

MODELLAZIONE NUMERICA 2DH DI INTERVENTI DI RIPASCIMENTO SOTTOCOSTA

B.Zanutigh¹ & C. Zoppi²

- (1) DICAM-Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali, Università di Bologna, Italia, e-mail: barbara.zanutigh@unibo.it
(2) DICAM-Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali, Università di Bologna, Italia, e-mail: caterina.zoppi@gmail.com

SOMMARIO

Il contributo analizza schemi progettuali di ripascimento sulla spiaggia sommersa, a parità di volume di sabbia da versare. Si considerano diverse profondità di versamento e gradi di protezione dell'intervento. L'analisi comparativa – a partire dal profilo nativo – viene effettuata tramite modellazione numerica 2DH in termini di riduzione dell'onda incidente, variazione delle correnti lungo riva e trasporto solido indotto. Al fine di utilizzare dati realistici per la caratterizzazione del profilo di spiaggia, dei volumi e dei diametri di ripascimento, l'analisi è focalizzata sul sito di studio di Cesenatico, in Emilia Romagna.

1 INTRODUZIONE

Il ripascimento, grazie al modesto impatto ambientale (Nicoletti *et al.*, 2006) e al positivo effetto sulle attività ricreative, è senz'altro la tecnica ad oggi maggiormente utilizzata a scala Europea nell'ottica di una gestione sostenibile della costa. Il mantenimento di una costa sufficientemente larga e di bassi fondali dinanzi alla spiaggia emersa contribuisce significativamente alla dissipazione dell'onda in fase di risalita e quindi alla protezione del retro-spiaggia dalle inondazioni.

La disponibilità della risorsa sabbia assume quindi un ruolo cruciale nella pianificazione della difesa dei litorali, portando alla ricerca di fonti alternative alle cave a terra, ad alto impatto ambientale ed elevato costo di estrazione, quali i depositi al largo e le sabbie dragate da fiumi (Zoppi & Zanutigh, 2012). Le cave di sabbie relitte chimicamente e fisicamente compatibili sono peraltro di non facile reperimento e campagne recenti nel Nord Adriatico hanno evidenziato l'ampia disponibilità di materiale decisamente più fine rispetto ai sedimenti che tipicamente compongono le spiagge (Preti, 2009). Questo materiale andrebbe quindi a scivolare sulla spiaggia sommersa e sarebbe pertanto preferibile posizionarlo a progetto in acque basse, con tecnologie decisamente più costose ma di minore impatto ambientale (USACE, 1998).

E' oggetto di recente studio l'impatto del ripascimento sulle popolazioni bentoniche, che risultano particolarmente sensibili alle variazioni di pendenza della spiaggia emersa (Colosio *et al.*, 2007). Tale studio è di notevole rilevanza data la Direttiva Europea (Van Hoey, G. *et al.*, 2010) che tutela il *benthos* e lo associa agli indicatori di qualità delle acque e dunque all'idoneità all'uso ricreativo delle spiagge.

Per ottimizzare il materiale disponibile da cave al largo e contemporaneamente minimizzare gli impatti ambientali, si rende quindi necessario progettare ripascimenti sulla spiaggia sommersa a sortire un duplice effetto: dissipazione dell'energia ondosa indotta dal frangimento sul profilo ripasciuto e riduzione della celerità dell'onda a parità di distanza dalla riva.

Stanti gli effetti di scala e le problematiche reali di realizzare analisi complesse del trasporto solido in presenza di spiagge sabbiose, gli studi sperimentali sull'evoluzione delle spiagge sono limitati. Si menzionano in particolare l'analisi dell'evoluzione di profili di ripascimento protetto e non protetto a seguito di mareggiate, *Di Risio et al.* (2010), e la mappatura della evoluzione morfologica del fondale soggetto a onde e correnti nel laboratorio a larga scala dell'Engineer Research and Development Center, U.S. Army Corps of Engineers. Ancora meno numerosi sono gli studi del trasporto solido nella *swash zone* in campo, causa la difficoltà delle misure del sedimento in sospensione e del rimodellamento del profilo (*Larsson & al.*, 2004). Viceversa, i principali vantaggi dei modelli numerici consistono nella mancanza di effetti scala e nella possibilità di sottoporre a simulazione un'ampia gamma di condizioni a costi limitati, specialmente nel caso si utilizzino modelli bidimensionali alle acque basse (*de Vriend & al.*, 1993; *Zanuttigh*, 2007).

Obiettivo di questo lavoro è l'analisi della idromorfologia del litorale nel caso di interventi di ripascimento sulla spiaggia sommersa per la messa a punto di criteri progettuali per il loro dimensionamento. A tale scopo, si esegue un'analisi parametrica tramite modellazione numerica 2DH, confrontando schemi progettuali caratterizzati da diverse profondità di versamento e grado di protezione. Come sito di studio è stato scelto Cesenatico nella provincia di Forlì-Cesena. La struttura del contributo si compone della descrizione del sito di studio (Sezione 2), della metodologia di analisi (Sezione 3), della presentazione e discussione dei principali risultati (Sezione 4).

2 IL SITO DI STUDIO: CESENATICO

2.1 Breve descrizione ambientale del sito

Cesenatico (FC) è uno dei più antichi centri balneari della riviera romagnola, situato nell'alto Adriatico, fra Rimini e Ravenna, a circa 15 km ad Est di Cesena. Il suo litorale (Figura 1) si estende per circa 7 km, è orientato a 23° Nord ed è diviso in una zona Nord e una Sud dal porto canale. A causa dei problemi di erosione e inondazione del sito in esame, a partire dagli anni 70, sono state costruite le seguenti opere di difesa: barriere emerse a Sud del porto canale, barriere sommerse e pennelli a Nord.

A difesa dalle inondazioni sono state recentemente realizzate dalla Regione nel 2005 (*Brath*, 2007) delle "Porte Vinciane" a chiusura del porto canale, un sistema di pompaggio ad esse connesso, l'ampliamento del Canale Tagliata e la costruzione di una serie di bacini di laminazione.

E' inoltre prevista una periodica manutenzione delle spiagge a mezzo del posizionamento di dune durante i mesi invernali (alte circa 1.4 m) a difesa degli stabilimenti balneari e ripascimenti annuali, effettuati nelle zone a Nord e a Sud del porto, rispettivamente di 16'000 e 20'000 m³/anno circa.

Sulla base dei dati storici desunti dai profili rilevati dall' ARPA Emilia Romagna, il trasporto medio annuo è diretto da Sud a Nord con un'intensità mediamente pari a

30'000 m³/anno nella zona a Sud dei moli e 60'000 m³/anno nella zona a Nord dei moli. La spiaggia è caratterizzata da una pendenza media di 1/20 con una granulometria di 0.12 mm.



Figura 1. Vista aerea del sito di studio.

2.2 Clima ondoso tipico di Cesenatico

I differenti schemi, che saranno descritti nel seguito (Sezione 3), sono esaminati considerando il clima ondoso tipico ricostruito dalla statistica accoppiata delle condizioni di onda e marea. Tale statistica è stata effettuata sui dati desunti dal *down-scaling* regionale delle modellazioni SGA-CLM accoppiate al modello oceanografico globale ECHAM5/MPIOM (Umgiesser et al., 2011). Il clima ondoso tipico è sintetizzato dalle 7 onde riportate nella Tabella 1 per tre differenti scenari: breve, medio e lungo termine.

	H _s [m]	Dir [°N]	S _{op} [-]	P % 2010	P % 2020	P % 2050	P % 2080	z [m]
Onda 1	0.3	50	0.03	26.00%	26.50%	25.70%	24.10%	0.21
Onda 2	1.5	50	0.04	5.66%	5.70%	5.15%	4.78%	0.25
Onda 3	2.5	50	0.04	1.71%	1.63%	1.48%	1.21%	0.37
Onda 4	0.85	80	0.04	23.60%	24.20%	25.30%	26.30%	0.25
Onda 5	3	80	0.04	0.77%	0.69%	0.45%	0.63%	0.62
Onda 6	0.3	120	0.03	39.70%	38.70%	39.70%	40.70%	0.29
Onda 7	1.5	120	0.04	2.63%	2.67%	2.18%	2.30%	0.56

Tabella 1. Condizioni d'onda significative in termini di altezza d'onda (H_s), direzione (Dir), ripidità (Sop), frequenza di accadimento (P), livello del mare (Z).

3 METODOLOGIA DI ANALISI

3.1 Schemi progettuali e profili

Le batimetrie sono state generate sotto l'ipotesi che il profilo di spiaggia sommersa corrisponda al profilo di equilibrio di Bruun (*Bruun*, 1954). Il diametro nativo è stato preso costante considerando un valore medio di quello reale presente a Cesenatico ($d_{50}=0.12$ mm, $A=0.41d_{50}^{1.94}$). La spiaggia attiva si estende dalla quota emersa di +3 m alla quota sommersa di -7 m (profondità di chiusura).

Al fine di eseguire un'analisi parametrica sono messe a confronto tre differenti configurazioni di ripascimento sommerso con il profilo nativo senza versamenti e opere (come tale pensato rappresentativo della zona Nord non protetta dell'area di studio).

Gli schemi progettuali sono esaminati a parità di volume di ripascimento $V=300$ m³/m e diametro del materiale da versare $d_{50}=0.1$ mm (diametro delle sabbie relitte). Viceversa si differenziano per profondità di versamento, -2 m e -3 m e grado di protezione (con e senza barriera sommersa imbasata alla profondità di -4 m), si vedano Figura 2, a, b, c.

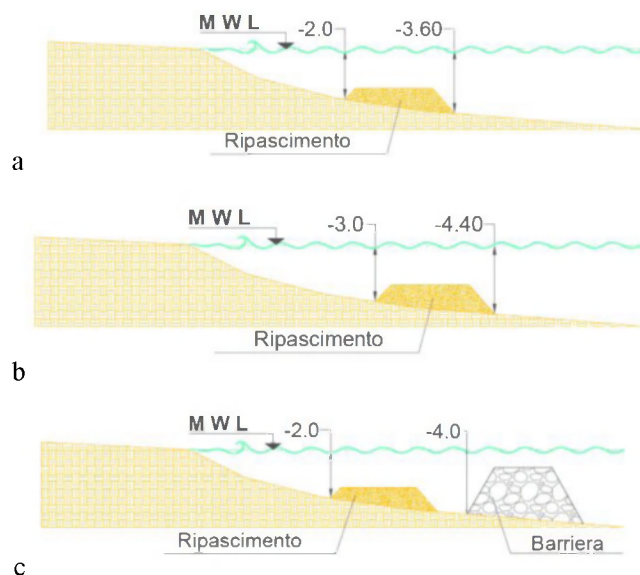


Figura 2. Schemi dei profili di ripascimento sommerso alla profondità di -2 m (a), -3 m (b) e -2 m con barriera sommersa imbasata a -4 m (c).

La barriera è stata progettata considerando la condizione ondosa con $T_r=50$ anni, caratterizzata da livello del mare $Z=0.78$ m, altezza d'onda significativa $H_s=5.67$ m, periodi di picco $T_p=9$ s. E' imbasata ad una profondità di -4 m, ha un'altezza

complessiva di 3 m e pendenza dei paramenti lato riva e lato mare di 1/2. La larghezza della cresta della barriera è di 12 m; la larghezza del piede è di 24 m. Il valore del coefficiente di trasmissione $K_t=0.55$ (Van der Meer *et al.*, 2005).

Sulla base dei profili progettati sono state predisposte delle batimetrie (Figure 3 e 4) per un estensione totale di 3 km in direzione parallela alla riva e di 2 km in direzione perpendicolare. L'area di intervento ha un'estensione longitudinale di 1 km; uguale estensione è stata data alle zone laterali, al fine di contenere gli effetti di bordo.

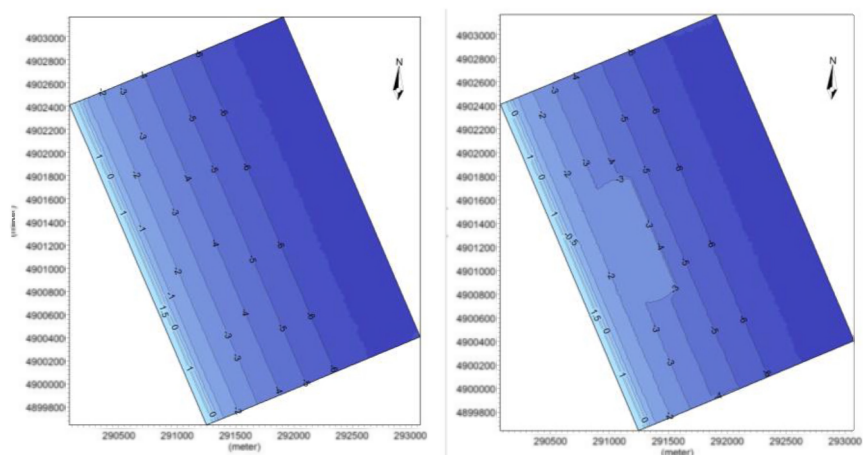


Figura 3. Batimetrie del profilo naturale e del ripascimento sommerso alla profondità di -3 m.

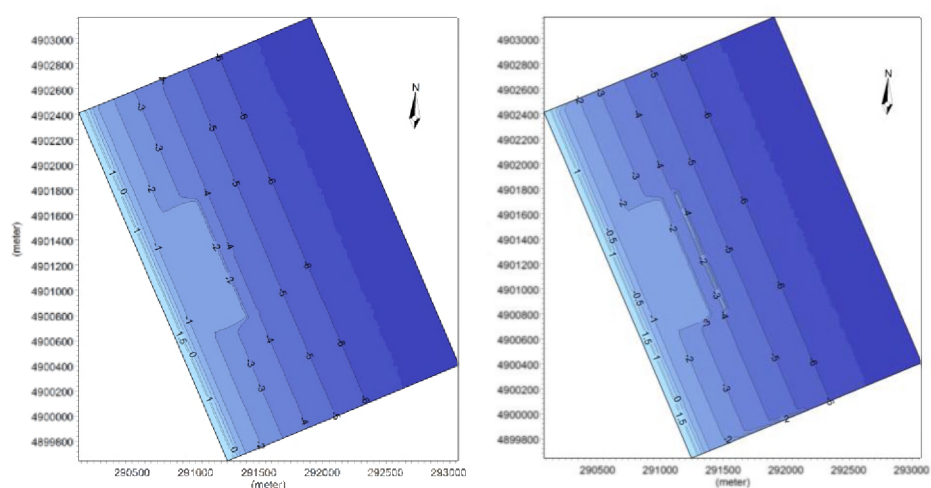


Figura 4. Batimetrie del ripascimento sommerso alla profondità di -2 m e del ripascimento sommerso alla profondità di -2 m con barriera sommersa.

3.2 Il modello numerico

La modellazione 2DH è stata effettuata con il Mike 21 MFM sviluppato dal DHI Water & Environment & Health. La simulazione prevede l'utilizzo di tre moduli: HD-Hydrodynamic Module, per simulare le correnti; SW-Spectral Wave Module, per la propagazione delle onde dal largo al fronte delle strutture; STQ₃-Sediment Transport Module, per rappresentare il trasporto solido. Per necessità di brevità del contributo si riportano solamente i risultati relativi a onde e correnti, commentando le conseguenze per il trasporto solido.

Nel modulo SW sono stati adottati i seguenti settaggi:

- uno schema di integrazione del primo ordine, direzionale, disaccoppiato, quasi-stazionario;
- coefficiente di scabrezza di *Nikuradse* diverso per il fondale sabbioso e per le strutture (rispettivamente 0.04 e 2.0 m);
- l'indice di frangimento di *default* di *Battjes & Jannssen* (1978): $\gamma_1=1.0$, $\gamma_2=1.0$ e $\alpha=0.8$;
- onde in ingresso nel contorno al largo costanti, sulla base della Tabella 1;
- nessuna variazione del livello idrico basato sempre sulla Tabella 1.

Nel modulo HD, si è considerato:

- schema di integrazione spaziale e temporale del primo ordine;
- coefficiente di scabrezza di *Manning* diverso per il fondale sabbioso e per le strutture (rispettivamente $40 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ e $15 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$);
- rappresentazione della viscosità turbolenta, mediante la formulazione di *Smagorinsky* a coefficiente costante, pari al valore assegnato di *default*;
- inclusione degli effetti indotti dal 'wave radiation stress', restituito dalla simulazione dell'onda con SW;
- valore di *input* del livello idrico costante basato sulla Tabella 1;
- condizione di flusso nullo nel contorno al largo.

4 RISULTATI

Per ogni configurazione e per ciascuna delle 7 onde rappresentative del clima ondoso tipico sono state eseguite le simulazioni di onde, correnti e trasporto.

Nel caso del ripascimento sommerso alla profondità di -2 m sottoposto all'Onda 2 (Tab. 2) si osserva come le onde, che si propagano con una direzione quasi perpendicolare alla riva, subiscano, a causa del ripascimento sommerso, una riduzione della loro altezza ed energia (Figura 5, sinistra). Le onde iniziano a frangere ad una profondità di -3 m, in prossimità del versante lato mare del profilo ripasciuto. La riduzione di profondità del fondale indotta dalla presenza del ripascimento sommerso determina inoltre fenomeni di diffrazione e rifrazione nelle vicinanze della riva. Le correnti (Figura 5, destra) si propagano da Nord a Sud e sono particolarmente intense dove avviene il frangimento, in corrispondenza del ripascimento sommerso. E' evidente la presenza di vortici in prossimità del versante Sud lato mare del versamento.

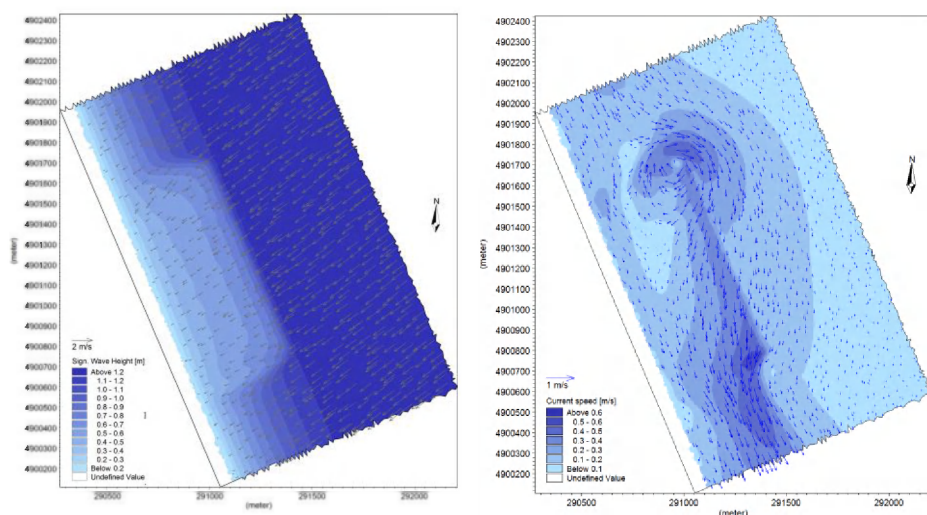


Figura 5. Onda 2 (50°N)-Altezze e direzioni d'onda (a sinistra), velocità delle correnti (a destra). Entrambi in scala di blu, dal blu scuro (valori maggiori) all'azzurro (valori minori), e vettori.

I risultati relativi alle altezze d'onda, alle velocità delle correnti e all'innalzamento del livello idrico sono stati sintetizzati in Tabella 5 previa estrapolazione lungo due linee tracciate, una lato riva e una lato mare, rispetto all'area di intervento (Figura 6). Entrambe le linee si estendono 250 m, a monte e a valle, oltre il ripascimento (largo 1000 m), per un totale di 1500 m. La linea al largo e la linea a riva sono poste in corrispondenza di due isobate, quella dei -5 m e quella dei -2 m.

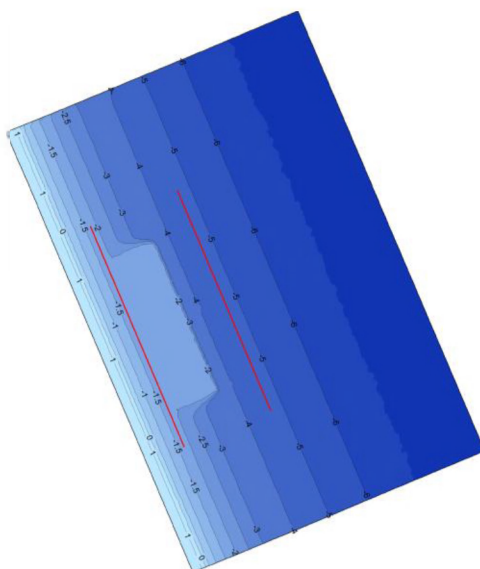


Figura 6. Rappresentazione delle linee al largo e a riva nel caso di ripascimento sommerso alla profondità di -2 m. Le linee di estrazione sono mantenute costanti per ogni caso.

		Hso [m]	Hsi [m]	Set Up [m]	Velocità corrente [m/s]
Profilo naturale	Onda 1	0.296	0.26	0.0002	0.026
	Onda 2	1.329	0.71	-0.022	0.238
	Onda 3	1.74	0.76	-0.042	0.241
	Onda 4	0.786	0.62	-0.001	0.152
	Onda 5	1.863	0.86	-0.043	0.193
	Onda 6	0.294	0.25	0.0002	0.046
	Onda 7	1.22	0.75	-0.004	0.329
Sommerso -3 m	Onda 1	0.296	0.26	0.0001	0.024
	Onda 2	1.329	0.63	-0.027	0.185
	Onda 3	1.74	0.67	-0.05	0.164
	Onda 4	0.787	0.59	-0.003	0.141
	Onda 5	1.864	0.77	-0.048	0.248
	Onda 6	0.292	0.24	0.0002	0.043
	Onda 7	1.22	0.69	-0.007	0.29
Sommerso -2 m	Onda 1	0.296	0.3	-0.0002	0.009
	Onda 2	1.328	0.5	-0.037	0.093
	Onda 3	1.74	0.54	-0.059	0.087
	Onda 4	0.786	0.5	-0.007	0.097
	Onda 5	1.863	0.63	-0.055	0.13
	Onda 6	0.297	0.25	0.0001	0.042
	Onda 7	1.22	0.59	-0.011	0.232
Sommerso -2 m con barriera	Onda 1	0.298	0.24	-0.0002	0.011
	Onda 2	1.328	0.45	-0.04	0.096
	Onda 3	1.74	0.49	-0.066	0.104
	Onda 4	0.79	0.44	-0.009	0.066
	Onda 5	1.863	0.57	-0.071	0.095
	Onda 6	0.31	0.24	0.0001	0.04
	Onda 7	1.226	0.55	-0.015	0.231

Tabella 5. Valori medi di altezza d'onda al largo H_{so} , altezza d'onda a riva H_{si} , Set up, velocità della corrente lungo riva, nel caso di profilo naturale, ripascimento sommerso alla -3 m, alla -2 m e alla -2 m con barriera.

In Figura 7, si confronta K_i per i diversi interventi sempre nel caso dell'Onda 2. E' evidente l'effetto che i ripascimenti e la barriera sommersa hanno sulla riduzione delle altezze d'onda a riva se comparati al caso di profilo naturale:

- 8% nel caso di ripascimento sommerso alla profondità di -3 m;
- 24% nel caso di ripascimento sommerso alla profondità di -2 m;
- 31% ripascimento sommerso protetto alla profondità di -2 m.

Si osservano inoltre le differenze tra le zone centrali e quelle laterali dovute ai fenomeni di diffrazione indotti dagli interventi.

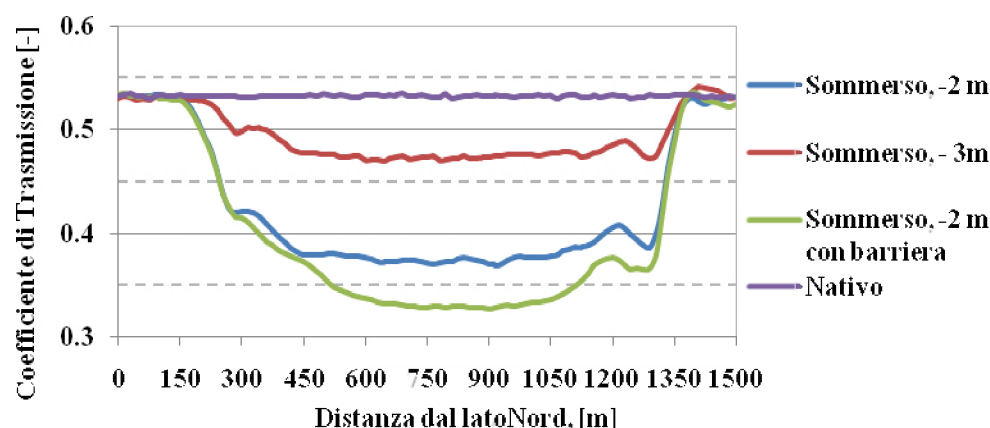


Figura 7. Onda 2 (50°N) – Confronto tra le altezze d'onda (a sinistra) e tra i coefficienti di trasmissione (a destra).

5 CONCLUSIONI

E' stato analizzata l'idromorfologia del litorale conseguente tre diverse tipologie di ripascimento sommerso, a parità di volume versato, con diversa profondità di versamento (-2 e -3 m) e diverso grado di protezione (barriera sommersa con cresta alla -1 m). Gli effetti dell'intervento sui campi di onde e correnti sono stati valutati tramite l'ausilio del modello numerico Mike 21 per le 3 differenti configurazioni e per i 7 attacchi ondosi considerati per il clima ondoso tipico di Cesenatico.

Il ripascimento sommerso, oltre all'azione dissipativa svolta sull'altezza e l'energia dell'onda, permette una ridistribuzione verso riva del materiale presente sullo stesso. Dalla simulazione è emerso chiaramente come la migliore azione dissipativa sia svolta dall'azione combinata del ripascimento sommerso (-2 m) e della barriera. Tuttavia anche il caso di solo ripascimento sommerso alla profondità di -2 m svolge una buona azione di protezione portando l'onda a frangere in una zona più distante da riva e riducendone l'energia del 24 %. Tali risultati non sono chiaramente cautelativi, stante l'utilizzo del modello in condizioni stazionarie senza aggiornamento della quota del fondale durante la mareggiata.

BIBLIOGRAFIA

- Brath A. Studio di fattibilità e di approfondimento tecnico-scientifico per l'individuazione degli interventi idraulici volti alla messa in sicurezza del Porto Canale di Cesenatico, *Internal Report, in italian*, 2007.
- Bruun, P. Coast erosion and the development of beach profiles. Technical Memorandum, vol. 44. Beach Erosion Board, Corps of Engineers, p. 82, 1954.
- Colosio, F., Abbiati, M., Airolidi, L. Effects of beach nourishment on sediments and benthic

- assemblages, *Marine Pollution Bulletin* 54 1197–1206, 2007.
- De Vriend, H. J., Zyserman, J., Nicholson, J., Roelvink, J. A., P       P., Southgate, H. N. Medium-term 2DH coastal area modelling, *Coastal Engineering*, 21(1-3), pp. 193-224, 1993.
- Di Risio, M., Lisi, I. Beltrami, G. M., DeGirolamo, P. Physical modeling of the cross-shore short-term evolution of protected and unprotected beach nourishments, *Ocean Engineering* 37 777–789, 2010.
- Larsson, M., Kubota, S., Eriksson, L. Swash-zone sediment transport and foreshore evolution: field experiments and mathematical modelling, *Marine Geology* 212 61–79, 2004.
- Nicoletti, L., Paganelli, D., Gabellini, M. Aspetti ambientali del dragaggio di sabbie relitte ai fini di ripascimento: proposta di un protocollo di monitoraggio, *I quaderni ICRAM*, 2006.
- Preti, M. Stato del litorale Emiliano-Romagnolo all'anno 2007 e piano decennale di gestione, *Quaderni ARPA - Regione Emilia Romagna*, 2008.
- Umgiesser G., Melaku-Canu, D., Cucco, A., Solidoro, C. A finite element model for the Venice Lagoon. Development, set-up, calibration and validation, *Journal of Marine Systems* 51, 123-145, 2004.
- U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station. Considerations for planning nearshore placement of mixed dredged sediments, *Technical Note DOER-N3*, Vicksburg, MS, 1998.
- Van Dalfsen, J.A., Essink K., Toxvig Madsen H., Birklund J., Romero J., Manzanera M. Differential responses of macrozoobenthos to marine sand extraction in the North Sea and the Western Mediterranean, *ICES J. Mar. Sci.*, 57, 2000.
- Van Hoey, G., Borja, A., Birchenough, S., Buhl-Mortensen, L., Degraer, S., Fleischer, D., Kerckhof, F., Magni, P., Muxika, I., b, Reiss, H., Schr       A., Zettler, M.L. The use of benthic indicators in Europe: from the Water Framework Directive to the Marine Strategy Framework Directive, 2010.
- Van der Meer, J.W., Briganti, R., Zanuttigh, B., Wang, B. Wave transmission and reflection at low-crested structures: design formulae, oblique wave attack and spectral change, *Coastal Engineering*, 52(10-11), 915-929, 2005.
- Zanuttigh, B. Numerical modeling of the morphological response induced by low-crested structures in Lido di Dante, Italy, *Coastal Engineering*, 54 (1), 31-47, Elsevier, 2007.
- Zoppi, C., Zanuttigh, B. Analisi preliminare dell'utilizzo delle sabbie dragate dal fiume Po per il ripascimento di spiagge del litorale Emiliano Romagnolo, 2012.