transport, in*

*correspondence of the submerged breakwater and the sand bar. Moreover, both systems induce a slower shoreline withdraw and, specifically, the drainage system a reduction of the beach face slope. The experimental measurements have allowed a preliminary calibration of the XBeach numerical model (Roelvink et al., 2009), in order to investigate the model accuracy in reproducing the evolution of the unprotected nourishment profile. The model sensitivity was preliminary evaluated as a function of spatial computational grid discretization and wave boundary conditions, thus allowing the definition of a base-model for the further calibration of the numerical model. The calibration of the XBeach model was carried out by comparing the measured and modelled temporal evolution of the cross-shore nourishment profile, by varying the main parameter involved in both hydrodynamic and morphodynamic analytical models. The results show that the calibrated model is able to reproduce the bottom evolution and the hydrodynamics along the flume, namely in terms of significant wave height, even if some uncertainties can be observed on the formation of submerged sandbar, which is not properly recognized by the model.*

**Keywords:** beach drainage, nourishments, sediment transport, submerged breakwaters, XBeach.

## Introduzione

Negli ultimi anni la riqualificazione dei waterfront rappresenta un tema di grande attualità che coinvolge grandi e piccole realtà urbane affacciate sul mare, al fine di sfruttare le potenzialità che le zone costiere offrono. Le strategie di pianificazione e gestione della fascia costiera mirano al recupero della qualità ambientale la quale ha visto un graduale depauperamento in seguito all'eccessivo carico antropico. Nasce, dunque, l'esigenza di tutelare gli ambienti costieri, particolarmente fragili poiché soggetti a fenomeni di erosione e inondazione che ne alterano la stabilità, nonché la qualità ambientale e, dunque, il valore economico. Risulta di particolare importanza la ricerca di soluzioni alternative e innovative in grado di valorizzare i waterfront, attraverso idonei piani di monitoraggio (e.g., Valentini et al., 2017a) e l'adozione di interventi di recupero sostenibili sia dal punto di vista ambientale che finanziario.

In quest'ottica, il risanamento delle aree costiere si traduce spesso nella realizzazione di ripascimenti artificiali (e.g., Di Risio et al., 2010), che permettono di ripristinare o conservare una adeguata estensione della spiaggia emersa e del sistema dunale, senza compromettere il paesaggio e pregiudicare l'attività di balneazione. Tali interventi necessitano di un accurato piano di gestione al fine di definire la sostenibilità finanziaria dell'opera, principalmente legata al tempo di vita.

Precedenti studi (e.g., Bowman et al., 2007; Damiani et al., 2009; Aristodemo et al., 2011; Saponieri et al., 2015) hanno dimostrato come la stabilità dei sedimenti nella zona di riva possa essere incrementata aumentando la capacità di filtrazione della spiaggia, attraverso l'installazione di un sistema di drenaggio delle spiagge (Saponieri, 2018a). Le esperienze di campo condotte sul territorio costiero italiano (e.g. Fontana et al., 2009) hanno permesso di comprendere l'influenza delle tubazioni drenanti sui processi di idrodinamica della zona di riva, mentre sono ancora incerti gli effetti sul trasporto dei sedimenti. I risultati delle sperimentazioni in campo hanno mostrato effetti positivi sulla stabilizzazione della spiaggia emersa, con la formazione di una berma tipica delle spiagge in ghiaia. D'altronde, la mancanza di un monitoraggio continuo e la dismissione di alcuni impianti per scarsa manutenzione non hanno consentito di verificarne gli effetti nel lungo periodo. Le prove di laboratorio (Contestabile et al., 2012) hanno mostrato un accumulo di sedimenti nella zona di riva in condizioni di bassa e media energia del moto ondoso. In presenza di onde energeticamente più alte, gli effetti del dreno sulla direzione prevalente di trasporto sembrano essere trascurabili.

Una nuova campagna sperimentale è stata condotta presso il Laboratorio di Ingegneria Costiera del Politecnico di Bari, con l'obiettivo di analizzare gli effetti del sistema di drenaggio accoppiato ad una barriera sommersa ad elevata sommergezza (c.a. - 1.80 m) sull'evoluzione trasversale a breve termine di un ripascimento, in condizioni ondose erosive. Le prove su modello fisico 2-D in scala geometrica indistorta di Froude 1:10 sono state condotte in condizioni non protette e protette a partire dallo stesso profilo iniziale sino al raggiungimento del profilo di equilibrio (16-19 ore in scala modello).

Nel presente lavoro si riportano i principali risultati ottenuti dalla campagna sperimentale e i risultati derivanti dall'applicazione del modello numerico XBeach (Roelvink et al., 2009) a valle delle analisi di sensitività e calibrazione rispetto le misure acquisite in laboratorio durante la campagna sperimentale. Attualmente, XBeach è utilizzato per lo studio dell'evoluzione dei litorali a seguito della azione delle mareggiate in differenti condizioni ondose, in presenza o in assenza di strutture di difesa della costa (e.g. Berard et al., 2017;

Muller et al., 2018; Saponieri et al., 2018b), considerando, a differenza di altri modelli di risoluzione dell'idrodinamica in acque basse in condizioni non idrostatiche (e.g. SWASH, Zijlema et al., 2011; Celli et al., 2018; Damiani et al., 2018), l'influenza sull'evoluzione del fondale.

### Set-up sperimentale

#### Il modello fisico

Il Laboratorio di Ingegneria delle Coste del Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, del Territorio, Edile e di Chimica (DICATECh) afferente al Politecnico di Bari occupa una superficie coperta di circa 12500 mq e possiede due vasche e due canali per modelli fisici costieri ed un canale per la generazione di getti di superficie (Damiani et al., 2002). Il canale utilizzato per i test sperimentali è lungo 50 m, largo 2.5 m e profondo 1.2 m. E' dotato di un generatore di moto ondoso 2-D dell'HR Wallingford costituito da 1 modulo con 4 pale, ciascuna di larghezza 0.6 m. Le pale si muovono con moto di pura traslazione, in modo indipendente in grado di generare un fronte d'onda lungo 2.4 m ed una altezza d'onda massima di 0.3 m, con un tirante idrico di 0.8 m.

Di seguito si riporta una breve descrizione del modello, dei test e degli strumenti adottati per la misura delle grandezze idrodinamiche e dell'evoluzione del fondale. Maggiori dettagli sono riportati in Saponieri et al. (2018c).

Il profilo di spiaggia (Fig. 1), a partire dal generatore ondoso, è costituito da un tratto orizzontale a fondo fisso lungo circa 20 m, coincidente con il fondo del canale, seguito da un tratto di 9 m a pendenza 1:30. Successivamente, il profilo assume, per 5.20 m, la pendenza di progetto tipica per un ripascimento artificiale pari a 1:8, raggiungendo la berma emersa, orizzontale, che si estende per 2.5 m, posta a +0.15 m al di sopra del livello medio di acqua nel canale (0.8 m).

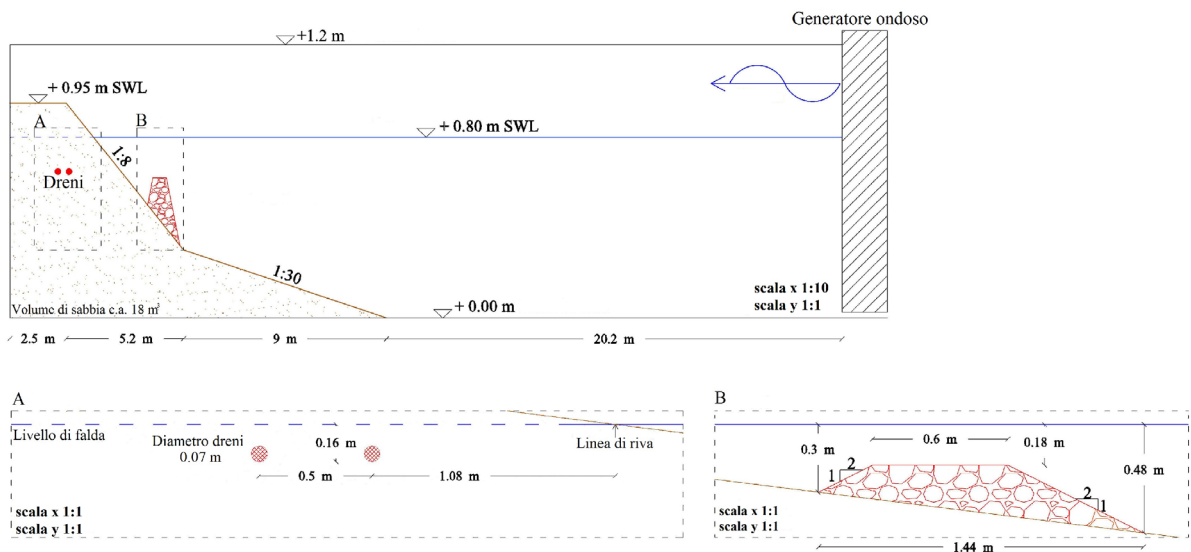


Figura 1. Geometria del modello fisico.

La sabbia utilizzata per realizzare il profilo di spiaggia è a granulometria uniforme classificata, secondo la scala Udden-Wentworth, come sabbia medio-fine con diametro medio ( $d_{50}$ ) pari a 0.227 mm, permeabilità ( $k$ ) di  $4.08 \cdot 10^{-5}$  m/s e velocità di caduta ( $\omega_s$ ) pari a 0.028 m/s. Il sistema di drenaggio (Fig. 2a) è costituito da due dreni installati parallelamente alla linea di riva (l.d.r.) all'interno della spiaggia, a circa 0.165 m al di sotto del livello statico di falda (1.65 m in scala prototipo), di lunghezza pari alla larghezza del canale (c.a. 2.5 m) e diametro pari a 0.07 m (0.70 m in scala prototipo). Le distanze dei tubi rispetto alla l.d.r. sono, rispettivamente, pari ad 1 m (10 m in scala prototipo) e 1.50 m (15 m in scala prototipo).



Figura 2. (a) Sistema di drenaggio posizionato all'interno della spiaggia, (b) Barriera sommersa.

La realizzazione di una barriera sommersa (Fig. 2b) ad elevata sommergenza ha il duplice obiettivo di trattenerne i sedimenti trasportati verso il largo e ridurre l'energia delle onde più alte, in presenza delle quali precedenti sperimentazioni sul BDS hanno dimostrato poca influenza dello stesso. In scala modello la barriera è stata realizzata ad una distanza di 2.4 m dalla l.d.r., con una cresta larga 0.6 m e una sommergenza di -0.18 m, ossia pari al 90% dell'altezza significativa nominale generata.

La strumentazione utilizzata è stata scelta al fine di poter misurare le grandezze idrodinamiche e morfodinamiche inerenti l'obiettivo della ricerca: 1 stazione totale per la misura del fondale con passo pari a 0.05 m e intervalli temporali ad elevata risoluzione sino alla condizione di equilibrio; 7 sonde resistive per la misura delle elevazioni della superficie libera dell'acqua; 6 trasduttori di pressione e 9 piezometri per la misura dei livelli di pressione interstiziali all'interno della spiaggia; 4 trasduttori di pressione per la misura della pressione all'interno e all'esterno delle tubazioni drenanti; 1 trasduttore di pressione all'interno del pozzetto di raccolta dell'acqua drenata; 1 Vectrino e 1 Vectrino profiler per la misura 3D delle velocità; 1 camera ad alta risoluzione per l'acquisizione dei video durante le prove sperimentali, al fine di estrarre la variazione della l.d.r. ed il flusso di risalita sulla spiaggia; 4 sensori ultrasonici nella configurazione con la barriera sommersa, al fine di comprendere le potenzialità degli strumenti per la misura del flusso di risalita sulla spiaggia.

### *Caratteristiche delle prove sperimentali*

Le prove sono state effettuate su 5 configurazioni differenti di ripascimento, in condizioni di spiaggia protetta e non protetta. La configurazione con il dreno posizionato più vicino rispetto alla posizione iniziale della l.d.r. (1 m) ha mostrato una ridotta efficacia nella stabilizzazione dei sedimenti, confermando quanto già evidenziato nelle precedenti sperimentazioni (Damiani et al., 2011). Per questo motivo gli effetti della barriera sommersa sono stati successivamente investigati solo in accoppiamento con il dreno posto a 1.5 m dalla posizione iniziale della l.d.r., ossia all'interno della zona di filtrazione attiva della spiaggia, delimitata dal limite di run-up massimo, che in tutte le prove ha assunto valore pari a +0.15 m sul l.m.m., interessando il tratto di spiaggia orizzontale (emerso).

In Tabella 1 si riportano le principali caratteristiche delle prove sperimentali condotte, in termini di altezza significativa ( $H_s$ ,  $H_{m0}$ ) e periodo di picco ( $T_p$ ) delle onde al largo. L'evoluzione morfodinamica del profilo di ripascimento sino alla condizione di equilibrio e gli effetti dei sistemi di protezione sui processi di idrodinamica sottocosta sono stati analizzati in condizioni ondose di carattere erosivo di tipo irregolare con spettro JONSWAP.

Tabella 1. Caratteristiche dei tests.

Test	Test ID	$H_s$ (m)	$H_{m0}$ (m)	$T_p$ (s)
Non protetto	UNP	0.187	0.206	1.47
Dreno 1	BDS	0.183	0.206	1.47
Dreno 1 + Barriera sommersa	BDS-BW	0.19	0.212	1.47
Barriera sommersa	BW	0.188	0.208	1.47

### Risultati sperimentali

Nella Figura 3 sono riportati i profili finali misurati in condizioni non protette e protette. Come previsto, l'evoluzione morfologica del profilo della spiaggia è più rapida nelle prime ore, per poi rallentare sino alla condizione di equilibrio, in corrispondenza della quale non si è osservata alcuna variazione sostanziale nel trasporto dei sedimenti. Tale condizione si raggiunge dopo circa 13 ore in condizioni di spiaggia protetta e 16 ore in condizioni di spiaggia non protetta.

In condizioni di spiaggia naturale (non protetta) e difesa dal sistema di drenaggio, nella zona dei frangenti, il trasporto dei sedimenti è prevalentemente diretto verso il largo, contenuto all'interno della zona attiva con la formazione di due barre sommerse che si sono evolute durante le prove fino a raggiungere la posizione e la forma di equilibrio. La presenza della barriera (in condizioni drenate e non, SBW e BDS-SBW) ha indotto la formazione di una barra sommersa nel primo stadio dell'evoluzione del profilo. Successivamente, la migrazione della barra in direzione offshore è stata intercettata dalla struttura sommersa. La tipica forma di barra sommersa è scomparsa e il profilo ha assunto una conformazione ad S (Fig. 3).

L'elevata risoluzione spaziale e temporale dei rilievi del fondale ha permesso di analizzare la portata di trasporto del sedimento per unità di area ( $m^3/s \cdot m$ ) mediante l'equazione di Exner (e.g., Baldock et al., 2017). La variazione spaziale della portata netta di trasporto dei sedimenti  $q_s(x_i)$  in corrispondenza della coordinata  $x_i$  è quindi espressa in funzione dell'evoluzione temporale del fondo e della porosità del materiale, assunta costante (Eq. 1):

$$q_s(x_i) = q_s(x_{i-1}) - (\Delta z / \Delta t) \Delta x \quad (1)$$

dove  $\Delta x$  e  $\Delta t$  rappresentano, rispettivamente, la discretizzazione spaziale e temporale dei rilievi.

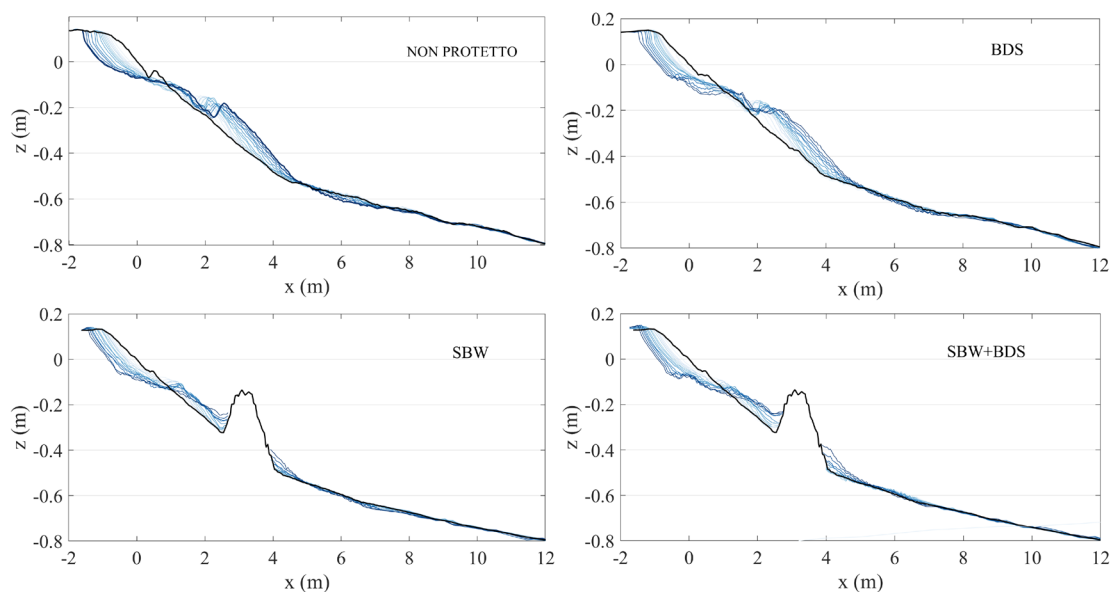
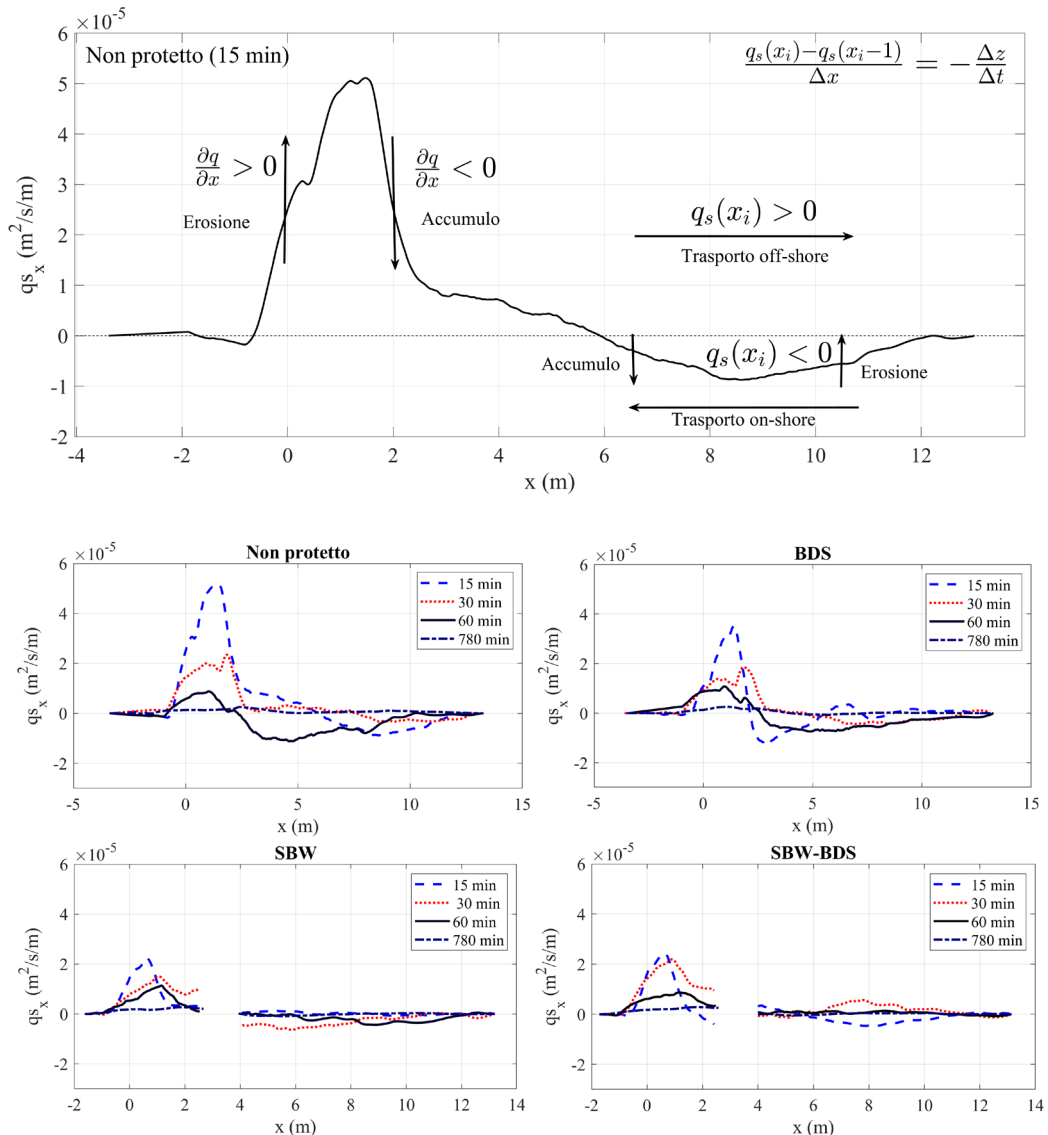


Figura 3. Evoluzione temporale del profilo di spiaggia nelle configurazioni UNP, BDS, SBW, and BDS-SBW.

Nelle Figura 4 le portate nette di trasporto solido per unità di lunghezza  $q_s(x_i)$  ( $m^3/s \cdot m$ ) sono riportate per tutte le configurazioni a passi temporali selezionati. Secondo l'equazione di Exner, il sistema di coordinate locale è assunto con l'asse x positivo verso il largo. I valori negativi si riferiscono al trasporto di sedimenti verso riva, mentre i valori positivi rappresentano il trasporto prevalente verso il largo (Fig. 4). Le informazioni sui flussi netti di trasporto dei sedimenti in ciascuna sezione possono essere recuperate considerando la derivata spaziale di  $q_s(x)$ , la quale misura la variazione nello spazio della velocità di trasporto. Pertanto, un aumento di  $q_s(x)$  in entrambi i quadranti (positivo o negativo) indica l'erosione del fondo, concentrata principalmente nelle zone di swash e surf. Valori negativi delle suddette derivate si osservano in corrispondenza

della barra sommersa nelle condizioni non protette e drenate, dove si è osservato un accumulo dei sedimenti. La Figura 4 mostra che in condizioni non protette il trasporto di sedimenti è principalmente diretto verso il largo. Nelle configurazioni BDS, BDS-SBW e SBW, entrambi i sistemi influenzano tale tendenza, invertendo la direzione del trasporto di sedimenti netti verso riva, rispettivamente nell'area vicino alla barra sommersa e alla barriera. Tale effetto è più pronunciato quando la barriera è accoppiata con il sistema di drenaggio. Dopo 60 minuti di esposizione alle onde, la portata solida si riduce in tutte le configurazioni e i sedimenti tendono a stabilizzarsi. La forma del profilo rimane pressoché invariata. Le modifiche sono dovute principalmente alla graduale redistribuzione dei sedimenti dalla spiaggia emersa alle acque poco profonde (zone di swash e surf) e in corrispondenza della barra sommersa offshore.



**Figura 4.** Variazione temporale delle portate solide nette per unità di area al variare della configurazione.

In Figura 5 si riporta la variazione temporale della posizione della linea di riva. Rispetto le condizioni non protette, entrambi gli interventi di protezione inducono un minore arretramento della l.d.r., più evidente in presenza della barriera sia in condizioni drenate che non drenate. Come evidenziato per l'evoluzione dei profili, l'arretramento della l.d.r. e l'aumento di pendenza sottocosta sono entrambi più rapidi durante l'ini-

zio dell'attacco ondoso per tutte le configurazioni. Dopo 180 minuti, la l.d.r. arretra del 50% circa, rispetto alla posizione finale. In condizioni di ripascimento non protetto si è osservato il massimo arretramento della l.d.r., dimostrando che la posizione del dreno posizionato più vicino alla l.d.r. non è utile e che il comportamento ricalca quanto osservato in condizioni naturali. In corrispondenza della diminuzione della portata solida netta, le velocità di arretramento della l.d.r. e l'aumento della pendenza della spiaggia diminuiscono, anche se entrambi i processi persistono. Rispetto la configurazione non protetta, in presenza del sistema di drenaggio nella configurazione BDS, si è osservato un arretramento della l.d.r. inferiore in presenza e assenza della barriera sommersa, e in presenza della sola barriera.

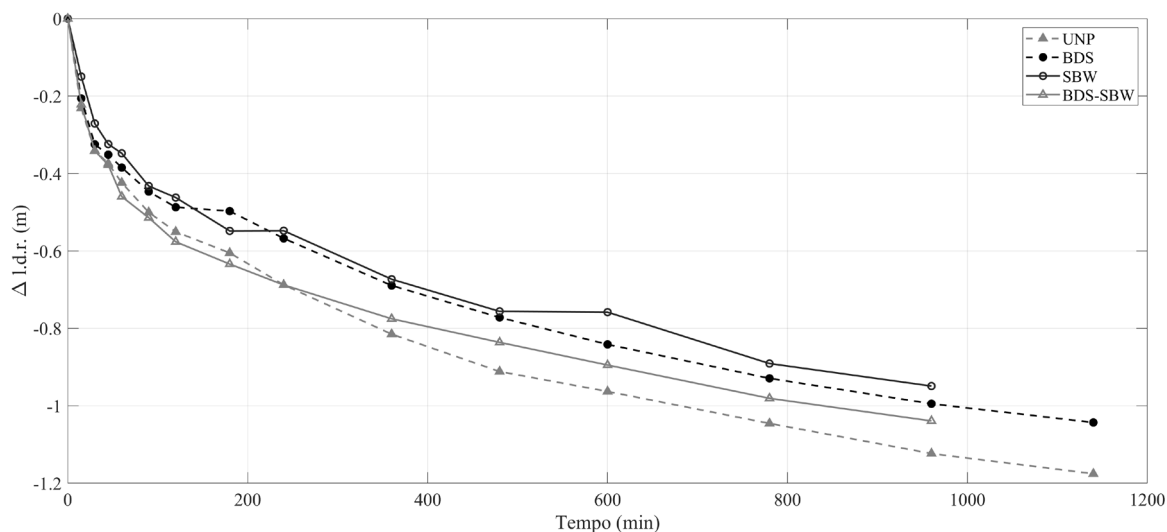


Figura 5. Variazione temporale della linea di riva.

### Il modello numerico XBeach

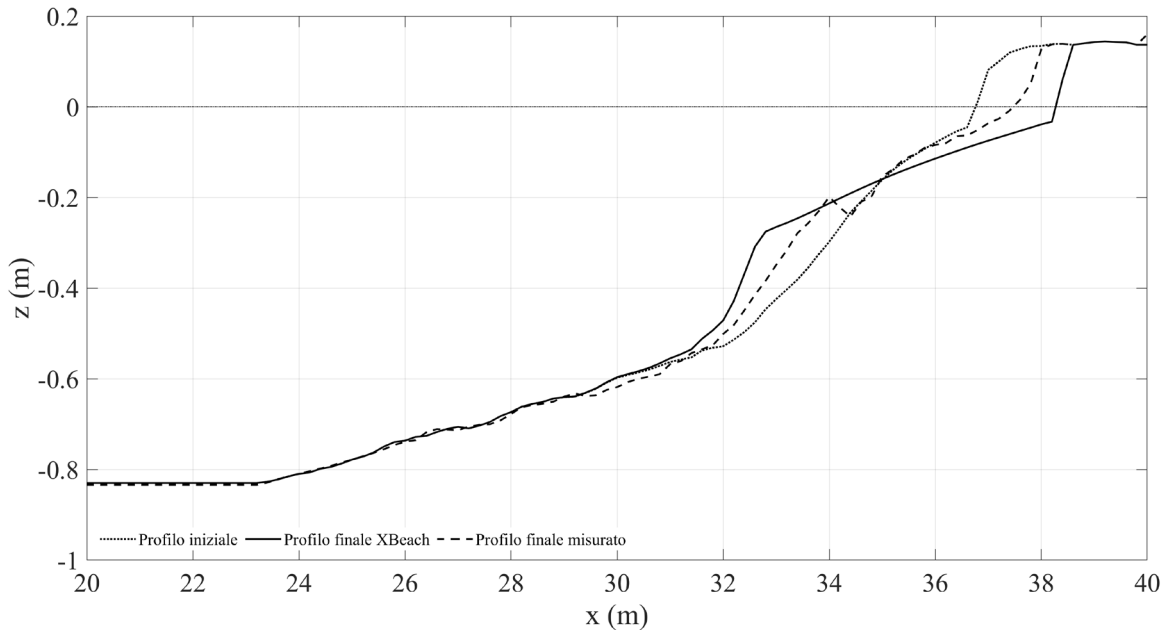
Le misure acquisite durante i test sperimentali in condizioni di ripascimento non protetto hanno permesso la calibrazione del modello numerico XBeach 1-D (Roelvink et al., 2009). Di seguito si riportano i risultati numerici delle variazioni del fondo e il confronto con le misure sperimentali.

Il modello numerico è stato applicato in modalità idrostatica non stazionaria (surf-beat), la quale consente la risoluzione delle onde corte e quindi considera gli effetti delle onde infragravitazionali e dei gruppi d'onda, imponendo al largo uno spettro di tipo JONSWAP. La durata è stata impostata pari a quella per la quale nel modello fisico non si sono registrate variazioni significative del fondo (13 h), con uno spin-up time di 60 s. La fase di validazione del modello è stata preceduta da una analisi di sensitività rispetto ai seguenti parametri: i) discretizzazione spaziale della griglia computazionale ( $dx$ ), ii) discretizzazione spaziale dello spettro di energia ondosa ( $d\theta$ ) e iii) tipologia delle condizioni al contorno in corrispondenza della zona di generazione del moto ondoso (*front*). La condizione al contorno in corrispondenza della spiaggia è stata imposta di assorbimento in tutti i casi. Sono state implementate tre griglie uniformi con passo  $dx$  costante, pari a 0.05 m, 0.1 m e 0.2 m e una griglia non uniforme, con passo minimo (0.025 m) in corrispondenza della zona sottocosta e passo massimo (0.1 m) sulla restante parte del profilo. Si è inoltre valutata la sensitività del modello rispetto alla discretizzazione spaziale dello spettro di energia nella sezione di generazione, imponendo un intervallo pari a 180°, 45°, 30° e 10°.

La sensitività del modello è stata valutata considerando, al variare dei parametri scelti, le differenze dei risultati in termini di evoluzione del fondo ed evoluzione spaziale dell'altezza d'onda significativa, rispetto una condizione di riferimento prefissata. Il confronto con i risultati sperimentali è stato oggetto di analisi nella successiva fase di validazione. L'influenza di ciascun parametro è stata dunque valutata fissando una configurazione di riferimento e facendo variare separatamente gli altri due parametri nel range prefissato, quantificando le differenze attraverso il calcolo dello Scarto Quadratico Medio (SQM) e del Brier Skill Score

(BSS). L'analisi di sensitività rispetto ai tre parametri ( $dx$ ,  $d\vartheta$ ,  $front$ ) ha permesso di definire il modello di riferimento per le simulazioni successive di validazione.

In Figura 6 si riporta il confronto tra il profilo finale misurato e quello derivante dall'applicazione del modello definito a valle dell'analisi di sensitività e caratterizzato da una griglia computazionale a passo costante di 0.2 m, una discretizzazione spaziale dello spettro nella sezione di generazione pari a  $30^\circ$  e condizione al contorno di assorbimento. Nessuna modifica rispetto alle condizioni di default è stata apportata per gli altri parametri.



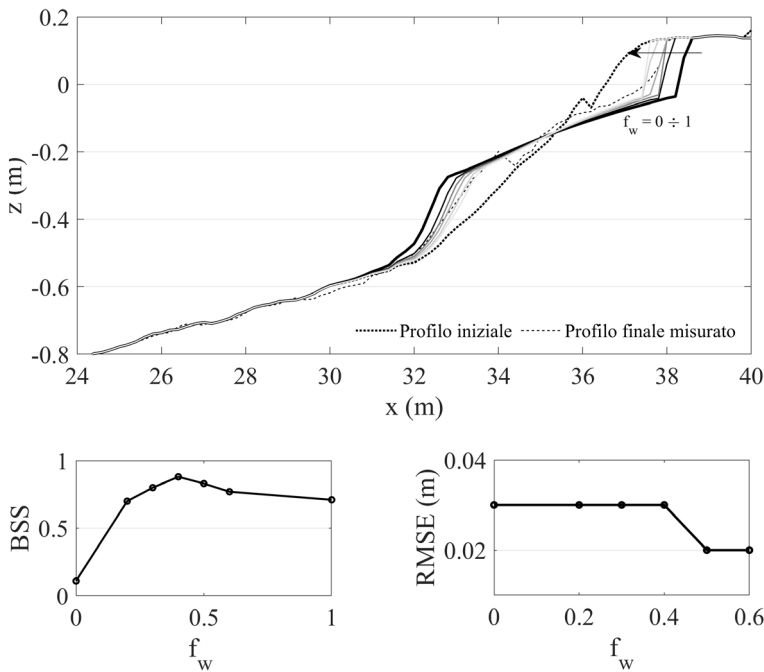
**Figura 6. Confronto tra il profilo misurato e modellato in condizioni di default.**

La calibrazione del modello è stata condotta rispetto ai parametri indicati in Tabella 2, secondo l'approccio *one at the time* (Simmons et al., 2017), confrontando il profilo modellato con quello misurato e quantificando le differenze mediante SQM e BSS. Dal parametro  $f_w$  dipende proporzionalmente il calcolo di aliquota di energia dissipata durante la propagazione delle onde. Si nota difatti come all'aumentare di  $f_w$ , corrisponda una riduzione del trasporto solido verso il largo (Fig. 7). Il valore massimo di BSS è stato osservato per  $f_w=0.4$ , superato il quale si riduce, indicando una sottostima del processo erosivo. A tale valore non corrisponde il valore minimo di SQM, confermando come tale parametro può risultare non significativo se considerato singolarmente per il confronto tra valori misurati e modellati del fondo. Il parametro  $facua$  migliora la risposta del modello agli effetti della non linearità dell'onda (asimmetria e skewness), influenzando i fenomeni di trasporto dei sedimenti (e.g., Vousdouskas et al., 2013). La miglior riproduzione del profilo di spiaggia, invece, si ottiene per valori di  $facua$  compresi fra 0.50 e 0.75, ove il BSS supera 0.8 (Fig. 8). Successivamente, fissato il valore di  $f_w=0.4$ , si è fatto variare il parametro  $facua$  in un intorno di  $0.55 \pm 0.1$ , consentendo di valutare la migliore combinazione dei due parametri  $f_w$  e  $facua$  rispettivamente pari a 0.4 e 0.55, per i quali il BSS assume il valore massimo (0.83).



**Tabella 2. Parametri di calibrazione.**

Parametri	Descrizione	Default	Range
$f_w$	Attrito legato alle onde corte.	0	0-1
$facua$	Asimmetria e distorsione dell'onda.	0.1	0-1
$break$	Formulazione del frangimento.	<i>roelvink2</i>	<i>roelvink1, 2</i>
$gamma$	Parametro di frangimento.	0.55	0.40-0.90
$bedfriccoef$	Coefficiente di attrito al fondo.	55	20-100
$wetslp$	Pendenza critica sotto il livello del mare.	0.30	0.10-1.00
$dryslp$	Pendenza critica sopra il livello del mare.	1	0.10-1.00
<i>Reposeangle (deg)</i>	Angolo di riposo del materiale.	30	0-50



**Figura 7. Confronto tra il profilo misurato e modellato al variare del parametro  $f_w$ .**

Come evidenziato ad esempio da Roelvink et al. (2009), la formulazione per il frangimento utilizzata nella modellazione numerica può avere un effetto determinante sui risultati ottenuti, poiché le due formulazioni proposte (*roelvink1* e *roelvink2*) si differenziano nel calcolo dell'indice di frangimento. In Figura 9 si riportano il profilo misurato e quello modellato al termine delle 13 h, con valori di  $f_w$  e  $facua$  di default (curve continue) e calibrati (curve tratteggiate) utilizzando la formulazione per il calcolo della dissipazione di energia al frangimento di *roelvink2* (in nero) e *roelvink1* (in grigio). Per entrambe le formulazioni di frangimento, si è confrontata la risposta del modello, considerando i valori di  $f_w$  e  $facua$  di default e quelli calibrati. Il valore del BSS è sensibilmente maggiore nel secondo caso per entrambe le formulazioni adottate per il frangimento. Indipendente dai valori assunti di  $f_w$  e  $facua$ , l'uso della formulazione per il calcolo della dissipazione di energia al frangimento secondo *roelvink2* (default), causa un maggiore arretramento della l.d.r. poiché la dissipazione energetica  $D_w$  legata alle turbolenze dell'onda è minore rispetto la formulazione *roelvink1* (e.g., Simmons et al., 2017). Nello specifico caso, la formulazione *roelvink2* è stata scelta poiché mostra valori di BSS più vicini all'unità.

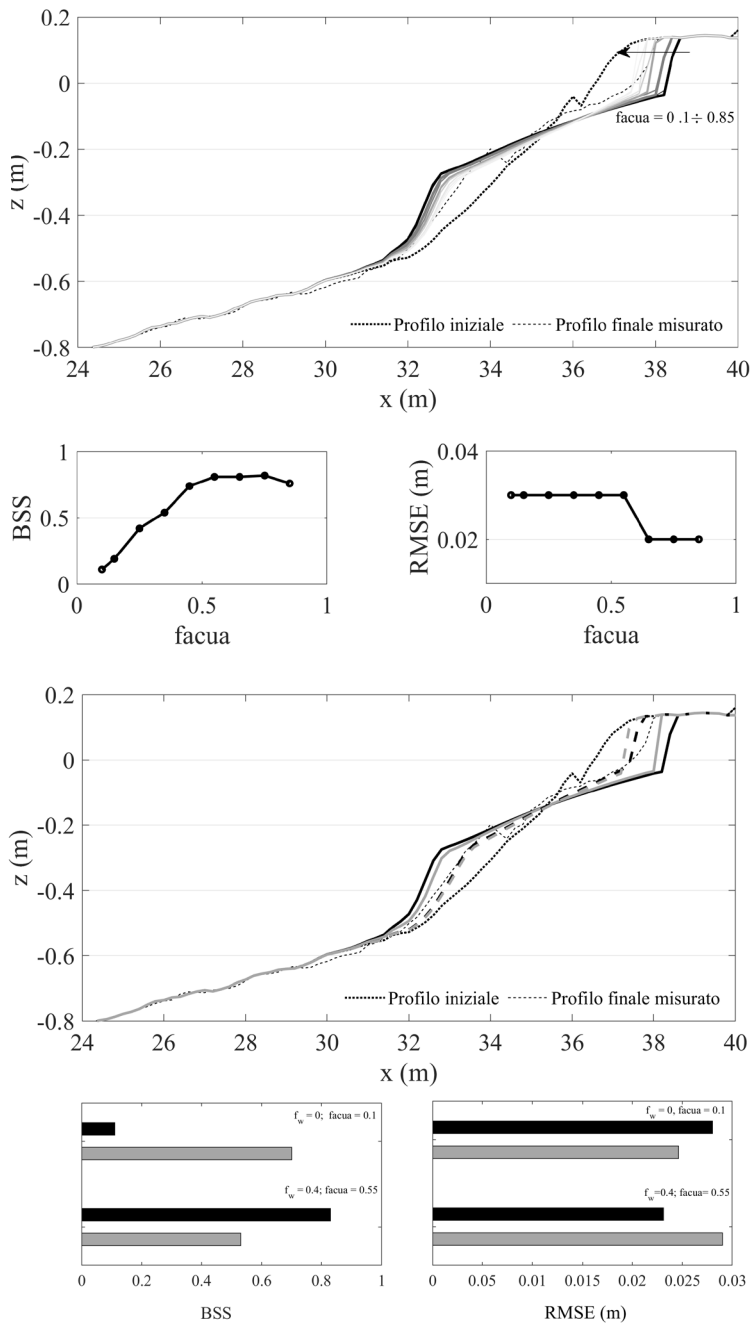


Figura 8. Confronto tra il profilo misurato e modellato al variare del parametro *facua*.

Figura 9. Confronto tra il profilo misurato e modellato al variare della formulazione di frangimento,  $f_w$  e *facua*.

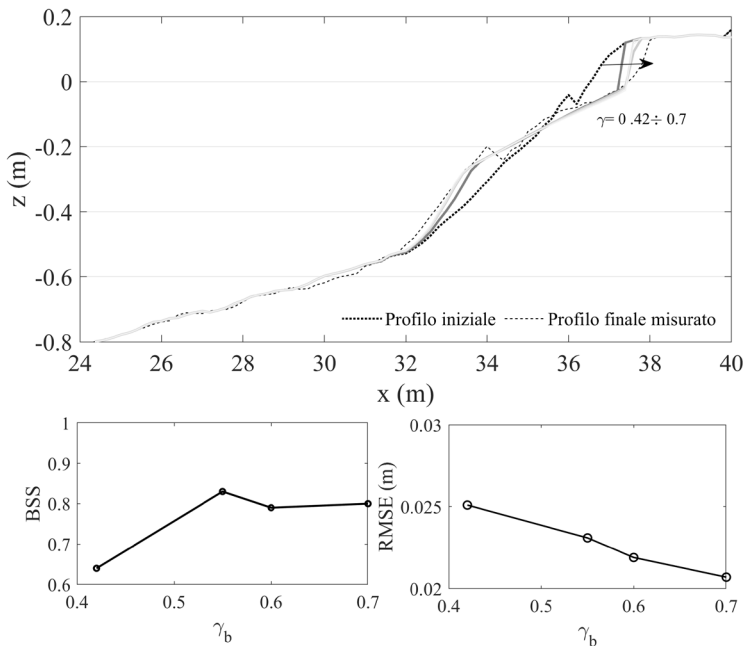
I risultati del modello sono stati inoltre analizzati al variare dell'indice di frangimento  $\gamma$  che compare nella formulazione adottata *roelvink2*, ed assunto pari a 0.42, 0.55 (default), 0.6 e 0.7 (Fig. 10). Il valore minimo di  $\gamma$  pari a 0.42, scelto in quanto suggerito da Simmons et al. (2017), restituisce BSS minore. In questo caso di studio è lecito aspettarsi che al crescere di  $\gamma$  le simulazioni restituiscano profili più simili a quello misurato in laboratorio, data la generale sovrastima del fenomeno erosivo in condizioni di default ( $\gamma = 0.55$ ). Si osserva, difatti, un aumento del BSS all'aumentare dell'indice di frangimento  $\gamma$ , che raggiunge il valore massimo (BSS = 0.83) in corrispondenza del valore di default. Per valori di gamma superiori, il BSS si riduce, restando comunque circa uguale a 0.8.

Nelle simulazioni analizzate precedentemente, si è notato come XBeach non riesca a modellare la formazione

della barra sommersa, con effetti sull'idrodinamica nella zona di frangimento. Durante gli esperimenti, si è osservato un innalzamento di  $H_s$  in corrispondenza della barra sommersa, indotto dalla riduzione di profondità, cui segue il frangimento dell'onda per raggiunto limite di profondità.

Il modello è stato calibrato in relazione ad alcuni parametri che rientrano nella formulazione dei processi di morfodinamica simulati da XBeach. Simmons et al. (2018) sottolineano l'esigenza di valutare la risposta del modello al variare del coefficiente di attrito al fondo (*bedfriccoef*), qualora si utilizzi la formula di Chezy, la cui calibrazione può sensibilmente migliorare i risultati.

In Hartley e Simmons (2016) si evidenzia come la morfodinamica del profilo di spiaggia possa essere influenzata dalla pendenza critica di movimentazione delle particelle solide che il modello considera *wet* (bagnate) o *dry* (asciutte), a seconda che si trovino al di sotto o al di sopra del livello del mare. Dunque, è possibile perfezionare le pendenze del profilo post-mareggiata ricercando valori ottimali dei valori di *wetslp* e *dryslp*. Ove non si conosca il valore dell'angolo di riposo del materiale, ossia l'inclinazione di naturale declivio di



**Figura 10. Influenza dell'indice di frangimento ( $\gamma$ ) sull'evoluzione del profilo.**

un materiale rispetto all'orizzontale, è possibile agire calibrando anche il parametro *reposeangle* per trovare un profilo finale che meglio approssimi la reale evoluzione del profilo di spiaggia. In Tabella 3 si riportano i valori dei suddetti parametri utilizzati, tra i quali in grassetto sono indicati i valori scelti a valle della calibrazione del modello. In Tabella 2 sono riportati i relativi valori di default.

Al variare del coefficiente di attrito non sono state osservate variazioni significative del profilo. Nessun miglioramento nella modellazione della barra sommersa, con valori di BSS lungo tutto il profilo medio-alti, variabili da un minimo di 0.7 ad un massimo di 0.83 in corrispondenza del valore di default. Non è stato possibile individuare un andamento univoco tra il coefficiente di attrito e le statistiche adottate per valutare l'accuratezza del modello.

L'angolo di riposo è stato fatto variare nel range 30° - 40° in quanto per terreni incoerenti l'angolo di riposo può variare fra 30° e 38°, fino ad un massimo di 40° qualora si parli di sabbia bagnata. I profili modellati conservano sostanzialmente lo stesso andamento al variare dell'angolo di riposo, che si dimostra un parametro non influente nel caso oggetto di studio. Il BSS presenta un leggero calo all'aumentare di  $\phi$  ma l'andamento è comunque abbastanza regolare e non presenta evidenti picchi minimi o massimi.

Tabella 3. Parametri morfodinamici di calibrazione.

Parametro	Valori
<i>bedfriccoef</i>	20-45-55-65-75-100
<i>Reposeangle (deg)</i>	30-35-37-40
<i>wetslp</i>	0.10-0.25-0.30-0.50-0.75-1.00
<i>dryslp</i>	0.25-0.50-0.75-1.00

I valori di pendenza critica al di sopra e al di sotto del livello medio del mare sono stati variati secondo quanto indicato in letteratura (e.g. Voudouskas et al., 2013; Hartley e Simmons, 2016). Mentre non si è osservata alcuna variazione significativa del profilo al variare del parametro *wetslp* a parità di *dryslp* (default), si è osservato un miglioramento del modello sulla modellazione dell'evoluzione del tratto emerso di spiaggia modificando la pendenza critica della parte emersa. Riducendo il valore di *dryslp* a 0.25 rispetto al valore di default =1, si ottiene una pendenza del tratto di spiaggia emersa nell'intorno della l.d.r. minore, più simile a quanto osservato in laboratorio, al quale corrisponde il valore di BSS massimo (0.90).

In Figura 11 si riporta il confronto del profilo finale misurato e di quello ottenuto dal modello calibrato, per il quale sono stati calcolati un BSS pari a 0.91. XBeach, pur comprendendo i processi necessari a modellare il comportamento della barra, non simula correttamente la sua formazione, poiché carente nella simulazione degli effetti della miscelazione verticale da turbolenza (Trouw et al., 2012). Il profilo modellato restituisce un andamento medio della zona ove nel modello fisico si ha la formazione del sistema barra-truogolo. La profondità di chiusura viene modellata correttamente.

In Figura 11 è mostrata, inoltre, l'evoluzione del profilo nel tempo in corrispondenza degli step temporali di misura del modello fisico, con i relativi valori di BSS, mostrando come questo aumenti al tendere del profilo alla configurazione di equilibrio. Tale variazione nel tempo del BSS è principalmente motivata dalla formazione della barra sommersa che compare già dopo i primi 15 minuti di test, e che, soggetta all'azione del moto ondoso, migra verso il largo fino a raggiungere una configurazione di equilibrio ( $x_b$ , Fig. 11). In corrispondenza di tale configurazione, pur non essendo in grado di modellare la barra, la modellazione dei volumi può essere considerata soddisfacente.

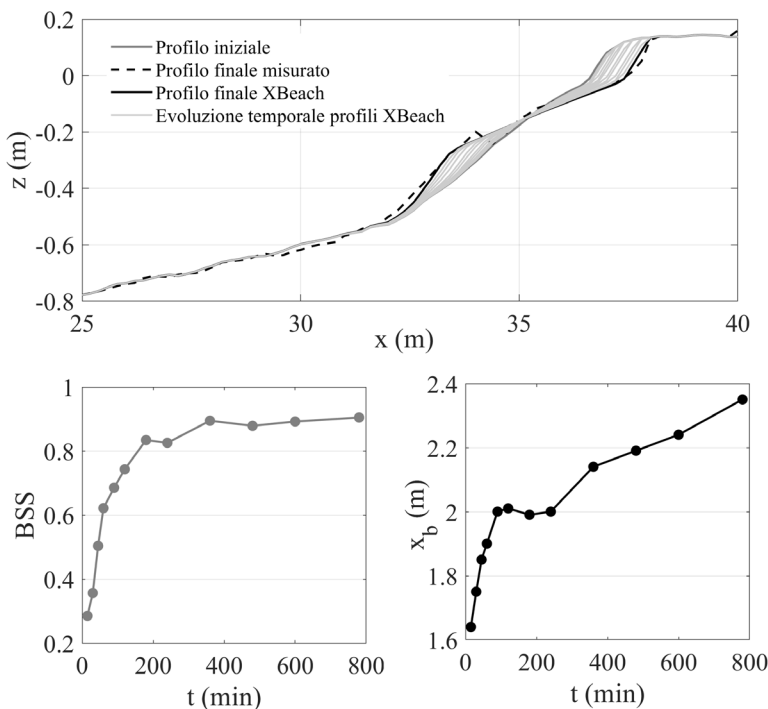


Figura 11. Evoluzione temporale dei profili modellati, BSS e posizione trasversale della barra misurata ( $x_b$ ) rispetto la posizione iniziale della linea di riva.

## Conclusioni

Nel presente lavoro si riportano i risultati principali ottenuti da una campagna sperimentale in corso presso il Laboratorio di Ingegneria delle Coste del Politecnico di Bari. La novità della ricerca consiste nel valutare l'affidabilità dell'approccio misto nella stabilizzazione della spiaggia. L'idea di base è di trasformare le onde ad alta energia che si propagano da largo in onde a media/bassa energia nella zona di surf, attraverso la barriera sommersa, per migliorare l'efficienza del BDS e le prestazioni del ripascimento, aumentando la durata dell'intervento, senza influenzarne il basso impatto ambientale. Diverse grandezze idrodinamiche (elevazioni d'onda, velocità nella surf-zone, livello di falda all'interno della spiaggia, ecc.) sono state misurate al fine di poter correlare la risposta morfodinamica della spiaggia alle variazioni indotte sui processi di idrodinamica nelle differenti configurazioni esaminate. I risultati mostrano che in presenza del BDS e della barriera sommersa si verifica una riduzione dell'arretramento della linea di riva con deposizione dei sedimenti nei bassi fondali, intercettati dalla presenza della struttura e quindi, potenzialmente utili per il rimodellamento della spiaggia, senza ulteriore aggravio nei costi di gestione di un ripascimento. In presenza della barriera tali effetti sono più marcati anche se il sistema misto necessita di ulteriori sperimentazioni. L'elevata discretizzazione spaziale e temporale delle misure acquisite durante le prove sperimentali ha consentito una preliminare validazione del modello numerico XBeach per lo studio dell'evoluzione del profilo di ripascimento in condizioni non protette. La sensitività del modello è stata dapprima valutata in funzione delle condizioni al contorno nella sezione di generazione e della discretizzazione spaziale della griglia computazionale. Successivamente, la fase di calibrazione del modello è stata condotta confrontando il profilo finale modellato con quello misurato al variare di alcuni parametri riguardanti sia la modellazione dei processi di idrodinamica (e.g.,  $f_{acua}$ ,  $f_w$ ,  $breaking$ ) che di morfodinamica ( $dryslp$ ,  $reposeangle$ ,  $bedfriccoef$ ). I risultati confermano che il modello necessita di essere calibrato e che, nonostante la modellazione dei volumi possa essere considerata soddisfacente, il modello non è in grado di modellare la formazione della barra sommersa.

## Ringraziamenti

Le prove di laboratorio sono state in parte finanziate dalla Fondazione Puglia nell'ambito del progetto di ricerca SITAC e dal Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio del Mare nell'ambito del progetto STIMARE - CUP J56C18001240001.

## Bibliografia

- Baldock T., Birrien F., Atkinson A., Shimamoto T., Wu S., Callaghan D., Nielsen P. (2017) - *Morphological hysteresis in the evolution of beach profiles under sequences of wave climates-Part 1: observations*. Coastal Engineering, 128, 92–105.
- Berard N. A., Mulligan, R. P. da Silva, A. M. F., Dibajnia M. (2017) - *Evaluation of XBeach performance for the erosion of a laboratory sand dune*. Coastal Engineering, 125, 70-80.
- Bolle A., Mercelis P., Roelvink D., Haerens P., Trouw K. (2011) - *Application and validation of XBeach for three different field sites*. Coastal Engineering Proceedings, 1(32), 40.
- Bowman D., Ferri S., Pranzini E. (2007). *Efficacy of beach dewatering Alassio, Italy*. Coastal Engineering 54(11):791–800.
- Celli D., Pasquali D., De Girolamo P., Di Risio M. (2018) - *Effects of submerged berms on the stability of conventional rubble mound breakwaters*. Coastal Engineering, 136, 16-25.
- Contestabile P., Aristodemo F., Vicinanza D., Ciavola P. (2012) - *Laboratory study on a beach drainage system*. Coastal Engineering, 66: 50–64.
- Damiani L., Petrillo A. F. e Ranieri, G. (2002) - *Il Laboratorio di Ricerca e Sperimentazione per la Difesa delle Coste del Politecnico di Bari*. Studi costieri, 5, 97-106.
- Damiani L., Petrillo A., Saponieri A. (2009) - *Beach dewatering systems: modelling coastal ground-water flow*. In: Proceedings of the 33th IAHR congress Vancouver, vol 12223, pp 1–8
- Damiani L., Aristodemo F., Saponieri A., Verbeni B., Veltri P., Vicinanza D. (2011) - *Full-scale experiments on a beach drainage system: hydrodynamic effects inside beach*. Journal of Hydraul Research 49(suppl 1): 44–54.
- Damiani L., Saponieri A., Valentini N. (2018) - *Validation of swash model for run-up prediction on a natural embayed beach*. Ital. J. Eng. Geol. Environ. 2018, SI 1, 27–37.

- Di Risio M., Lisi I., Beltrami G. M., De Girolamo, P. (2010) - *Physical modeling of the cross-shore short-term evolution of protected and unprotected beach nourishments*. Ocean Engineering, 37(8-9), 777-789.
- Fontana E., Ciavola P., & Vicinanza D. (2009) - *Stabilizzazione di arenili in erosione tramite sistemi di drenaggio della battigia: casi studio in Italia*. Studi Costieri, 16, 123-144.
- Muller J. R. M., Figlus J., de Vries S. (2018) - *XBeach simulation of hybrid coastal protection: a galves-ton seawall test case*. Coastal Engineering Proceedings 1.36 (2018): 100.
- Roelvink D., Reniers A., Van Dongeren A. P., de Vries S., McCall R., Lescinski J. (2009) - *Modelling storm impacts on beaches, dunes and barrier islands*. Coastal engineering, 56(11-12), 1133-1152.
- Saponieri A. e Damiani L. (2015) - *Numerical analysis of infiltration in a drained beach*. International Journal of Sustainable Development and Planning, 10(4), 467-486.
- Saponieri A. (2018a) - *Beach Drainage*. Encyclopedia of Coastal Science, 2nd ed.; Finkl, CW, Makow-ski, C., Eds, 1-4.
- Saponieri A., Di Risio M., Pasquali D., Valentini N., Aristodemo F., Tripepi G., Damiani L. (2018b) - *Beach profile evolution in front of storm seawalls: a physical and numerical study*. Coastal Engineering Proceedings, 1(36), 70.
- Saponieri A., Valentini N., Di Risio M., Pasquali D., Damiani L. (2018c) - *Laboratory Investigation on the Evolution of a Sandy Beach Nourishment Protected by a Mixed Soft-Hard System*. Water, 10(9), 1171.
- Simmons J. A., Harley M. D., Marshall L. A., Turner I. L., Splinter K. D., Cox, R. J. (2017) - *Calibrating and assessing uncertainty in coastal numerical models*. Coastal Engineering, 125, 28-41.
- Trouw K., Zimmermann N., Mathys M., Delgado R., Roelvink D. (2012) - *Numerical modelling of hydrodynamics and sediment transport in the surf zone: a sensitivity study with different types of numerical models*. International Conference on Coastal Engineering (ICCE 2012), Santander, Spain, July 1-6 2012: pp. 1-12.
- Valentini N., Saponieri A., Damiani L. (2017) - *A new video monitoring system in support of Coastal Zone Management at Apulia Region, Italy*. Ocean & coastal management, 142, 122-135.
- Vousdoukas M. I., Ferreira Ó., Almeida L. P., Pacheco A. (2012) - *Toward reliable storm-hazard forecasts: XBeach calibration and its potential application in an operational early-warning system*. Ocean Dynamics, 62(7), 1001-1015.
- Zijlema M., Stelling G., Smit P. (2011) - *SWASH: An operational public domain code for simulating wave fields and rapidly varied flows in coastal waters*. Coastal Engineering, 58(10), 992-1012.

**Ricevuto il 29/07/2019**

**Accettato il 21/10/2019**