



UNIVERSITÀ  
DEGLI STUDI  
FIRENZE

## FLORE

# Repository istituzionale dell'Università degli Studi di Firenze

### **Indagine sperimentale sull'erosione delle barene lagunari**

Questa è la Versione finale referata (Post print/Accepted manuscript) della seguente pubblicazione:

*Original Citation:*

Indagine sperimentale sull'erosione delle barene lagunari / Bendoni M.; Cappietti L.; Francalanci S.; Rinaldi M.; Solari L. - ELETTRONICO. - (2012), pp. 1-10. ( XXXIII Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche Brescia 10-15 Settembre 2012).

*Availability:*

The webpage <https://hdl.handle.net/2158/730325> of the repository was last updated on 2015-09-29T14:53:20Z

*Publisher:*

EdiBios

*Terms of use:*

Open Access

La pubblicazione è resa disponibile sotto le norme e i termini della licenza di deposito, secondo quanto stabilito dalla Policy per l'accesso aperto dell'Università degli Studi di Firenze (<https://www.sba.unifi.it/upload/policy-oa-2016-1.pdf>)

*Publisher copyright claim:*

La data sopra indicata si riferisce all'ultimo aggiornamento della scheda del Repository FloRe - The above-mentioned date refers to the last update of the record in the Institutional Repository FloRe

(Article begins on next page)

## INDAGINE SPERIMENTALE SULL'EROSIONE DELLE BARENE LAGUNARI

M. Bendoni<sup>1</sup>, L. Cappiotti<sup>1</sup>, S. Francalanci<sup>2</sup>, M. Rinaldi<sup>1</sup> & L. Solari<sup>1</sup>

- (1) Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Università di Firenze, Italia, e-mail: [mbendoni@dicea.unifi.it](mailto:mbendoni@dicea.unifi.it), [cappiotti@dicea.unifi.it](mailto:cappiotti@dicea.unifi.it), [mrinaldi@dicea.unifi.it](mailto:mrinaldi@dicea.unifi.it), [luca.solari@dicea.unifi.it](mailto:luca.solari@dicea.unifi.it)
- (2) CERAFRI. Centro per la Ricerca e l'Alta Formazione per la prevenzione del Rischio Idrogeologico, Retignano di Stazzema (LU), Italia, e-mail: [simona.francalanci@dicea.unifi.it](mailto:simona.francalanci@dicea.unifi.it)

### SOMMARIO

*L'effetto congiunto del moto ondoso e dell'escursione di marea rappresenta uno dei principali fattori responsabili dell'arretramento delle sponde che delimitano le barene lagunari. In letteratura, la comprensione e la quantificazione dei processi erosivi agenti in natura risulta per larga parte inesplorata. Nella memoria viene presentata un'attività sperimentale di laboratorio volta a modellare i processi di arretramento delle sponde lagunari che tipicamente delimitano le superfici barenali a seguito dell'azione del moto ondo e della escursione mareale. In particolare, vengono presentati alcuni risultati sperimentali inerenti la quantificazione delle sollecitazioni dinamiche a cui è soggetto il bordo barenale a seguito dell'impatto del moto ondoso. Le analisi condotte hanno permesso di stimare la spinta totale massima agente sul bordo barenale al variare del livello di marea e lo smorzamento delle sovrappressioni che si propagano all'interno della sponda.*

### 1 INTRODUZIONE

Le barene sono aree pianeggianti coperte prevalentemente da vegetazione alofitica e soggette regolarmente a sommersione dall'onda di marea (Allen, 2000). Gli ambienti lagunari cui appartengono sono ecosistemi caratterizzati da un elevato grado di biodiversità, forniscono un habitat privilegiato a diverse specie animali e vegetali, importanti risorse per la pesca e rappresentano una zona ricca di nutrienti all'interfaccia tra mare e terre emerse. La vegetazione che ricopre le aree barenali concorre inoltre alla dissipazione dell'energia del moto ondoso e quindi ne attenua l'azione erosiva (Allen, 2000; Townend et al., 2010).

Negli ultimi decenni l'aumento del livello medio mare, i fenomeni di subsidenza sia naturali che indotti dall'uomo e l'incremento della pressione antropica hanno causato danni ingenti all'ecosistema lagunare ed hanno prodotto un'alterazione del bilancio di sedimenti a scala di bacino e la scomparsa di ampie superfici barenali in diverse aree del mondo (Van Der Wal & Pye, 2004; Marani et al., 2006). Con riferimento alla Laguna di Venezia, negli ultimi cento anni la superficie complessiva delle aree barenali si è dimezzata e la tendenza evolutiva suggerisce una loro completa scomparsa nell'arco dei prossimi cinquanta anni (Cola et al., 2008). I meccanismi di instabilità ed i processi

erosivi agenti sulle sponde lagunari che delimitano le barene giocano un ruolo fondamentale nell'evoluzione dell'intero sistema come testimoniato dai numerosi interventi ingegneristici di difesa dall'erosione al fine di preservarne l'attuale morfologia (Cola *et al.*, 2008).

In letteratura è stata tuttavia dedicata maggiore attenzione ai processi di evoluzione delle barene in direzione verticale (Morris *et al.*, 2002; Kirwan & Murray, 2007; Marani *et al.*, 2007; Mudd *et al.*, 2009). I processi di evoluzione "laterale" sono stati invece studiati in misura inferiore benché proprio il meccanismo di erosione del bordo della sponda sia ritenuto uno dei principali responsabili della scomparsa delle aree barenali (Schwimmer, 2001; Gedan *et al.*, 2009).

Le sponde che delimitano le barene lagunari, generalmente coesive e ricoperte da vegetazione, sono caratterizzate da profili sub-verticali ed i processi erosivi che le interessano sono principalmente dovuti all'azione idrodinamica delle onde (sia da vento che causate dal passaggio di imbarcazioni) e delle correnti (Wan Der Wal & Pye, 2004). L'impatto del moto ondoso sulla sponda è un agente fondamentale nel processo erosivo e le spinte esercitate sulle sponde risultano strettamente dipendenti dal livello della marea (Tonelli *et al.*, 2010). La stabilità delle sponde dipende dalla loro altezza, dalla stratigrafia (Van Eerd, 1985) e, in presenza di vegetazione, dallo spessore dello strato di terreno interessato dall'apparato radicale (Allen, 1998).

Il presente lavoro illustra una parte dei risultati sperimentali finalizzati allo studio dei meccanismi responsabili dell'erosione delle sponde lagunari quando queste sono sottoposte all'azione delle onde da vento e dell'escursione di marea. L'attività sperimentale ha previsto la ricostruzione di un modello fisico di sponda lagunare in scala 1:1 da sottoporre alle suddette forzanti idrodinamiche.

## 2 ATTIVITÀ SPERIMENTALE

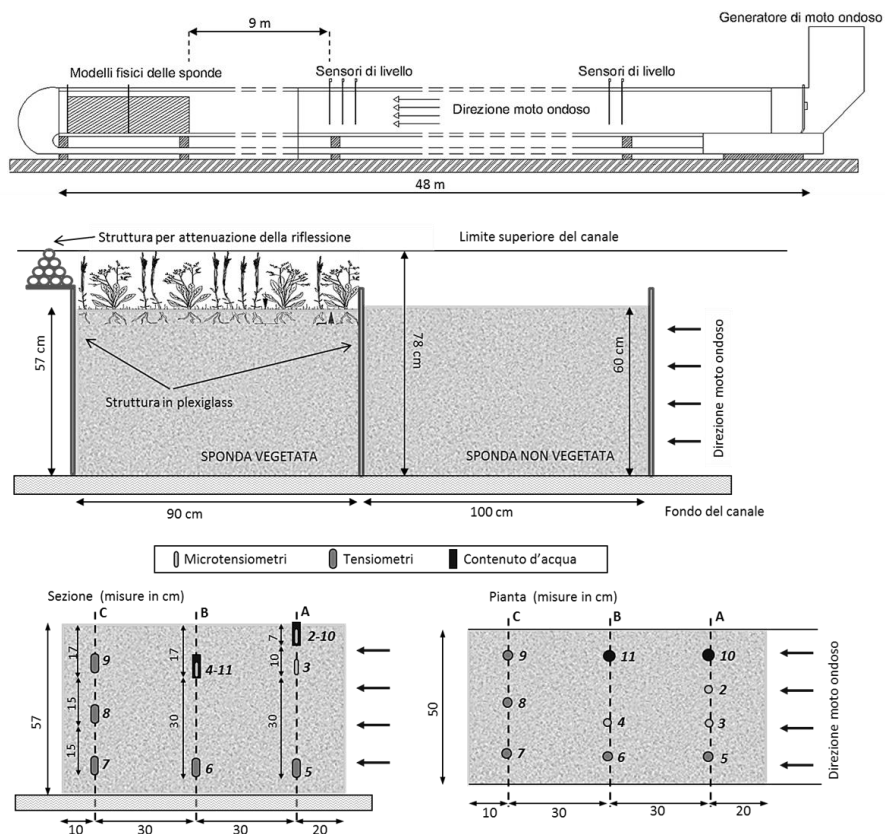
L'attività sperimentale si è svolta presso il Laboratorio di Idraulica del Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale (DICEA) dell'Università degli Studi di Firenze. Il laboratorio è dotato di un canale marittimo per la riproduzione del moto ondoso e delle correnti lungo circa 50 m, largo 0.80 m e profondo 0.78 m. Il modello fisico della barena è stato riprodotto ad un'estremità del canale. Il moto ondoso irregolare è stato riprodotto tramite un generatore del tipo a pistone. La propagazione delle onde è stata monitorata tramite 5 sensori di livello, 2 posizionati in prossimità del battitore e i restanti 3 antistanti il modello fisico della sponda (Figura 1).

### 2.1 Modello fisico di una barena vegetata e non vegetata

Una prima serie di esperimenti è stata finalizzata allo studio dei meccanismi erosivi anche in relazione al ruolo esercitato dalla vegetazione. Due modelli di sponda pressoché identici, dei quali uno in presenza e l'altro in assenza di vegetazione, sono stati ricostruiti all'interno del canale con del terreno prelevato su una barena della Laguna di Venezia. Il terreno è caratterizzato dalla predominanza di sedimenti melmoso-argillosi e dalla presenza di matrice organica. Le zolle di vegetazione alofitica (prelevate in situ) sono state poste sul modello vegetato e coltivate per un periodo di circa 1 mese per favorire l'attecchimento dell'apparato radicale al terreno sottostante. Le dimensioni dei modelli sono riportate in Figura 1; si mette in evidenza che l'altezza pari a 60 cm delle sponde risulta analoga a quella osservata durante alcuni rilievi di

campo svolti nella laguna di Venezia. All'interno del terreno sono state poste delle sonde per la misura delle pressioni interstiziali (tensimetri e microtensimetri) e del contenuto d'acqua (Figura 1). Durante l'attività sperimentale i due modelli sono stati soggetti alle stesse forzanti idrodinamiche rappresentate dalla escursione di marea e dal moto ondoso.

Sulla base di osservazioni di campo e per vincoli sperimentali è stata scelta un'escursione di marea di 30 cm intorno ad un livello idrico medio (distanza tra fondo del canale e pelo libero in stato di quiete; in seguito indicato con *LM*) in canale pari a 47 cm. L'onda di marea di riferimento è quella semidiurna con un periodo di 12 ore. L'andamento sinusoidale del livello idrico durante la marea è stato riprodotto con una funzione a gradini di due ore ciascuno. L'intero ciclo è stato suddiviso in due parti: per l'alta marea le altezze relative a ciascun gradino sono state poste pari a 54 cm, 62 cm, 54 cm, mentre per la bassa marea 40 cm, 32 cm, 40 cm. Si noti che nelle condizioni di alta marea, la sponda risulta sommersa con un battente pari a circa 2 cm.



**Figura 1.** Sezione del canale marittimo e geometria iniziale delle sponde con indicazione degli strumenti di misura posti all'interno del modello di sponda. In corsivo sono indicati i numeri di riferimento per i diversi sensori.

L'attività sperimentale ha previsto, per entrambi i modelli di sponda (vegetato e non

vegetato), una prima serie di esperimenti in cui la sponda è stata inizialmente soggetta alla sola escursione di marea ed una successiva serie di esperimenti con escursione di marea associata a moto ondoso. Per la riproduzione del moto ondoso in canale è stato scelto di fare riferimento allo spettro JONSWAP, i cui parametri sono stati scelti in base a misurazioni del clima ondoso raccolte nella zona Sud della Laguna di Venezia ( $H_S = 10$  cm;  $T_S = 1.4$  s;  $\gamma = 2$ ). L'elenco delle prove realizzate è riportato in Tabella 1.

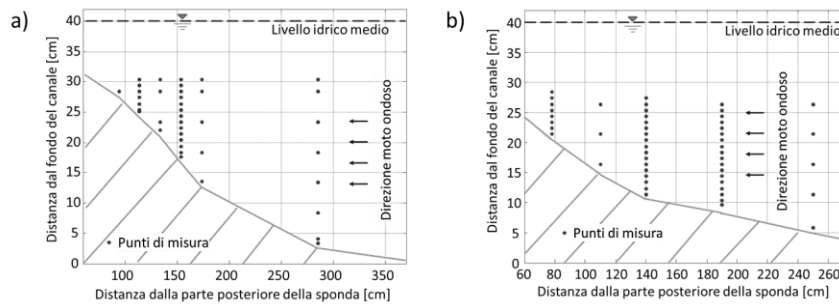
Per la descrizione del campo di moto sono state svolte delle misure di dettaglio nelle 2 configurazioni finali delle sponde erose (vegetata e non vegetata). Le misure sono state condotte nel caso di *LM* in canale pari a 40 cm e sono state svolte con un dispositivo ADV (Acoustic Doppler Velocimeter) posto a varie distanze ed altezze rispetto alla superficie della sponda. In Figura 2 è riportato lo schema dei punti di misura. Per ogni punto sono stati raccolti 5 minuti di misurazioni ad una frequenza di campionamento di 100 Hz con un range di velocità compreso tra  $\pm 0.3$  m/s oppure  $\pm 1.0$  m/s in base alla distanza del sensore dal fondo e quindi al range di velocità delle particelle.

## 2.2 Modello fisico per la misura delle pressioni idrodinamiche

Tre tipologie di esperimenti sono state svolte per lo studio delle pressioni idrodinamiche indotte dal moto ondoso su di una sponda di barena (vedi Figura 3). Per le misure sono stati utilizzati dei trasduttori di pressione (in seguito indicati con la sigla TP) con frequenza di acquisizione  $f_a$  di 100 Hz ed un range di misura tra 0 e 1 kPa.

Codice esperimento	Non vegetata	Vegetata	Alta marea	Bassa marea	Moto ondoso
1.1.B	X			X	
1.2.A	X		X		
2.1.B	X			X	
2.2.A	X		X		
3.1.B	X			X	
3.2.A	X		X		
4.1.A	X		X		X
4.2.B	X			X	X
V.1.1.A		X	X		
V.1.2.B		X		X	
V.2.1.A		X	X		
V.2.2.B		X		X	
V.3.1.A		X	X		
V.3.2.B		X		X	
V.4.1.A		X	X		X
V.4.2.B		X		X	X

**Tabella 1.** Elenco delle prove effettuate: ad ogni prova è associato un codice esperimento, la prima cifra rappresenta l'ordine cronologico dei cicli di marea cui è stata soggetta la sponda (12 ore). La seconda cifra indica il primo o il secondo semiperiodo del ciclo, le lettere A o B rappresentano rispettivamente l'alta o la bassa marea, mentre la lettera V si riferisce alle prove effettuate sul modello di sponda con copertura vegetata.



**Figura 2.** Punti di misura del campo di moto nella configurazione finale erosa. a) sponda non vegetata, b) sponda vegetata.

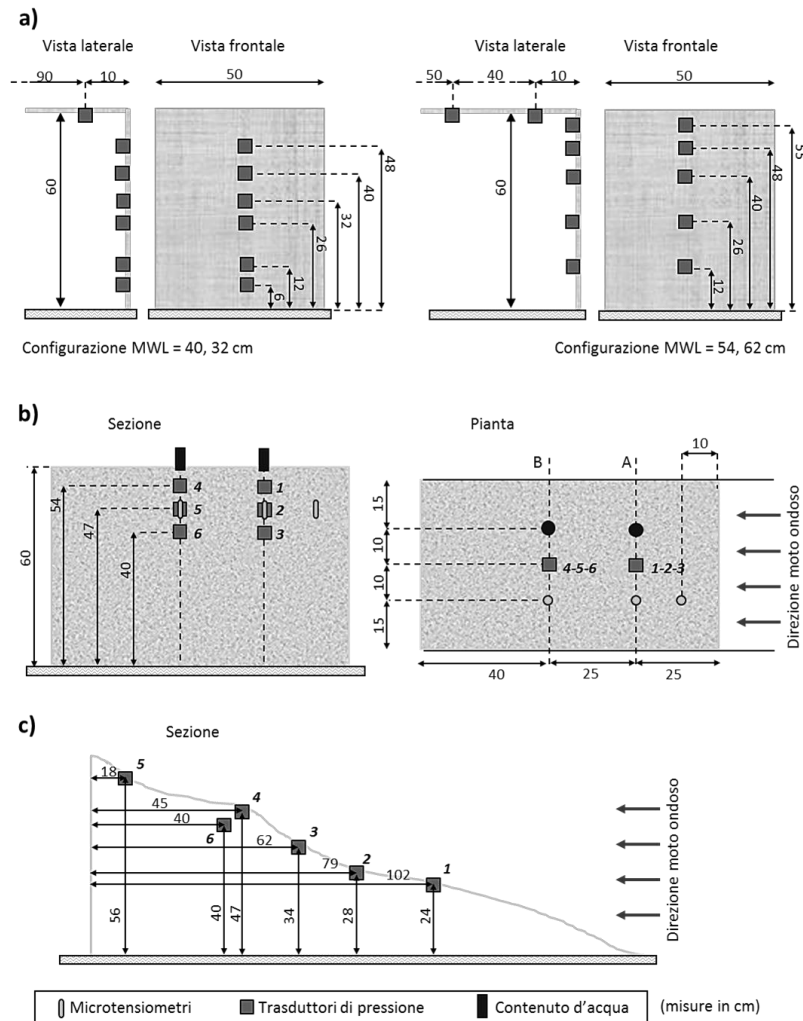
Le pressioni su parete verticale sono state misurate utilizzando una serie di TP posizionati sul lato frontale di un modello di sponda in materiale rigido (Figura 3). Gli esperimenti, della durata di 5 minuti ciascuno, sono stati svolti su due differenti configurazioni (Tabella 2) in riferimento all'alta ed alla bassa marea.

Per la misura delle pressioni all'interno del mezzo è stato ricostruito, tramite del terreno prelevato da una barena della Laguna di Venezia, un modello di sponda avente la stessa geometria di quello impiegato per lo studio dei processi di arretramento (si veda la Figura 1). All'interno del terreno sono stati posti 6 TP, tre microtensimetri (misura delle pressioni interstiziali) e due sonde per la misura del contenuto d'acqua (Figura 3). Sul modello sono stati effettuati quattro esperimenti della durata di 5 minuti ciascuno (Tabella 2).

La misura delle pressioni sulla configurazione erosa (non vegetata) del modello di sponda è stata svolta ponendo cinque TP affacciati alla superficie ed uno all'interno. Anche su questo modello sono stati effettuati quattro esperimenti della durata di 5 minuti ciascuno (Tabella 2).

Codice esperimento	Tipologia di esperimento	Configurazione	LM [cm]
P_VERT_32	Pressioni su parete verticale	Bassa marea	32
P_VERT_40			40
P_VERT_54		Alta marea	54
P_VERT_62			62
P_INT_32	Pressioni interno sponda	Unica	32
P_INT_40			40
P_INT_54			54
P_INT_62			62
P_EROD_32	Pressioni su configurazione erosa	Unica	32
P_EROD_40			40
P_EROD_54			54
P_EROD_62			62

**Tabella 2.** Elenco degli esperimenti effettuati per la misura delle pressioni idrodinamiche agenti sul modello di sponda barenale.



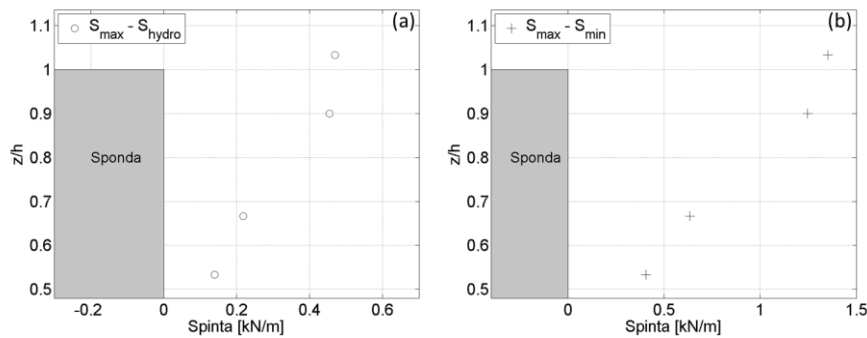
**Figura 3.** Setup sperimentale per la misura delle pressioni idrodinamiche agenti sulla sponda. a) misura delle pressioni agenti sul fronte verticale: TP posizionati in due diverse configurazioni, la prima per due prove con  $LM$  pari a 40 e 32 cm, la seconda per due prove con  $LM$  54 e 62 cm. b) misura delle pressioni interne alla sponda: quattro prove con  $LM$  pari a 62, 54, 40, 32 cm. c) misura delle pressioni su sponda erosa, anche in questo caso sono state svolte quattro prove con  $LM$  pari a 62, 54, 40, 32 cm.

### 3 RISULTATI SPERIMENTALI

Di seguito vengono presentati i risultati delle sole prove sperimentali per lo studio delle pressioni idrodinamiche agenti sulle sponde barenali. Per la presentazione di alcuni dei risultati degli esperimenti sull'arretramento della sponda vegetata e non vegetata si veda *Francalanci et al.*, 2011.

### 3.1 Analisi dei dati di pressione

Gli esperimenti effettuati sul modello rigido di sponda con parete verticale hanno permesso di misurare le pressioni idrodinamiche agenti sulla superficie frontale al variare del  $LM$  in canale. Per ciascun esperimento ad uno specifico  $LM$ , dalla distribuzione istantanea di pressioni è stata calcolata la spinta istantanea totale agente sulla parete espressa in kN/m di larghezza. Per tale stima la parete della sponda è stata considerata suddivisa in fasce orizzontali corrispondenti alla posizione di ciascun TP. Dai valori di pressione è stata determinata la spinta su ciascuna fascia ipotizzando che la pressione agente su di essa fosse uniforme e pari al valore misurato dal corrispondente TP. La spinta totale è stata quindi determinata sommando i diversi contributi. Sono state poi individuate la spinta massima e minima istantanee e quella idrostatica. In Figura 4 sono riportati i valori della spinta massima decurtata della componente idrostatica ( $S_{\max} - S_{\text{hydro}}$ ) e della differenza tra spinta massima e minima ( $S_{\max} - S_{\min}$ ) in funzione del rapporto tra  $LM$  in canale  $z$  ed altezza della sponda  $h$  ( $z/h$ ).



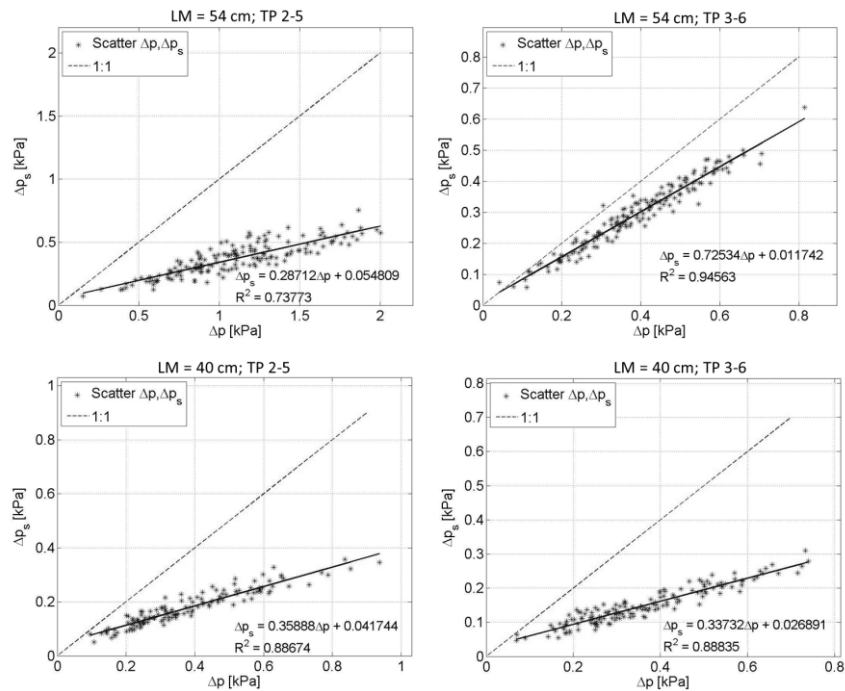
**Figura 4.** Evoluzione della spinta totale per differenti valori di  $LM$ : (a) differenza tra spinta idrodinamica massima e spinta idrostatica; (b) differenza tra spinta idrodinamica massima e minima.

Dal primo grafico si nota che la componente idrodinamica della forza totale agente sulla parete tende a crescere più lentamente per valori di  $LM$  vicini all'altezza della sponda. Infatti per  $LM = 62$  cm ( $h/z \approx 1$ ) parte della componente idrodinamica si propaga al di sopra della sponda non contribuendo ad aumentare la spinta sulla parete. Un comportamento simile può essere riscontrato osservando il grafico che riporta la differenza tra spinta massima e minima.

Gli esperimenti con i TP posizionati all'interno del materiale hanno permesso di studiare il comportamento dell'onda di pressione nella propagazione attraverso il terreno. Per ogni coppia di TP posizionati alla stessa altezza rispetto al fondo (Figura 2 b, TP 1-4, 2-5, 3-6) il grado di smorzamento dell'onda nel passaggio tra i due sensori è stato determinato attraverso due diversi procedimenti.

Un'analisi zero-up crossing è stata condotta sui valori di pressione misurati dal TP più vicino al bordo, individuando l'ampiezza  $\Delta p$  associata a ciascuna onda di pressione. Tale valore è stato rapportato a quello della corrispondente ampiezza dell'onda di pressione  $\Delta p_s$ , misurato dal TP più lontano dal bordo. Per ogni prova ad uno specifico  $LM$  e per ogni coppia di TP, le due serie contenenti le ampiezze delle onde di pressione sono state riportate su un unico grafico insieme alla retta di regressione lineare e a

quella di perfetto accordo (Figura 5).

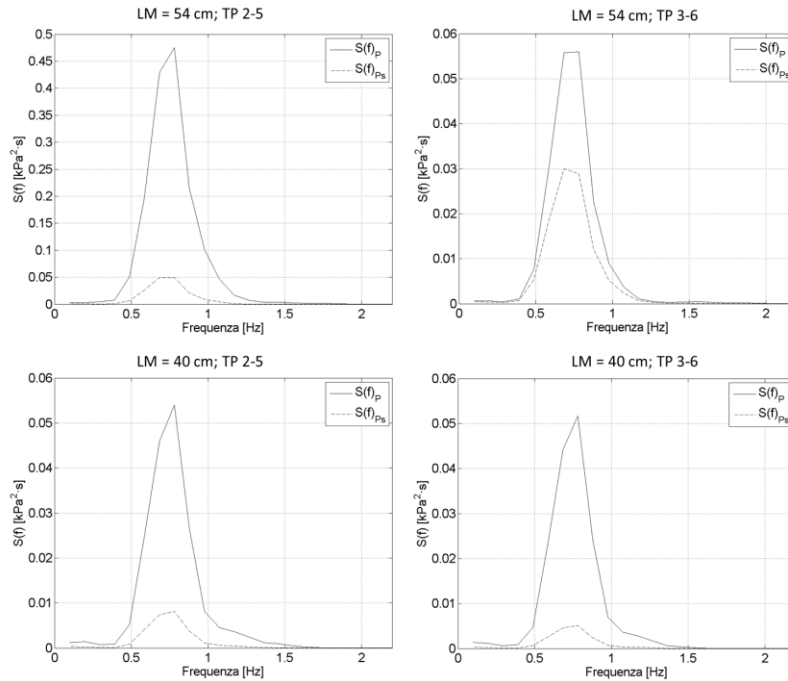


**Figura 5.** Relazione tra le fluttuazioni di pressione ( $\Delta p$ ) misurate dal TP più vicino al bordo (asse ascisse) e quelle misurate ( $\Delta p_s$ ) dal TP più interno alla sponda (asse ordinate) per due diversi esperimenti. La coppia di grafici in alto è riferita alla prova con livello idrico medio in canale ( $LM$ ) pari a 54 cm, la coppia in basso all'esperimento con  $LM$  pari a 40 cm.

Si può osservare che per  $LM$  pari a 54 cm lo smorzamento dell'onda di pressione è maggiore per la coppia di TP (2-5) posti a 47 cm dal fondo, mentre risulta inferiore per la coppia (3-6) posta a 40 cm. Per un  $LM$  pari a 40 si nota invece che lo smorzamento dell'onda di pressione risulta pressoché identico per le coppie di TP poste a 47 e 40 cm dal fondo del canale. L'andamento dei dati nel range di valori misurati mostra, in prima approssimazione, un andamento lineare. Tuttavia, un valore non nullo dell'intercetta della retta di regressione può far ipotizzare che per valori piccoli dell'ampiezza d'onda di pressione il grado di smorzamento manifesti un andamento non lineare (poiché a  $\Delta p = 0$  deve necessariamente corrispondere  $\Delta p_s = 0$ ).

Successivamente è stata svolta un'analisi spettrale sulle serie misurate da ogni coppia di TP al fine di individuare a quali frequenze vengono maggiormente smorzate le ampiezze delle onde di pressione idrodinamica. Per l'analisi è stato utilizzato il metodo di Welch dei periodogrammi mediati. Per ogni coppia di TP sono stati riportati su due grafici gli spettri di ciascuna serie di valori di pressione. In Figura 6 sono riportati i risultati dell'analisi per le coppie di TP 2-5 e 3-6 per  $LM$  pari a 54 e 40 cm (casistica analoga a quella di Figura 5).

Si nota che l'energia è trasportata a frequenze inferiori a 1.5 Hz e che lo smorzamento maggiore si verifica per frequenze intorno a quella di picco. Confrontando



**Figura 6.** Risultati dell'analisi in frequenza effettuata sulle serie di misure di pressione idrodinamica misurate dalle coppie di TP 2-5 e 3-6. Analogamente alla Figura 5 i due grafici in alto sono riferiti alla prova con livello idrico medio in canale ( $LM$ ) pari a 54 cm, i due in basso all'esperimento con  $LM$  pari a 40 cm.

le Figure 5 e 6 si può osservare un sostanziale accordo nel contenuto dei grafici: in entrambi i casi il grado di smorzamento subito dall'onda di pressione tra il TP 3 e 6 per  $LM$  pari a 54 cm risulta inferiore rispetto agli altri tre casi.

Un'analisi preliminare nel dominio della frequenza (metodo di Welch dei periodogrammi mediati), effettuata sui dati di pressione misurati sulla sponda in configurazione erosa, ha mostrato che l'onda di pressione incide maggiormente sulla porzione di pendio posta ad una quota dal fondo del canale di poco inferiore al  $LM$  durante l'esperimento.

#### 4 DISCUSSIONE E SVILUPPI FUTURI

Attraverso le analisi svolte sui dati raccolti dai TP posizionati sul modello in legno a parte verticale, è stato possibile calcolare l'intensità con cui il moto ondoso agisce sulla sponda barenale e come la spinta totale sia dipendente dal livello idrico medio. L'andamento dei valori calcolati è confrontabile con quello ottenuto per via numerica da *Tonelli et al.* (2010) con sponde più elevate ed altezze d'onda di poco maggiori. Le prove con i TP posizionati internamente al modello realizzato con materiale prelevato in sito, hanno permesso di stimare il grado di smorzamento con cui le pressioni idrodinamiche dovute al moto ondoso si propagano all'interno del mezzo. Tali informazioni potranno essere utilizzate in futuro per la calibrazione di modelli numerici

dettagliati che descrivano il comportamento della sponda soggetta all'azione del moto ondoso.

**Ringraziamenti.** Il lavoro è stato svolto nell'ambito del progetto di ricerca PRIN 2008 'Eco-morfodinamica lagunare e cambiamenti climatici' cofinanziato dall'Università di Firenze. Il terzo autore ha ricevuto supporto finanziario a valere sul Programma Operativo Regionale finanziato dal FSE per l'obiettivo "Competitività regionale e occupazione" anni 2007-2013, nell'ambito del progetto MITI "Metodologie Innovative per la Tutela dei bacini Idrografici e delle coste". Si ringrazia il Prof. Stefano Lanzoni per il prezioso supporto nell'attività sperimentale e di campo. Si ringraziano Ing. Lorenzo Lotti, Mauro Gioli e Muzio Mascherini per il prezioso aiuto nella raccolta dei dati sperimentali.

#### BIBLIOGRAFIA

- Allen, J. R. L. The geoarchaeology of land-claim in coastal wetlands: a sketch from Britain and the north-west European Atlantic North-Sea coasts. *Archaeological Journal*, 1998, 154, 1-54.
- Allen J. R. L. Morphodynamics of Holocene salt marshes: a review sketch from the Atlantic and Southern North Sea coast of Europe, *Quaternary Science Reviews*, 2000, 19(12), 1155-1231.
- Cola, S., Sanavia, S., Simonini, P. & Schrefler, B.A. Coupled thermohydrromechanical analysis of Venice lagoon salt marshes, *Water Resources Research*, 2008, 44, W00C05.
- Francalanci, S., Solari, L., Cappiotti, L., Rinaldi, M. & Federici, G.V. Experimental observations on bank retreat of salt marshes. Proc. *River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, Beijing 6-8 September 2011, 543-551.
- Gedan, K.B., Silliman, B.R., Bertness, M.D. Centuries of human-driven change in salt marsh ecosystems. *Annual Review of Marine Science*, 2009, 1, 117-141
- Kirwan, M.L., & Murray, A.B. A coupled geomorphic and ecological model of tidal marsh evolution, *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.*, 2007, 104, 6118-6122.
- Marani, M., Silvestri, S., Belluco, E., Ursino, N., Comerlati, A., Tosatto, O. & Putti M. Spatial organization and ecohydrological interactions in oxygen-limited vegetation ecosystems, *Water Resources Research*, 2006, 42, W06D06.
- Marani, M., D'Alpaos, A., Lanzoni, S., Carniello, L. & Rinaldo, A. Biologically-controlled multiple equilibria of tidal landforms and the fate of the Venice lagoon, *Geophys. Res. Lett.*, 2007, 34, L11402.
- Morris, J.T., Sundareshwar, P.V., Nietch, C.T., Kjerfve, B. & Cahoon, D.R. Responses of coastal wetlands to rising sea level, *Ecology*, 2002, 83(10), 2869-2877.
- Mudd, S.M., Howell, S.M. & Morris, J.T. Impact of dynamic feedbacks between sedimentation, sea-level rise, and biomass production on near-surface marsh stratigraphy and carbon accumulation, *Estuarine, Coastal Shelf Sci.*, 2009, 82, 377-389.
- Schwimmer, R.A. Rates and Processes of Marsh Shoreline Erosion in Rehobot Bay, Delaware, U.S.A., *Journal of Coastal Research*, 2001, 17(3), 672-683.
- Tonelli, M., Fagherazzi, S. & Petti, M. Modeling wave impact on salt marsh boundaries, *J. Geophys. Res.*, 2010, 115, C09028.
- Townend, I., Fletcher, C., Knappen, M. & Rossington, K. A review of salt marsh dynamics, *Water and Environment Journal*, 2011, 25(4), 477-488.
- Van der Wal, D. & Pye, K. Patterns, rates and possible causes of saltmarsh erosion in the Greater Thames area (UK), *Geomorphology*, 2004, 61, 373-391.
- Van Eerd, M.M., Salt Marsh Cliff Stability in the Oosterschelde, *Earth Surface Processes and Landforms*, 1985, 10, 95-106.