

Idro-morfodinamica di una spiaggia sottoposta a mareggiate caratterizzate da differente raggruppamento delle onde: esperimenti in larga scala

Pasquale Contestabile

Seconda Università di Napoli, Italy. E-mail: pasquale.contestabile@unina2.it

Sommario

La zona di battigia presenta un delicato equilibrio idro-morfodinamico, per cui a modeste variazioni delle condizioni idrodinamiche al contorno possono corrispondere sensibili effetti morfologici. Negli ultimi anni si sono osservati grandi progressi per quanto concerne la modellazione del trasporto sedimentario in questa regione. Tuttavia, molti elementi concettuali sono ben lontani dall'essere nitidamente definiti e, certamente, misurazioni di campo risultano alquanto complesse e perturbate. In un quadro siffatto appare evidente come disporre di dati di alta qualità ottenuti in condizioni controllate, giochi un ruolo cruciale. Il presente articolo descrive gli esperimenti condotti presso il canale a larga scala dell'Università Politecnica della Catalogna. L'obiettivo era studiare la risposta di una spiaggia a mareggiate caratterizzate da differente raggruppamento delle onde.

Parole chiave: onde lunghe, gruppi d'onda, fattore di raggruppamento, idro-morfodinamica di spiaggia, zona di swash, zona di surf, barra longitudinale.

Introduzione

La zona di battigia (meglio nota in letteratura come swash zone) è la porzione di spiaggia alternativamente sommersa dall'acqua durante la fase di risalita dell'onda ed esposta all'aria dalla successiva ridiscesa. È caratterizzata da un delicato equilibrio idro-morfodinamico, per cui a modeste variazioni delle condizioni al contorno possono corrispondere sensibili effetti morfologici (Contestabile, 2011). Appare ormai chiaro che l'idro-morfodinamica della spiaggia è legata sia a movimenti ondosi infra-gravitazionali di bassa frequenza, sia a fenomeni di vorticità e collisioni di breve periodo sulla linea di riva (Brocchini e Peregrine, 1996). I due meccanismi non sembrano escludersi a vicenda ma piuttosto, pur essendo entrambi presenti, l'uno domina l'altro, a seconda dello stato di mare e della pendenza di spiaggia. Recentemente, Holland e Puleo (2001) hanno dimostrato che la presenza o l'assenza di collisioni potrebbe descrivere la tendenza all'accumulo o all'erosione (altresì suggerito dalle osservazioni di Kemp, 1975). Difatti, su litorali caratterizzati da tempi di runup-rundown superiori al periodo dell'onda incidente, è probabile che si realizzi un irripidimento della spiaggia. Viceversa, lì dove i cicli di swash hanno durata simile o addirittura inferiore al periodo d'onda, è atteso il verificarsi di un'azione erosiva tesa all'appiattimento del profilo di spiaggia.

Allo stato attuale, l'azione delle onde corte è da considerarsi sufficientemente inquadrata in termini idro-morfodinamici mentre quella delle onde a bassa frequenza è ancora sottovalutata.

Le onde corte possono contribuire mediante oscillazioni ad alta e bassa frequenza (Elgar et al., 1992; Herbers et al., 1995a; Ruessink, 1998). Nel primo caso, queste sono il risultato delle dissipazioni energetiche nella surf zone che portano alla generazione di componenti oscillatorie con frequenza confrontabile con quella delle stesse onde incidenti. Nel caso delle oscillazioni a bassa frequenza, possono essere distinte almeno due componenti principali relative:

- 1) al raggruppamento di onde, legate cioè alle variazioni del punto di frangimento dovute alla differente altezza delle onde nel gruppo (Baldock e Holmes, 1999; Shah and Kamphuis, 1996);
- 2) componenti di interazioni di swash, dovute cioè alle interazioni tra successivi uprush/backwash (Carlson, 1984; Erikson et al., 2006) e/o sovrapposizione/cattura di successive collisioni di breve periodo sulla linea di riva (Bradshaw, 1982).

Le onde incidenti lunghe, d'altra parte, sono generalmente riflesse e pertanto il loro contributo si manifesta come una componente oscillatoria stazionaria (Huntley, 1976; Suhayda, 1974, Butt et al., 2005). La presenza di tale componente stazionaria rende difficile determinare se e quanto ulteriori onde a bassa frequenza sono generate entro la swash zone stessa. Le osservazioni sperimentali condotte da Baldock e Huntley, 2002 e Battjes et al., 2004, nonché le conclusioni tratte da Watson et al., 1994, recentemente rielaborate da Brocchini e Baldock (2008), sembrano suggerire che la generazione di onde lunghe nella swash zone è correlata alla presenza di gruppi di onde molto corti (in genere poco probabili).

Senza dubbio, una delle caratteristiche essenziali della swash zone è la capacità di operare come filtro passa basso: le onde incidenti di maggior intensità inglobano quelle più piccole con la conseguente riduzione in frequenza del segnale ondoso uscente dalla swash zone. Questo meccanismo è capace di influenzare il trasporto dei sedimenti in quanto interviene nella relazione di fase anche per le onde corte: l'ondulazione della superficie libera, infatti, comporta la modificazione in ampiezza delle onde corte, con possibilità di frangimento in differenti posizioni della spiaggia. Inoltre, le onde lunghe da un lato incrementano l'avvezione dei sedimenti in sospensione, dall'altro inducono una profonda modificazione dello strato limite, intervenendo così anche sul trasporto di fondo.

Sebbene la maggior parte del trasporto dei sedimenti è indotto da onde corte e da meccanismi ad esse direttamente riconducibili (ad esempio le associate correnti di ritorno), tuttavia l'evoluzione morfologica dipende dai tassi di trasporto netto. Con particolare riferimento ai flussi di uprush e backwash nella swash zone ma, *mutatis mutandis*, opportunamente riferibile anche alle idrodinamiche della Surf Zone, Masselink e Puleo (2006) conclusero che il trasporto netto è il risultato della piccola differenza tra due grandi quantità.

Nell'ambito delle scale temporali delle onde lunghe e dei gruppi d'onde, questi tassi di trasporto onshore e offshore subiscono modifiche lievi, motivo per il quale, la loro influenza è stata sottovalutata. In realtà, per quanto detto sinora, siccome l'entità del trasporto sedimentario legato ad onde corte ed undertow è, in generale, simile ma di segno opposto (Ruessink et al., 2008), la dinamica dei sedimenti legata alle onde lunghe (libere o confinate ai gruppi d'onda) acquista, paradossalmente, una importanza relativa maggiore. Ad oggi, l'investigazione sperimentale diretta del ruolo delle onde lunghe e dei gruppi d'onda è stata limitata. Qualche studio ha interessato l'influenza di gruppi d'onda in acque alte (per esempio Baldock et al., 1996 e Johannessen and Swan, 2001), ma nessuno si è interessato all'ambiente costiero. In campo, come proposto da Symonds and Bowen (1984) ed osservato da Michallet et al. (2007), la struttura dell'onda lunga potrebbe essere determinata dalla morfologia a causa degli intesi processi di feedback idro-morfodinamici (vedi anche Aagaard, 1990; Aagaard et al., 1994). Evidentemente, non essendo disponibile un confronto con una morfologia senza onda lunga, è difficile apprezzarne appieno gli effetti, effetti che comunque sono stimati importanti soprattutto su larghe scale spazio-temporali (Plant et al., 2004; Brocchini e Baldock, 2008).

Goda (1975) suggerisce che l'interazione tra onde lunghe e corte induce alla desaturazione della zona di surf alle frequenze delle onde corte. Queste, in particolare, possono influenzare le onde libere (lunghe) in diversi modi, quali dissipazioni energetiche mediante turbolenza, cambi di fase dovuti alla variazione del set-up e alla modifica della riflettività della linea di riva.

Esperimenti in piccola scala su una spiaggia a forte pendenza condotti da Baldock et al. (1997) mostrano come il movimento della linea di riva appaia modulato sulla frequenza di raggruppamento delle onde incidenti.

Dunque, seppure siano stati intuiti gli effetti delle singole onde lunghe in termini idrodinamici e di movimento della linea di riva, poco si sa delle interazioni tra onde lunghe libere (free long waves) e confinate associate ai gruppi d'onda (bound waves) e le relative dinamiche nella swash zone. La complessità del problema ha suggerito la necessità di ottenere ed operare su dati acquisiti mediante investigazioni di laboratorio di alta qualità. Gli esperimenti a larga scala sono stati condotti presso il Laboratorio di Ingegneria Marittima (LIM) dell'Università Politecnica della Catalogna (Barcellona), svolti nel periodo Luglio-Ottobre 2009. Il progetto, dal titolo: "SUSCO: Swash zone response Under grouping Storm COnditions", coordinato dal Dott. Diego Vicinanza, è stato finanziato dall'Unione Europea nell'ambito del 6° Programma Quadro "HYDRALAB III.

Quest'articolo fornisce i principali risultati morfodinamici delle simulazioni delle mareggiate ad alta energia (test di tipo Erosivo).

Durante le prove sperimentali è stata attentamente monitorata l'idrodinamica nella swash zone e la risposta morfologica della spiaggia sottoposta a condizioni di differente raggruppamento delle onde all'interno della mareggiata.

Il set up sperimentale

L'indagine sperimentale in larga scala è stata condotta presso il canale ondogeno dei Laboratori di Ingegneria Marittima dell'Università Politecnica della Catalogna (UPC). Il canale ha una lunghezza di 100 m, una larghezza di 3 m ed una profondità di 5 m. La generazione di onde regolari e irregolari è controllata ed ottenuta tramite un generatore "a cuneo" particolarmente indicato per le profondità intermedie. Rispetto al fondo del canale, il tirante idrico era di 2.5 m. Per la realizzazione del fondale si è impiegata una sabbia media con diametro caratteristico (d_{50}) pari a $246\mu\text{m}$ ed una velocità di caduta di 34 mm/s . Il profilo di spiaggia si mantiene orizzontale per circa 45 m a partire dal generatore, assumendo poi inclinazione costante 1:15 per tutto il resto del canale.

Il programma delle prove è caratterizzato da due differenti livelli energetici che, sulla base dei macro-effetti morfologici previsti, furono definiti "Erosivo" ed "Accumulativo". Nell'ambito di tali livelli energetici sono state sviluppate sette diverse tipologie di onde, per un totale di quattordici condizioni ondose simulate. Questo articolo riferisce ai soli test ad alta energia. In particolare, così come riportato in Tabella 1, sono stati condotti:

n° 1 test con onda regolare monocromatica (nel seguito denominato M_E);

n° 2 test con combinazioni di onde libere lunghe e onde monocromatiche corte che differiscono essenzialmente per il periodo dell'onda lunga (nel seguito definiti C_E1 e C_E2);

n° 2 test con onde bicromatiche, caratterizzate da differente sfasamento delle componenti (B_E1 e B_E2);

n° 2 test con onde irregolari, caratterizzate da differente fattore di raggruppamento (R_E1 e R_E2).

Onde random con differente fattore di raggruppamento delle onde (GF) possono ottenersi attraverso la correlazione delle fasi: un'alta correlazione porta ad alti raggruppamenti e viceversa. Diverse sono le definizioni e i modi di computare tale fattore come diversi sono le tecniche per la generazione di gruppi d'onda (Longuet-Higgins, 1974), Rapp e Melville, 1990, Baldock et al., 1996, Barnes, 1996, Johannessen e Swan, 2001). In questi esperimenti, il fattore di raggruppamento è stato calcolato mediante la trasformata di Hilbert al fine di ottenere la deviazione standard della curva di involuppo spettrale $E(t)$ e la varianza della serie temporale del profilo d'onda $\sigma^2[\eta(t)]$ come proposto da Hald (1995). Il fattore di raggruppamento è pertanto definito come:

$$GF = \frac{\sigma[E(t)]}{\sigma^2[\eta(t)]} \quad (1)$$

Un approccio tipico nella generazione di onde irregolari è quello di operare su fasi random non correlate che, mediamente, portano a un fattore di raggruppamento pari ad 1, con una deviazione standard, nel caso di pacchetti di 500 onde, approssimativamente pari a 0.13. Valori più alti di GF possono essere ottenuti esclusivamente correlando le fasi. In questo studio, la correlazione delle fasi (θ) avviene imponendo il profilo d'onda e il corrispondente movimento del battitore (mediante la funzione di trasferimento proposta da Biesel), ovvero:

$$\eta(x=0, t) = \sum_{i=1}^N a_i \cdot \cos(\omega_i t - k_i x + \theta_i) \quad (2)$$

$$\theta_i = (1 - p) \cdot 2\pi \cdot \varphi_i + p \cdot \theta_{i-1} \quad (3)$$

dove a_i sono le ampiezze d'onda, ω è la frequenza angolare, t è il tempo, k è il numero d'onda, x è la distanza dal generatore, φ è una variabile uniformemente distribuita da 0 a 1 e $p > 0$ fornisce le fasi correlate. GF è variabile lungo il canale e pertanto il termine kx è importante in vista della ricerca del più alto valore di GF . Nello specifico k è approssimativamente quella ottenuta mediante l'equazione di dispersione lineare imponendo il tirante idrico al generatore, mentre ad x è stato imposto il valore di 50 (circa metà lunghezza del canale). In definitiva i valori di fattore di raggruppamento (teorici) riportati in Tabella 1 sono ottenuti rispettivamente per $p = 0.0$ e $p = 0.2$.

In generale, il raggruppamento delle onde è una caratteristica stimabile per qualunque stato di mare. Pertanto, nel seguito, si riferirà di raggruppamento delle onde anche in merito alle altre condizioni ondose simulate, e

non esclusivamente per caratterizzare le onde random.

Allo scopo di rendere pienamente consistente il confronto tra i diversi risultati morfologici ed idrodinamici, al termine di ogni prova è stato ricostituito il profilo di spiaggia originale mediante rimodellamento manuale. I test sono costituiti da 4 fasi di differente durata, scandite dalla misurazione del profilo longitudinale: la prima e seconda di 30 minuti mentre la terza e quarta di un'ora, in modo da poter monitorare opportunamente le modifiche morfologiche, attese più veloci all'inizio del test stesso.

Il set up dettagliato, la strumentazione e la descrizione completa dei test sono riportati in Vicinanza et al., (2009) e Vicinanza et al., (2010).

Tabella 1 - Caratteristiche ondose.

Condizioni Erosive				
Test	H_{m0}	T_p	Tipologia	$H_{\beta}/H_{\beta,max}$
	[m]	[s]		[-]
M_E	0.4	3.7	Monocromatica	0.86
C_E1	0.5	3.7	Combinazione	0.66
	0.023	29.25		
C_E2	0.41	3.7	Combinazione	0.75
	0.011	15.1		
B_E1	0.29	3.5	Bicromatica	0.91
	0.29	3.9		
B_E2	0.34	3.1	Bicromatica	1
	0.34	4.3		
R_E1	0.45	4.2	Random $GF=1$	0.73
	0.06	22.5		
R_E2	0.46	4.2	Random $GF=1.1$	0.57
	0.06	22.7		

Risultati Morfologici

A parità di flusso medio di energia le onde bicromatiche hanno mostrato maggior erosione delle equivalenti onde monocromatiche. Ciò è evidenziato confrontando il profilo iniziale relativo all'onda monocromatica (M_E_0) con i finali (M_E_4, B_E1_4, B_E2_4) in Figura 1a. Per le condizioni bicromatiche si registra, in particolare, un ampliarsi della regione spaziale soggetta ad evoluzione morfologica (creazione di due barre sommerse) in funzione della separazione in frequenza tra i due modi che generano l'onda. Dunque, al diminuire dello sfasamento tra le frequenze delle componenti, ovvero passando da B_E2 a B_E1, è associato un più intenso trasporto offshore. Infatti, la condizione a lieve differenza delle componenti, B_E1, interviene con vigore nella parte più offshore del dominio (provvedendo a generare una barra notevole); la B_E2, invece, produce un'erosione generalizzata nella parte intermedia di spiaggia, con materiale che da un lato è impiegato alla creazione di una barra, mentre dall'altra produce una berma di riva. In entrambi i casi si assiste ad un irripidimento della zona di swash.

Analizzando in dettaglio la morfodinamica dell'onda monocromatica M_E (Fig. 1a) si nota come questa sembri produrre una movimentazione dei sedimenti quasi esclusivamente riconducibile ad una singola ondulazione, ovvero caratterizzata da un significativo scavo ed un altrettanto importante accumulo (barra) localizzati intorno alla progressiva $X = 72$ m. Ciò è dovuto alla regolarità delle onde che producono un trasporto solido perlopiù localizzato ad una determinata distanza da riva e non distribuito su gran parte della spiaggia sommersa, come evidenziato dai risultati degli altri test. Sembra che si verifichi, insomma, un comportamento qualitativamente simile a quello evidenziato da Sumer e Fredsøe (2000) relativamente allo scavo prodotto da onde regolari riflesse da muri a parete verticale e scogliere sommerse, per i quali accumulo/erosione di sedimenti avvengono in funzione della posizione dei nodi/antinodi dell'onda stazionaria ottenuta per riflessione dell'onda incidente. Considerando il caso C_E2 (Fig. 1b), risultante delle combinazioni di onde monocromatiche corte (praticamente quelle del test M_E) ed onde con periodo di 15 secondi, viene suggerito che l'effetto delle onde lunghe è,

sostanzialmente, quello di ampliare la regione dove avviene il trasporto sedimentario, senza tuttavia stravolgere i principali caratteri morfologici dunque dettati dall'onda regolare. Tuttavia, la barra è leggermente spostata verso largo e la piccola berma di riva è costruita più in alto, indicando che le influenze sui processi di trasporto non sono trascurabili e gli effetti morfologici potrebbero essere più evidenti se l'osservazione venisse protesa nel tempo.

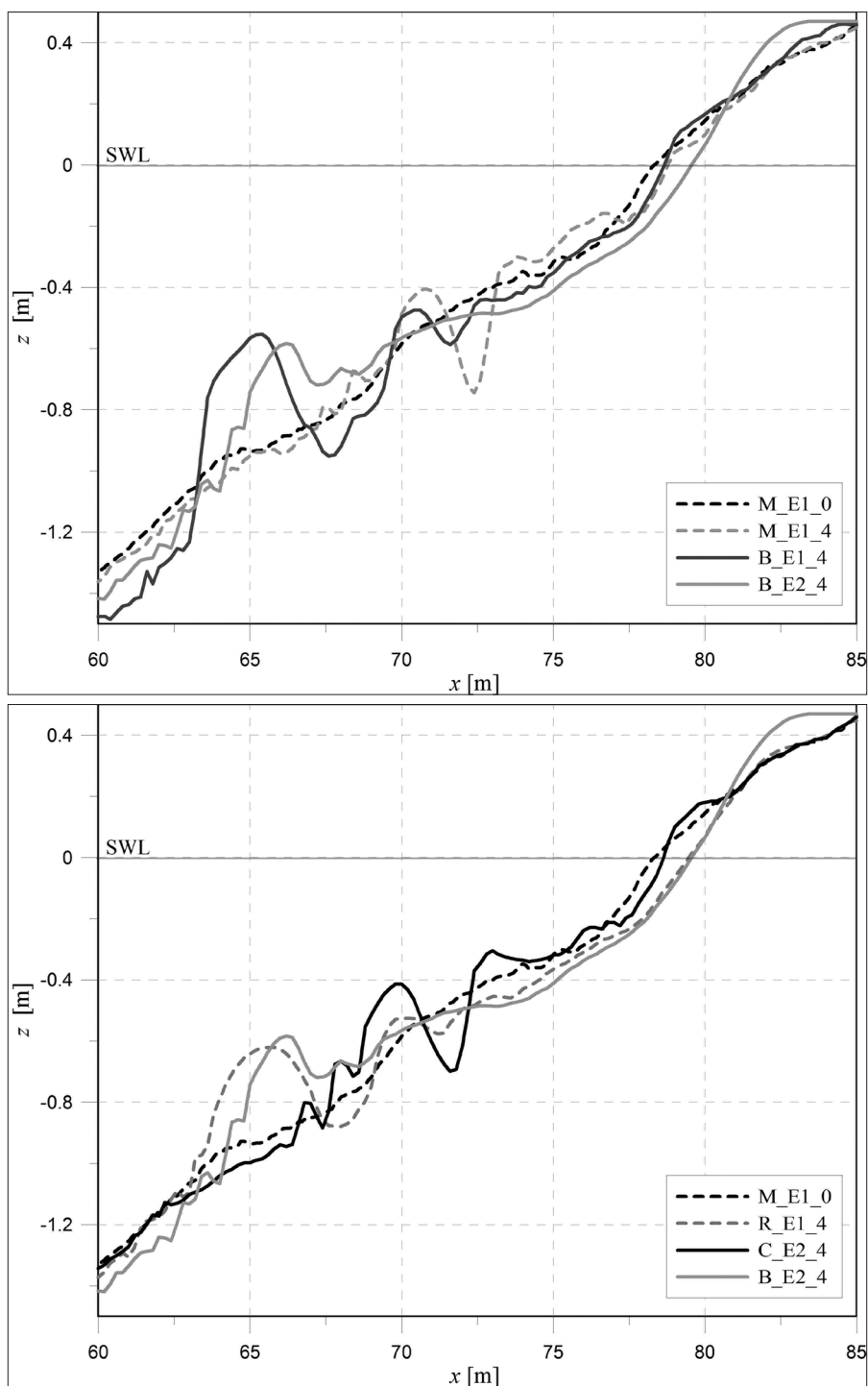


Figura 1 - Confronto tra profili di spiaggia: a) test M_E, B_Ea e B_E2; b) test R_E1, C_E2 e B_E2.

Il fattore di raggruppamento delle onde random sembra mostrare effetti simili a quelli provocati dalla separazione in frequenza delle componenti delle onde bicromatiche. Le onde random con $GF = 1$ (R_E1), infatti, comportano modifiche al profilo di spiaggia molto simili a quelle delle bicromatiche B_E2 (Fig. 1b). La buona coerenza tra i risultati degli esperimenti bicromatici e random dà confidenza nei dati.

Discussione e Conclusioni

La grande variabilità del profilo di spiaggia evinta in Figura 1 rappresenta, di per se, un risultato notevole. Infatti non è da dimenticare che tali risposte morfologiche avvengono a parità di condizioni di spiaggia iniziali ed a parità di contenuto energetico e pertanto si evidenzia chiaramente la sensibilità della spiaggia al differente modo in cui sono raggruppate le onde. Ciò conferma, tra l'altro, che il livello energetico medio delle onde non assume un ruolo esclusivo o preponderante nella regolazione della morfologia costiera.

Una spiegazione euristica di tale comportamento può trarsi dal modo in cui le onde all'interno di un gruppo interagiscono l'una con l'altra durante il frangimento. In Tabella 1 sono riportati i valori delle altezze H_{β} delle "bore" vale a dire delle onde generate post-frangimento, adimensionalizzate rispetto al massimo valore $H_{\beta,max}$ misurato nei test, ovvero relativo al caso B_E2. Si nota che nonostante il livello energetico sia uguale per tutte le condizioni ondose, gli effetti del raggruppamento sulla idrodinamica sono considerevoli. Assumendo il trasporto sedimentario come funzione di u^3 e H^3 , appare evidente che sono le onde più alte che dominano il processo di trasporto. I maggior valori di H_{β} misurati per le onde bicromatiche, dunque, provvedono una plausibile spiegazione dei più alti tassi di trasporto rilevati. In definitiva i dati dimostrano che l'aumento delle differenze nelle componenti spettrali dell'onda attraverso perturbazioni delle onde monocromatiche con le onde lunghe, o ampliando la larghezza della banda in gruppi d'onda bicromatici, o diminuendo il fattore di raggruppamento in onde random, promuove lo spostamento delle forme di fondo, in particolare della barra e della berma di riva. Ulteriori significativi aspetti dei risultati morfodinamici ottenuti possono essere tratti nel considerare le onde irregolari. Nell'ambito dei due livelli energetici, le onde random si differenziavano per il solo fattore di raggruppamento. Con lo scopo di fornirne una semplice ed intuitiva immagine, dunque risparmiando sulla rigosità della enunciazione, si può ritenere il GF una misura della consecutività nel dominio del tempo delle onde più energetiche nell'ambito di uno stato di mare. In altre parole, le onde random si differenziavano solo nel dominio del tempo. Infatti, la figura 2a confronta i due spettri di energia calcolati tramite il trasduttore wg3 (posto a 10,7 m dal battitore) per i casi erosivi random, R_E1 e R_E2: solo una lieve discrasia può essere rilevata. Tuttavia, confrontando la loro risposta morfologica, si possono apprezzare differenze significative sullo sviluppo della barra (Fig. 2b). Più in dettaglio, in linea con le osservazioni per i gruppi bicromatici (per i quali, tuttavia,

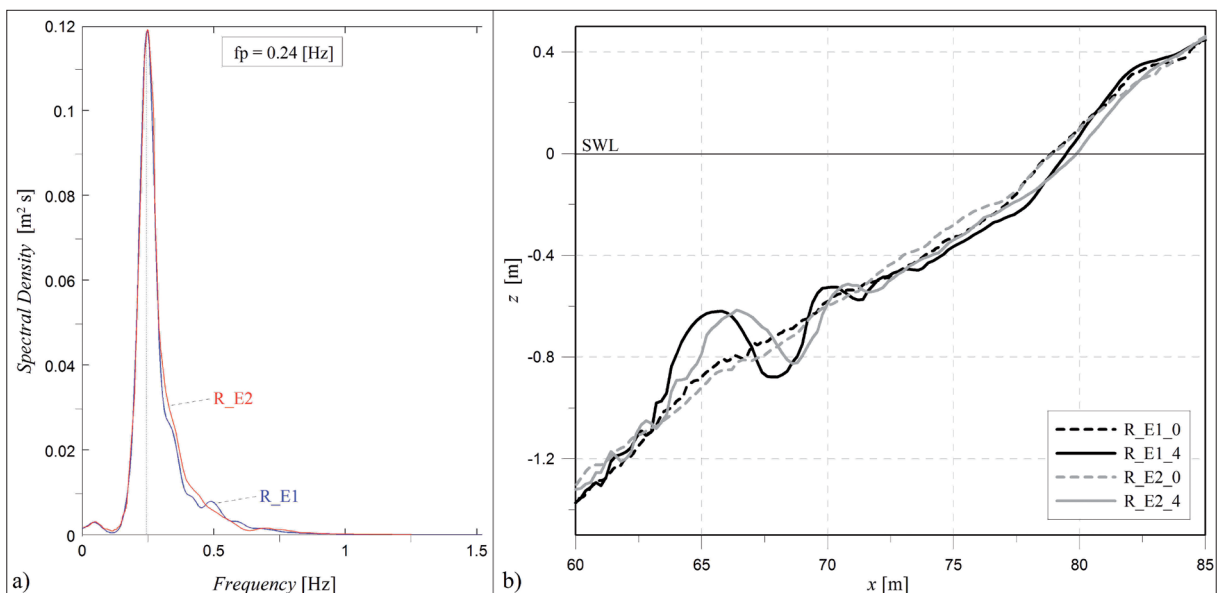


Figura 2 - a) confronto degli spettri d'energia per i casi random; b) confronto tra i profili longitudinali.

gli spettri d'energia erano sostanzialmente diversi tra di loro), le onde irregolari con GF maggiore (R_E2) (analogamente alle bicromatiche a banda stretta) sembrano generare una barra più vicina a riva di quella prodotta dalle onde con GF minore (così come per le bicromatiche a banda più larga). Inoltre, dal punto di vista idrodinamico, il caso R_E2 ha un valore di H_{β} circa 1.3 volte superiore a quello del caso R_E1.

Tali risultati mostrano come la caratterizzazione degli stati di mare in termini di caratteristiche spettrali (cioè nel dominio della frequenza) può essere insufficiente per gli studi idro-morfodinamici. Il risultato può portare a implicazioni rilevanti nella modellazione, giacché le onde irregolari sono di tradizionale impiego nella simulazione di stati di mare reali.

Ciò avvalorava l'idea che il futuro della modellazione a larga scala dovrebbe seguire un approccio ibrido deterministico-probabilistico per tenere conto del runup nel dominio del tempo.

Ringraziamenti

Il lavoro di ricerca svolto presso il Laboratorio di Ingegneria Marittima (LIM) dell'Università Politecnica della Catalogna (UPC), Spagna, dal titolo "SUSCO: Swash zone response Under grouping Storm COnditions", è stato portato a termine nell'ambito del progetto "HYDRALAB III" finanziato dall'Unione Europea nell'ambito del 6° Programma Quadro, numero di contratto 022441 (RII3). L'autore ringrazia gli altri partner del progetto ovvero Diego Vicinanza e Vincenzo Ferrante (Seconda Università di Napoli), Maurizio Brocchini e Matteo Postacchini (Università Politecnica delle Marche), Paolo Ciavola (Università di Ferrara), Tom Baldock e Hannah Power (University of Queensland), Iván Cáceres e José Alsina (UPC), Daniel Conley (University of Plymouth), Thomas Lykke Andersen e Peter Frigaard (Aalborg University), per la proficua collaborazione scientifica.

Bibliografia

- Battjes J. A., H. J. Bakkenes T. T. Janssen e A. R. van Dongeren (2004) - *Shoaling of subharmonic gravity waves*. Journal of Geophysical Research. 109, C02009, doi:10.1029/2003JC001863.
- Baldock T.E., Holmes P., Horn D.P. (1997) - *Low frequency swash motion induced by wave grouping*. Coastal Engineering 32: 197-222.
- Baldock T. E. e D. A. Huntley (2002) - *Long-wave forcing by the breaking of random gravity waves on a beach*. Proceedings of the Royal Society, A, 458: 2177 - 2201.
- Baldock T.E., Holmes P. (1999) - *Simulation and prediction of swash oscillations on a steep beach*. Coastal Eng. 36: 219-242.
- Baldock T. E., Manoonvoravong P. e Kim Son Pham (2010) - *Sediment transport and beach morphodynamics induced by free long waves, bound long waves and wave groups*. Coastal Engineering, 57: 898-916.
- Baldock T.E., Swan C., Taylor P.H. (1996) - *A laboratory study of nonlinear surface waves on water*. Philos. Trans. R. Soc. Lond., A 354: 649-676.
- Barnes T. (1996) - *The generation of low-frequency water waves on beaches*. Ph.D. Thesis, University of Bristol, U.K.
- Bleck M., e H. Oumeraci (2001) - *Wave dampening and spectral evolution at artificial reefs*. Proceedings of the International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis (WAVES 2001), ASCE, 2: 1062-1071.
- Bradshaw M.P. (1982) - *Bores and swash on natural beaches*. Coastal Studies Unit Technical Report No. 82/4, University of Sydney, 107 pp.
- Brocchini M. e Bellotti G. (2002) - *Integral flow properties of the swash zone and averaging. Part 2. Shoreline boundary conditions for wave-averaged models*. Journal of Fluid Mechanics 458: 269-281.
- Butt T., Russell P., Puleo J., Masselink G. (2005) - *The application of Bagnold-type sediment transport models in the swash zone*. Cont. Shelf Res. 21: 887-895.
- Carlson C. - *Field studies of run-up on dissipative beaches* - paper presented at 19th International Conference of Coastal Engineering, Am. Soc. of Civ. Eng., Reston, Va., 1984
- Contestabile P. (2011) - *Hydrodynamics and morphodynamics in the swash zone: Hydralab III large-scale experiments*. PhD Thesis. Università di Napoli Federico II. http://www.fedoatd-2011.unina.it/view/people/Contestabile_Pasquale.html
- Dean R.G., Chen R., Browder A.E. (1997) - *Full Scale Monitoring Study of a Submerged Breakwater, Palm Beach, Florida, USA*. Coastal Engineering, 29: 291-315.

- Elgar S., Herbers T.H.C., Okihiro M., Oltman-Shay J., Guza R.T. (1992) - *Observations of infragravity waves*. J. Geophys. Res. 97: 15573–15577.
- Erikson, L., Larson M., Hanson H. (2006) - *Prediction of swash motion and run-up including the effects of swash interaction*. Coast. Eng. 52: 285–302.
- Goda Y. (1975) - *Irregular wave deformation in the surf zone*. Coastal Eng. Jpn., JSCE 18: 13–26.
- Herbers T.H.C., Elgar S., Guza R.T. (1995a) - *Generation and propagation of infragravity waves*. J. Geophys. Res. 100, 24863–24872
- Holland K.T. e Puleo J.A. (2001) - *Variable swash motions associated with foreshore profile change*. Journal of Geophysical Research 106, pp. 4613–4623.
- Huntley D. - *Long period waves on a natural beach*. J. Geophys. Res., 81: 6441–6449, 1976.
- Johannessen T., Swan C. (2001) - *A laboratory study of the focusing of transient and directionally spread surface water waves*. Proc. R. Soc. Lond., A 457: 971–1006.
- Kemp P.H. (1975) - *Wave asymmetry in the nearshore zone and breaker area*. In: Hails, J., Carr, A. (Eds.), Near-shore Sediment Dynamics and Sedimentation. Wiley-Interscience, London, pp. 47–67.
- Longuet-Higgins M.S. (1974) - *Breaking waves in deep or shallow water*. Proc. 10th Conf. On Naval Hydrodynamics, Cambridge, MA, USA, pp. 597–605.
- Masselink G., Puleo J. A., (2006) - *Swash-zone morphodynamics*. Continental Shelf Research 26: 661–680.
- Plant N. G., Holland K. T., Puleo J. A. e Gallagher E. L. (2004) - *Prediction skill of nearshore profile evolution models*. Journal of Geophysical Research. 109: C01006.
- Puleo J.A., Holland K.T. (2001) - *Estimating swash zone friction coefficients on a sandy beach*. Coastal Engineering 43: 25–40.
- Rapp R.J., Melville W.K. (1990) - *Laboratory measurements for deep water breaking waves*. Philos. Trans. R. Soc. Lond., A 331: 735–800.
- Ruessink B.G., Houwman K.T. e Hoekstra P. (1998) - *The systematic contribution of transporting mechanisms to the cross-shore sediment transport in water depths of 3 to 9 m*. Marine Geology, 152(4): 295–324.
- Seiji M., Uda T., e Tanaka S. (1987) - *Statistical Study on the Effect and Stability of Detached Breakwaters*. Coastal Engineering in Japan, Vol 30, No. 9: 131–141.
- Shah A.M., Kamphuis J.W. (1996) - *The swash zone: a focus on low frequency motion*. Proceedings of the 25th International Conference on Coastal Engineering, pp. 1431–1442.
- Suhayda J. N. (1974) - *Standing waves on beaches*. J. Geophys. Res. 79: 3065–3071.
- Sumer B.M., Fredsøe J. (2000) - *Experimental study of 2D scour and its protection at a rubble-mound breakwater*. Coastal Engineering, 40: 59–87.
- Yamashiro M., Yoshida A., Irie I. (1999) - *Experimental study on wave field behind a submerged breakwater*. Proc. Coastal Structures '99, pp. 675–682. Balkema.
- Vicinanza D., Baldock T. E., Contestabile P., Alsina J., Cáceres I., Brocchini M., Conley D., Andersen T. L., Frigaard P., Ciavola P. (2010) - *Swash zone response under grouping storm conditions*. Journal of Hydraulic Research, ISSN 0022-1686. Journal of Hydraulic Research Vol. 00, No. 0 (2011), pp. 1–9.
- Vicinanza D., Contestabile P., Power H., Alsina J., Cáceres I. (2009) - *Swash zone response*. Under grouping Storm Conditions (SUSCO), Internal Report EC contract no. 022441 (RII3), HYIII-WAVELAB-6, Canal d'Investigació i Experimentació Marítima (CIEM).

Ricevuto il 02/05/2012, accettato il 06/06/2012.