

CONFRONTO FRA VALUTAZIONI DEL RUN-UP FATTE CON UN MODELLO MATEMATICO E UNA FORMULA EMPIRICA CON MISURE DI CAMPO

G. Manno¹, C. Lo Re¹, M. Monteforte¹ & G.B. Ferreri¹

(1) Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali (DICAM)
Università degli Studi di Palermo, Italia. e-mail: giorgio.manno@unipa.it, carlo.lore@unipa.it,
massimiliano.monteforte@unipa.it, giovannibattista.ferreri@unipa.it

SOMMARIO

La posizione planimetrica della linea di riva, solitamente, viene determinata attraverso l'uso di immagini aeree ed utilizzata per la ricostruzione dell'evoluzione storica dei litorali. Tuttavia, le informazioni estratte da tali immagini, descrivendo il confine istantaneo acqua-terra, consentono l'individuazione della linea di riva esclusivamente come limite asciutto-bagnato proprio nel momento della ripresa. Per una più corretta localizzazione della linea di riva, è quindi necessario quantificare, oltre agli effetti di marea e di trasporto solido, gli effetti prodotti dal moto ondoso su tale posizione e in particolare il cosiddetto run-up.

Nel presente lavoro si studia il run-up in una spiaggia naturale a debole pendenza ricadente nella Sicilia occidentale. Lo studio geomorfologico del sito precede lo studio idraulico, che partendo dalle misure di onde al largo, attraverso la loro trasposizione e la propagazione simulata con un modello matematico, porta alla stima delle onde sotto costa. Queste ultime sono utilizzate per valutare il run-up sia mediante una nota formula empirica sia utilizzando un modello numerico alla Boussinesq con una nuova condizione al contorno per la linea di riva. Il confronto dei risultati con le misure di campo mostra che i risultati migliori si ottengono con la formula empirica, nella quale è tuttavia necessario calibrare i coefficienti con misure in situ.

1 INTRODUZIONE

Le fluttuazioni della linea di riva, limite tra terra e mare, sono il risultato dell'interazione fra il moto ondoso e la spiaggia, che ne assorbe l'energia. Il moto ondoso, e in particolare il frangimento e la risalita delle onde sulla spiaggia, hanno un ruolo determinante nei processi fisici costieri più rilevanti (*Coastal Engineering Manual* 2008). Le onde, come ben noto, sono perlopiù provocate dal vento, che trasmette all'acqua superficiale una parte della propria energia cinetica, sotto forma di moto ondoso che si propaga secondo direzioni ortogonali alle creste delle onde stesse. Le onde, avvicinandosi sottocosta, risentono della morfologia del fondo cambiando direzione, forma e dissipando energia. Particolare importanza riveste il frangimento, che si attua quando la velocità dell'acqua sulla cresta dell'onda supera la celerità di propagazione dell'onda stessa; l'onda ricade allora formando un frangente, che sfrutta la

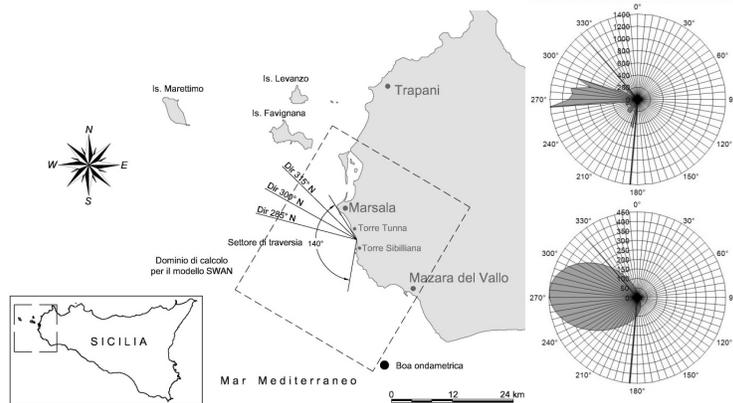


Figura 1. Ubicazione geografica della spiaggia di Lido Signorino con la rappresentazione del fetch geografico, del fetch efficace e del paraggio.

propria energia cinetica per risalire la spiaggia (*run-up*), con maggiore o minore turbolenza, nella cosiddetta *swash zone*, fino all'esaurimento dell'energia cinetica. A questo punto, per gravità l'onda retrocede dando luogo alla risacca (*run-down*).

Questo movimento perenne fa sì che la linea di riva muta continuamente, arretrando e avanzando non solo in dipendenza della morfologia della spiaggia ma anche per le variazioni della superficie del mare dettate dalle onde, dalle maree e dalle correnti. Tale linea, dunque, costituisce un confine fluttuante, la cui localizzazione si presenta notevolmente difficile e incerta. Invero, nonostante questa sua intrinseca proprietà, la linea di riva risulta essere tra gli elementi più caratteristici di un'area costiera. La sua conoscenza è fondamentale sia per progettare e pianificare le opere di difesa sia per gestire e monitorare le molteplici attività antropiche ricadenti in tale area. Un metodo molto diffuso per localizzare la linea di riva è l'esame di immagini aeree le quali, se da un lato fissano la situazione "oggettiva" di confine fra spiaggia emersa e superficie del mare *nell'istante della ripresa*, dall'altro non forniscono indicazioni sullo stato della superficie marina in quell'istante (*frangenti, run-up, run-down, ecc.*), con le conseguenti incertezze sul vero significato della linea di separazione mostrata dall'immagine aerea (Manno *et al.*, 2011). Appare pertanto evidente l'importanza che ricopre la stima della risalita delle onde sulla spiaggia.

L'obiettivo del presente lavoro è il confronto tra le stime di *run-up* fatte con la formula empirica di Nielsen & Hanslow (1991) e di quelle fatte con un modello matematico alla Boussinesq (Lo Re *et al.*, 2012), con misure di pieno campo nella spiaggia di Lido Signorino a Marsala (TP) (fig. 1). La spiaggia, come mostra la figura, si trova nella Sicilia occidentale, è sabbiosa e morfologicamente stabile. Essa è inoltre vicina alla boa ondometrica di Mazara del Vallo (TP), appartenente alla Rete Ondometrica Nazionale gestita dall'ISPRA.

Il lavoro parte dall'acquisizione dei dati ondometrici di una boa vicina, che sono quindi trasposti a largo della spiaggia, da dove le onde sono fatte propagare fino al paraggio in studio. Dopo avere esposto i metodi che saranno adottati per la stima del *run-up*, si passa alla loro applicazione al caso studio e al confronto con i dati sperimentali.

2 STUDIO IDRAULICO PRELIMINARE AL RUN-UP

È noto che il *run-up* in una spiaggia di assegnata morfologia è determinato prevalentemente dal moto ondoso e dal livello di marea. Nel presente lavoro, si è focalizzata l'attenzione solo su al moto ondoso, tralasciando gli effetti mareali.

Per riconoscere gli effetti delle onde sulla posizione della linea di riva nella spiaggia di studio, è stato necessario identificare le caratteristiche (altezza d'onda significativa e periodo) delle onde a largo. A tal fine sono stati utilizzati i dati registrati dalla boa di Mazara del Vallo nelle stesse ore in cui sono state effettuate le misure di *run-up* nella spiaggia di Lido Signorino. Per l'analisi dei dati è stato necessario identificare il *fetch geografico* - traguardando la costa limitrofa lungo la direzione media di provenienza del vento - e il *fetch efficace* tenendo conto di una nota relazione derivata dalla teoria di ricostruzione indiretta del moto ondoso (Saville 1962, Seymour 1977).

Le registrazioni ondametriche, pur essendo rappresentative dell'esposizione climatica del Canale di Sicilia, non tengono conto della diversa posizione geografica della boa e della spiaggia di Lido Signorino. Pertanto, è stata applicata la *trasposizione geografica* per trasferire i dati ondametrici dalla boa a largo della spiaggia. Dato che la spiaggia ha un *fetch* limitato, l'altezza d'onda significativa spettrale H_s e il periodo di picco spettrale T_p sono espresse dalle ben note (Vincent, 1984):

$$\frac{gH_s}{U_A^2} = 1,6 \cdot 10^{-3} \left(\frac{gF}{U_A^2} \right)^{1/2}; \quad \frac{gT_p}{U_A} = 2,857 \cdot 10^{-1} \left(\frac{gF}{U_A^2} \right)^{1/3} \quad (1)$$

dove U_A è il fattore di velocità del vento, dipendente in modo non lineare dalla velocità del vento misurata alla quota di 10 m s.l.m. ed F è il *fetch* efficace della direzione considerata. Le (1), scritte per il punto di misura O e per il punto di trasposizione P , dopo ovvi passaggi portano alle (Contini e De Girolamo, 1998):

$$\frac{H_s^P}{H_s^O} = \left(\frac{F^P}{F^O} \right)^{1/2}; \quad \frac{T_p^P}{T_p^O} = \left(\frac{F^P}{F^O} \right)^{1/3} \quad (2)$$

Ovviamente l'uso di queste espressioni implica che la velocità del vento sia la stessa nei due punti, cosa molto verosimile nel nostro caso vista la posizione della boa e della spiaggia.

Determinate le caratteristiche delle onde significative al largo si è utilizzato il noto modello SWAN (*Simulating Waves Nearshore*) di propagazione spettrale del moto ondoso (Booij et al. 1999, Holthuijsen et al. 1993, Ris et al. 1999), per calcolare le altezze significative e i periodi delle onde sotto costa, analogamente a quanto fatto da Manno (2012).

3 STIMA DEL RUN-UP SULLA SPIAGGIA

Le onde sotto costa ottenute mediante lo SWAN, sono state utilizzate per calcolare il *run-up*, ovvero la quota più alta raggiunta dal flutto montante sulla spiaggia. Per fare ciò si è operato in due modi: 1) utilizzando la formula empirica di Nielsen & Hanslow (1991) e 2) usando il modello numerico di Lo Re et al. (2012). Entrambi i metodi sono stati applicati considerando uno dei profili trasversali della spiaggia rilevati da Manno

(2012), localizzato verso il centro della spiaggia ed avente una pendenza media del 7%. Questa scelta, di simulare l'evoluzione del moto ondoso lungo un profilo ortogonale alla linea di riva, è dovuta agli elevati tempi di elaborazione richiesti dai modelli alla Boussinesq ed è frequente nella pratica. D'altra parte, va osservato che, nella fascia con fondali minori di 5 m (nel nostro caso la batimetrica -5 è a circa 400 m dalla riva), la direzione di avanzamento delle onde diventa quasi ortogonale alla linea di riva. Pertanto, lo studio lungo un profilo ortogonale alla spiaggia non dovrebbe essere causa di gravi errori.

Poiché la nostra attenzione è rivolta al *run-up significativo*, che può essere ben riprodotto utilizzando l'onda significativa, nel modello numerico è stata utilizzata come condizione al contorno un'onda monocromatica.

3.1 La formula empirica

Come è noto, per calcolare il *run-up* esistono numerose formule empiriche (Holman & Sallenger, 1985, Raubenheimer & Guza, 1996, Hughes, 2004). In questo lavoro si è scelta quella di Nielsen & Hanslow (1991). Gli AA. hanno svolto misure su sei spiagge del New South Wales in Australia. I parametri d'onda a largo provenivano da una boa situata a 30 km dalla costa. Le spiagge erano formate da sabbie fini, con diametro medio compreso tra, 0,4 mm e 0,22 mm, con caratteristiche geomorfologiche analoghe a quelle di Lido Signorino. Nielsen & Hanslow hanno verificato che le altezze di *run-up* si distribuiscono secondo la distribuzione di Rayleigh:

$$F(R) = 1 - \exp\left\{-\frac{(R - R_{100})^2}{L_{zwm}^2}\right\} \quad (3)$$

nella quale R_{100} è il valore superato dal 100% delle onde, cioè il limite inferiore della distribuzione, e L_{zwm} la scala verticale della distribuzione, cioè il parametro di forma della stessa.

Gli AA. riscontrando una forte correlazione, sia di R_{100} con $(H_{0rms} \cdot L_0)^{0,5}$, sia di L_{zwm} con $(H_{0rms} \cdot L_0)^{0,5}$ e $\tan\gamma$ cioè:

$$R_{100} = \beta \cdot (H_{0rms} \cdot L_0)^{0,5} \quad (4)$$

$$L_{zwm} = \alpha \cdot (H_{0rms} \cdot L_0)^{0,5} \cdot \tan\gamma \quad (5)$$

dove $H_{0rms} = 0,706 \cdot H_s$ è il valore quadratico medio delle altezze d'onda a largo, $L_0 = gT^2/(2\pi)$ la lunghezza d'onda a largo, $\tan\gamma$ la pendenza della spiaggia e α e β sono dei coefficienti. Per le spiagge australiane essi hanno proposto le seguenti espressioni:

$$L_{zwm} = \begin{cases} 0,60 \cdot (H_{0rms} \cdot L_0)^{0,5} \tan\gamma & \tan\gamma \geq 0,10 \\ 0,05 \cdot (H_{0rms} \cdot L_0)^{0,5} & \tan\gamma < 0,10 \end{cases} \quad (6)$$

$$R_{100} = 0,06 \cdot (H_{0rms} \cdot L_0)^{0,5} \quad (7)$$

3.2 Il modello numerico

Il metodo di calcolo del *run-up* applicato (Lo Re et al., 2012) utilizza un modello

integrato sulla verticale per onde frangenti di tipo *Boussinesq* con equazioni risolte rispetto a ζ e u , indicando con ζ la quota della superficie libera rispetto al livello di quiete e u la velocità orizzontale mediata lungo la profondità. I valori delle variabili ζ e u sono determinati all'interno del dominio bagnato, mentre la posizione della linea di riva, individuata attraverso la sua coordinata orizzontale $\xi(t)$ (ortogonale al litorale), e la sua velocità di avanzamento u_s si calcolano risolvendo le equazioni lagrangiane del movimento della linea di riva. Come è noto, infatti, simulare numericamente l'oscillazione della linea di riva con i modelli alla *Boussinesq* non è semplice, perché i modelli numerici di questo tipo hanno difficoltà nel discriminare la parte bagnata del dominio da quella asciutta. Nel caso di un'onda monodimensionale come quella da noi considerata, la coordinata ξ è funzione solo del tempo, cioè $\xi = \xi(t)$ e l'equazione cinematica nella linea di riva è:

$$\frac{d\xi}{dt} = u_s \quad (8)$$

la quale indica che le particelle di fluido appartenenti alla linea di riva rimangono sulla linea stessa (Prasad & Svendsen, 2001). Si riconosce inoltre che la velocità della linea di riva può essere ricavata utilizzando la seguente espressione:

$$\frac{du_s}{dt} = -g \frac{\partial \zeta_s}{\partial x} \Big|_s + F_{fric} \quad (9)$$

dove ζ_s è la quota proprio della linea di riva e F_{fric} il termine di attrito al fondo valutato mediante la:

$$F_{fric} = -\frac{f}{h + \zeta} \cdot u \cdot |u| \quad (10)$$

dove h è la profondità locale ed f il coefficiente di attrito al fondo. Quando a causa dei bassi fondali il valore F_{fric} diventa troppo grande, viene utilizzato un opportuno valore di soglia, la dipendenza dal fondale viene trascurata e l'attrito è considerato come una funzione quadratica della velocità media lungo la verticale, secondo la:

$$F_{fric} = -C_f \cdot u \cdot |u| \quad (11)$$

dove C_f è un coefficiente che nel presente lavoro, analogamente a quanto fatto da Lo Re et al. (2012), è stato assunto pari a 5 m^{-1} .

3.3 Le misure dirette

Le misure del *run-up* sulla spiaggia, utilizzate per confrontare i due precedenti metodi, sono state effettuate con rilievi ad elevata frequenza di acquisizione, per mezzo di una videocamera digitale della Canon installata su un supporto appositamente posizionato. La tecnica di misura attraverso videocamera ha permesso l'acquisizione di molte immagini in continuità, rendendosi molto preziosa proprio per il rilievo del *run-up*. La scelta della posizione della stazione video è fondamentale, dovendo la videocamera riprendere l'intera area di studio pur standone ad una distanza minima, in modo tale da ottenere il massimo dettaglio delle immagini (Archetti e Romagnoli, 2011).

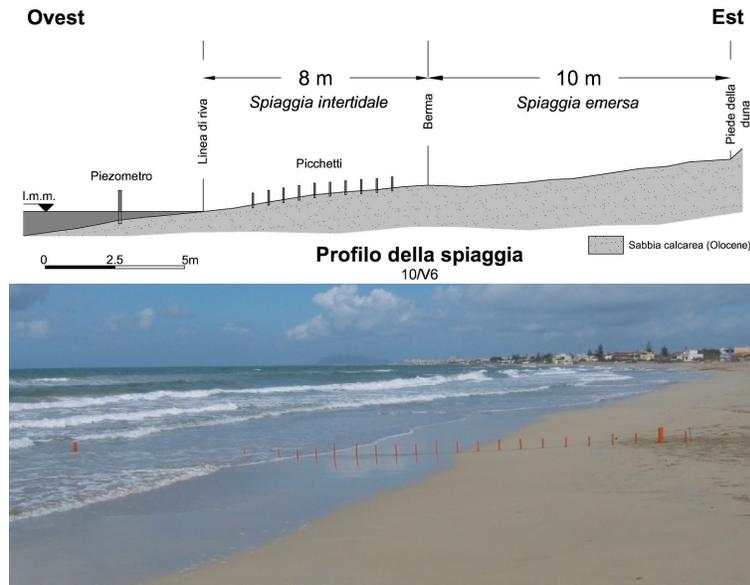


Figura 2. Il profilo di riferimento per la misura del *run-up* a Lido Signorino.

Le misure sono state effettuate lungo una linea retta resa visibile mediante picchetti infissi nella sabbia (fig. 2), distanziati l'uno rispetto all'altro di 0,5 m. Il profilo della spiaggia allineato con i picchetti è stato georiferito utilizzando i punti di controllo del rilievo topografico di Manno (2012). Per determinare il livello idrico "di riferimento" (ovverossia il livello medio marino durante le misure), il primo picchetto lato mare era un tubo di plexiglas con imbocco strozzato che fungeva da piezometro. La videocamera è stata posizionata a 10 m dal profilo e la direzione di ripresa era ortogonale alla linea dei picchetti. Il video digitale, della durata di 240 minuti, è stato analizzato per individuare la massima risalita di ogni onda. Tutte le distanze orizzontali individuate attraverso la videoregistrazione sono state riferite alla linea di riva corrispondente al livello medio marino misurato con il piezometro.

In accordo con Nielsen & Hanslow (1991), a ciascun campione di valori di *run-up* R registrati in finestre temporali di trenta minuti ciascuna (otto finestre in tutto) è stata adattata la distribuzione di Rayleigh espressa dall'eq. (3) utilizzando il metodo di stima dei minimi quadrati. L'applicazione della distribuzione di Rayleigh ai nostri dati ha permesso il calcolo dei *run-up* al 1%, al 2%, al 50% e inoltre di quello significativo, ovverossia corrispondente alla media del terzo più alto.

3.4 Il caso studio

La spiaggia di studio, che prende il nome da uno dei lidi storici del luogo, *Lido Signorino* appunto, ricade nel territorio del Comune di Marsala, mentre dal punto di vista geomorfologico è all'interno dell'unità fisiografica siciliana n.14. Lido Signorino è una spiaggia a debole pendenza ($1,5^\circ < \tan \gamma < 10,8^\circ$) che si estende in direzione N-S per

Finestra temporale	Acque profonde		Fondale -60 [m]		Fondale -5 [m]		
	H_s [m]	T_p [s]	H_s [m]	T_m [s]	H_s [m]	T_m [s]	T_p [s]
11.30-12:00	1,13	6,13	1,12	5,04	0,86	4,81	6,16
12.00-12:30	1,05	7,27	1,05	6,01	0,90	5,86	7,51
12.30-13:00	1,07	5,94	1,05	4,90	0,89	4,76	6,10
13.00-13:30	1,04	7,18	1,04	5,91	0,86	5,70	7,30
13.30-14:00	1,03	7,25	1,03	5,99	0,87	5,83	7,47
14.00-14:30	1,10	7,26	1,10	5,97	0,94	5,81	7,50
14.30-15:00	0,99	6,93	0,98	5,69	0,82	5,48	7,03
15.00-15:30	1,05	6,33	1,05	5,21	0,89	5,06	6,49

Tabella 1. Parametri d'onda del 29 marzo 2012, calcolati in acque profonde, in acque intermedie e in acque basse, dalle ore 12.00 alle 15.30.

circa 3,5 km ed è compresa tra due promontori. Le frazioni granulometriche della spiaggia sono costituite mediamente dallo 0,4% di limo, dallo 0,6% di argilla e dal 99% di sabbia. Il diametro medio delle particelle di sabbia è compreso tra 0,8 e 0,18 mm.

Le caratteristiche anemologiche del paraggio sono state dedotte attraverso l'analisi delle direzioni e delle velocità del vento registrate dalla stazione meteorologica di Trapani in un periodo compreso tra il 2004 e il 2008. Il settore di traversia (fig. 1) ha un'ampiezza di 140° ed è delimitato a nord dal promontorio di Torre Tunna (325°N) mentre a sud dal promontorio di Torre Sibilliana (185°N) (Manno, 2012). Si noti che, per la presenza dell'arcipelago delle isole Egadi, la spiaggia è "schermata", in particolare dall'isola di Favignana lungo la direzione di 320°N. Il *fetch* geografico è stato ricavato dalla carta del Mar Mediterraneo a scala 1:2.250.000, misurando le distanze da "costa a costa" con una discretizzazione con passo radiale di 5°. Il *fetch* così identificato risulta limitato ad ovest dalle coste della Spagna, a nord-ovest dalla Sardegna e a sud dalle coste della Tunisia.

Per la stima del *run-up*, come si è già ricordato, sono stati utilizzati i dati ondometrici della boa di Mazara del Vallo (DATAWELL *Directional wavec* MkI). I dati utilizzati sono: le altezze d'onda significative, H_s [m], i periodi d'onda di picco e medi, T_p e T_m [s], e la direzione media di provenienza del moto ondoso, D_m [°N]; l'arco temporale analizzato va dalle ore 12.00 alle ore 15.30 del 29 marzo 2012. Come si è già ricordato, la posizione reciproca della boa e della spiaggia (fig. 1) ha reso necessario la trasposizione dei parametri d'onda attraverso l'uso dell'eqq.(2).

La propagazione del moto ondoso da largo a sotto costa è stata effettuata mediante il modello spettrale SWAN, utilizzando un apposito dominio di calcolo rettangolare, con lati di 36,4 e 30,5 km, adottando maglie quadrate con lato di 100 m; la batimetria è stata rilevata dalle carte nautiche. Il modello di propagazione dello spettro energetico ci ha restituito le altezze d'onda significative sia alla batimetrica -60 m sia alla batimetrica -5 m. Le caratteristiche delle onde a largo e sotto costa, per diversi orari durante il periodo di misura del *run-up*, sono mostrate nella tab.1.

I parametri d'onda sotto costa sono stati utilizzati per la stima del *run-up* lungo il profilo considerato (fig. 2), applicando il modello numerico alla *Boussinesq* già utilizzato da *Lo Re et al.* (2012). A tal fine è stato adottato un treno di onde monocromatico, con altezza pari a quella significativa e periodi pari a quelli di picco alla batimetrica -5 m (tab. 1). Il canale numerico utilizzato per la stima del *run-up* è costituito da un tratto orizzontale con fondale di -5 m, con il generatore d'onde numerico posto a 300 m dalla spiaggia.

Finestra temporale	Modello numerico [m]	Formula empirica [m]	Misure dirette [m]	Formula empirica calibrata [m]
	R_s	R_s	R_s	R_s
11.30-12:00	0,52	0,75	0,73	0,67
12.00-12:30	0,75	0,77	0,76	0,73
12.30-13:00	0,57	0,73	0,72	0,69
13.00-13:30	0,62	0,80	0,71	0,77
13.30-14:00	0,71	0,84	0,75	0,78
14.00-14:30	0,73	0,82	0,75	0,79
14.30-15:00	0,61	0,77	0,76	0,76
15.00-15:30	0,58	0,83	0,77	0,77

Tabella 2. Confronto fra i run-up significativi R_s calcolati con il modello numerico di *Lo Re et al.* (2012), con la formula di *Nielsen e Hanslow*, mediante elaborazione delle misure e infine con la formula di *Nielsen e Hanslow* calibrata per Lido Signorino.

Tale dominio è stato discretizzato adottando $\Delta x = 1$ m e $\Delta t = T/300$ s, e simulando la propagazione di una diversa onda per ciascuna delle 8 finestre temporali nelle quali è stato suddiviso il tempo di misura. Il numero di Courant era compreso tra 0,099 e 0,1522. I valori di *run-up* così ottenuti sono riportati nella tab. 2. La tabella riporta pure, per ciascuna finestra temporale, i risultati ottenuti con la formula empirica di *Nielsen & Hanslow* (1991); e inoltre i *run-up* significativi forniti dalla distribuzione di Rayleigh delle misure *in situ*. Il confronto fra i valori di *run-up* significativi R_s mostra che, nella sostanza, entrambi i metodi forniscono risultati accettabili. Il modello numerico tende a sottostimare il *run-up*, mentre la formula empirica tende a sovrastimarli. Nel complesso la formula empirica fornisce i risultati più vicini a quelli sperimentali. Probabilmente, la minore efficacia del modello numerico risiede nel fatto che esso è più adatto a simulare la propagazione di onde lunghe, condizione che in concreto non si attua proprio in prossimità della linea di riva. In tali condizioni, inoltre, è meno realistico l'impiego di grandezze mediate lungo la profondità. Potrebbe inoltre esservi un difetto di modellazione del frangimento e dell'attrito al fondo; va ricordato che il modello è di tipo rotazionale e che l'attrito al fondo è modellato attraverso una semplice espressione quadratica della velocità. La questione sarà approfondita in studi successivi utilizzando in ingresso al modello onde *random* e gruppi di onde, attraverso l'utilizzo di spettri analitici (come ad esempio il ben noto spettro Jonswap).

Appurato che la formula di *Nielsen & Hanslow* appare preferibile, ma tende a sovrastimare il *run-up*, abbiamo provato a calibrarne i coefficienti α e β , proprio per la spiaggia di Lido Signorino, attribuendo loro le seguenti stime:

$$\tilde{\alpha} = \sum_{i=1}^8 \frac{L_{zwm,i}}{(H_{0rms,i} L_{0,i})^{0.5}} ; \tilde{\beta} = \sum_{i=1}^8 \frac{R_{100,i}}{(H_{0rms,i} L_{0,i})^{0.5}} \quad (12)$$

Tali valori sono serviti per calcolare i parametri della distribuzione di Rayleigh dalla quale, per fissata probabilità di superamento, è stato possibile stimare il *run-up* con la seguente relazione:

$$R(P_s) = L_{zwm} \sqrt{-\ln(P_s)} + R_{100} \quad (13)$$

I relativi valori di R_s sono riportati nella quarta colonna della tab. 2. Il confronto fra

Finestra temporale	Formula empirica calibrata [m]				Coefficienti	
	H_{rms}	L_0	R_{100}	L_{2vm}	α	β
11.30-12:00	0,79	39,62	0,318	0,291	0,052	0,057
12.00-12:30	0,74	56,34	0,328	0,306	0,047	0,051
12.30-13:00	0,74	37,48	0,361	0,253	0,048	0,068
13.00-13:30	0,73	54,43	0,375	0,237	0,038	0,059
13.30-14:00	0,72	56,00	0,381	0,257	0,040	0,060
14.00-14:30	0,78	55,71	0,382	0,257	0,039	0,058
14.30-15:00	0,69	50,56	0,387	0,262	0,044	0,065
15.00-15:30	0,74	42,33	0,421	0,246	0,044	0,075

Tabella 3. *Run-up* significativi del 29 marzo 2012 e coefficienti α e β delle eqq. 4 e 5 calibrati per la spiaggia in studio.

tali valori e quelli sperimentali (colonna 3) mostra che la calibrazione ha prodotto un sensibile miglioramento della stima del *run-up*, con valori che, oltre ad essere più vicini a quelli sperimentali, alcune volte sono leggermente superiori e altre leggermente inferiori.

La tab. 3 riassume, per ciascuna finestra temporale di mezz'ora, i parametri della distribuzione di Rayleigh di Lido Signorino. Dai dati nella tabella si evince che risultano:

$$\tilde{\alpha} = 0,044 \text{ e } \tilde{\beta} = 0,062 \quad (14)$$

La tab. 4 mette a confronto per ciascuna finestra temporale i valori di *run-up* al 1%, al 2%, al 50% e quello significativo per le misure dirette e per la formula empirica calibrata. Le differenze relative, riportate nella quarta colonna, sono generalmente contenute entro il 10%, confermando che la formula empirica di *Nielsen e Hanslow* con i coefficienti calibrati in base alle misure *in situ* è adatta a stimare il *run-up* sulla spiaggia di Lido Signorino.

4 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

Si è esaminata la stima del *run-up* in spiagge sabbiose utilizzando come caso di studio una spiaggia nella Sicilia occidentale, sulla quale è stata condotta una campagna di misure. Sulla base di registrazioni ondamiche in una boa vicina, contestuali alle

Finestra temporale	Misure dirette [m]				Formula empirica calibrata [m]				Differenza relativa [%]			
	$R_{1\%}$	$R_{2\%}$	$R_{50\%}$	R_s	$R_{1\%}$	$R_{2\%}$	$R_{50\%}$	R_s	$R_{1\%}$	$R_{2\%}$	$R_{50\%}$	R_s
11.30-12:00	0,94	0,89	0,56	0,73	0,87	0,83	0,55	0,67	-7,4	-7,0	-1,9	-8,7
12.00-12:30	0,99	0,93	0,58	0,76	1,01	0,96	0,64	0,73	2,5	3,0	9,1	-4,0
12.30-13:00	0,90	0,86	0,57	0,72	0,83	0,79	0,52	0,69	-8,8	-8,8	-9,1	-4,0
13.00-13:30	0,88	0,84	0,57	0,71	0,99	0,94	0,62	0,77	11,8	11,5	8,7	8,3
13.30-14:00	0,93	0,89	0,60	0,75	1,00	0,95	0,63	0,78	6,7	6,6	5,3	4,5
14.00-14:30	0,93	0,89	0,60	0,75	1,03	0,98	0,65	0,79	10,2	10,1	8,8	6,3
14.30-15:00	0,95	0,91	0,61	0,76	0,93	0,88	0,58	0,76	-2,4	-2,5	-3,6	-0,2
15.00-15:30	0,95	0,91	0,63	0,77	0,87	0,83	0,55	0,77	-7,8	-8,2	-12,0	0,1

Tabella 4. Confronto tra valori di *run-up* a diverse percentuali calcolati sia in base alle misure dirette sia con la formula di *Nielsen e Hanslow* calibrata.

misure di *run-up* sulla spiaggia e opportunamente trasposte di fronte al paraggio, è stato simulato il moto ondoso sotto costa utilizzando il modello di propagazione SWAN. Le onde sono state quindi utilizzate per simulare il *run-up* sia mediante un modello numerico alla *Boussinesq* sia mediante una nota formula empirica.

Il confronto tra i valori di *run-up significativo* simulati con i due metodi e quelli misurati, ha mostrato che entrambi i metodi forniscono risultati accettabili che il modello numerico tende a sottostimare il *run-up* mentre la formula empirica a sovrastimarli, tuttavia fornendo nel complesso le stime migliori. La calibrazione dei parametri della formula empirica utilizzando le misure ha quindi permesso di migliorare le stime da essa fornite, infine risultate diverse, in generale, di meno del 10%.

Dallo studio è emerso quindi che i modelli numerici alla *Boussinesq*, anche se sofisticati, non sempre riescono a valutare correttamente il *run-up* su spiagge naturali a debole pendenza, riconoscendone la causa principale nel fatto che proprio in vista del *run-up* le onde si accorciano repentinamente mentre i fondali tendono a zero.

La formula empirica, invece, riesce a stimare in modo soddisfacente il *run-up*, soprattutto dopo una calibrazione basata sulle misure *in situ*.

Futuri sviluppi dovranno riguardare la stima del *run-up* utilizzando, in acque sotto costa, non più onde simulate a partire da registrazioni ondamiche *a largo*, ma onde misurate in acque intermedie proprio in prossimità della spiaggia, eliminando così le inevitabili approssimazioni introdotte attraverso la trasposizione delle onde dalla boa al paraggio in studio e durante la propagazione delle stesse da largo alla zona sottocosta. Come pure la stima del *run-up* andrà studiata considerando diverse condizioni di mare.

BIBLIOGRAFIA

- Archetti, R. e Romagnoli, C. Analysis of the effects of different storm events on shoreline dynamics of an artificially embayed beach. *Earth Surface Processes And Landforms*, 2011, 36, 1449-1463.
- Booij, N., Ris, R.C. & Holthuijsen, L.H. A third generation wave model for coastal regions, part I: model description and validation. *Journal of Geophysical Research*.1999, 104, 7649-7666.
- Coastal Engineering Research Center. Shore Protection Manual. Volumes 1 and 2. DC: US Army Corps of Engineers, Waterways Experiment Station, Coastal Engineering Research Center, Washington, 2008.
- Contini, P., e De Girolamo P. Impatto morfologico di opere a mare: casi di studio, atti dell' VIII Convegno A.I.O.M., Lerici, 28-29 maggio, 1998.
- Holthuijsen, L.H., Booij, N. & Ris, R.C. A spectral wave model for coastal zone. Proceedings of the 2nd International Symposium on Ocean Wave Measurement and Analysis. New Orleans, 1993.
- Holman, R.A & Sallenger, A.H., Jr. Setup and swash on a natural beach, *Journal Geophysics Research*, 1985, 90(C1), 945-953.
- Hughes, S.A. Estimation of wave run-up on smooth, impermeable slopes using the wave momentum flux parameter, *Coastal Engineering*, 2004, 51(11-12), 1085-1104.
- Lo Re, C., Musumeci, R.E. & Foti, E. A shoreline boundary condition for a highly nonlinear Boussinesq model for breaking waves, *Coastal Engineering*. 2012, 60, 41-52.
- Manno, G. Localizzazione della linea di riva, in spiagge sabbiose stabili, considerando le fluttuazioni da onde e maree, tesi di Dottorato, Università degli Studi di Palermo (Italia), 2012.
- Manno, G., Lo Re, C., Ciruolo, G. Shoreline detection in gentle slope Mediterranean beach, atti del 5th SCACR international Short Conference on Applied Coastal Research, Aachen,

- Germania, 6-9 giugno, 2011.
- Manno, G., Lo Re, C., Ciraolo, G., Maltese, A. Influenza del clima ondoso e delle maree sulla posizione della linea di riva: Lido Signorino (Marsala), Atti del XXXII Convegno Nazionale di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Palermo, Italia, 14-17 settembre, 2010.
- Nielsen, P. & Hanslow, D.J. Wave run-up distributions on natural beaches, *Journal of Coastal Research*, 1991, 7, 1139-1152.
- Prasad, R.S. & Svendsen, A. The boundary condition at the moving shoreline for nearshore models. Center for applied coastal research, Ocean Engineering Laboratory University of Delaware, Newark, 19716, 2001.
- Raubenheimer, B., & Guza, R.T. Observations and predictions of run-up, *Journal Geophysics Research*, 1996, 101(C10), 25575-25587.
- Ris, R.C., Booij, N. & Holthuijsen, L.H. A third generation wave model for coastal regions, part II: verification, *Journal of Geophysical Research*. 1999, 104(4), 7649-7666.
- Saville, T. Freeboard allowances for waves in inland reservoirs, *Journal of the Waterways and Harbors Division*, 1962, 18, 92-124.
- Seymour, R..J. Estimating wave generation on restricted fetches, *Journal of the Waterway Port Coastal and Ocean Division*, 1977, 103(2), 251-264.
- Vincent, C.L. Shore Protection Manual, fourth edition, Washington, 1984.