

## MODELLAZIONE NUMERICA 2DV RANS-VOF DEL PROCESSO DI TRACIMAZIONE SU ARGINI A MARE

A. N. Raosa<sup>1</sup> & B. Zanuttigh<sup>2</sup>

- (1) Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali, Università di Bologna, Italia, e-mail: andreanatalia.raosa2@unibo.it  
(2) Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale e dei Materiali, Università di Bologna, Italia, e-mail: barbara.zanuttigh@unibo.it

### SOMMARIO

*Scopo di questo contributo è la rappresentazione della tracimazione su argini a mare per mezzo del codice Rans-Vof (IH-2VOF) sviluppato dall'Università di Cantabria. In particolare l'obiettivo è valutare la accuratezza della capacità previsionale di tale modello. Al fine di determinare le migliori condizioni per una corretta rappresentazione si è sviluppata una dettagliata validazione del modello basata su alcune prove sperimentali. Dalle simulazioni effettuate emerge che il modello tende a sovrastimare la riflessione ondosa contro la struttura e quindi a sottostimare la risalita e di conseguenza la tracimazione. Si è messa a punto una metodologia che permetta di utilizzare il modello in modo predittivo con buona precisione dei risultati.*

### 1 INTRODUZIONE

La vulnerabilità e la resistenza degli argini a mare giocano un ruolo chiave nella sicurezza delle aree costiere. Idealmente queste strutture di difesa dovrebbero essere progettate (altezza e larghezza della cresta) in modo tale da prevenire ed evitare inondazioni per qualunque scenario climatico. Di fatto, però, l'incertezza sulle condizioni climatiche future e gli elevati costi richiedono di accettare un certo livello di tracimazione, e conseguentemente un certo rischio di inondazione.

La tracimazione su un argine a mare produce correnti ad alta velocità e turbolenza (Schuttrumpf e Oumeraci, 2005) che possono indurre danni agli strati di protezione ed esporre all'erosione gli strati inferiori (in caso di argini in terra). Se la tracimazione persiste per un tempo sufficiente, si può verificare un abbassamento della cresta e/o la formazione di una breccia nella struttura (Hughes and Nadal, 2009). Catastrofiche conseguenze di tale processo sono state rilevate durante l'uragano Katrina a New Orleans (ASCE Hurricane Katrina External Review Panel, 2007).

Si rende quindi necessaria una stima accurata della statistica delle onde tracimate, in termini di altezze, periodo e soprattutto velocità, per determinate condizioni climatiche, e relativa combinazione con criteri teorici consolidati al fine d'identificare una soglia tollerabile di tracimazione.

L'interazione onda-struttura è stata studiata sia attraverso prove di laboratorio (a.o. Schuttrumpf and Oumeraci, 2005; Van Gent, 2002) sia a scala di prototipo,

principalmente tramite il “*Wave Overtopping Simulator*” (Van der Meer et al., 2006). In ogni caso le teorie adottate finora per predire i volumi di tracimazione e le velocità lungo le strutture lato riva sono ancora oggetto di un’analisi accurata e di verifica, data anche l’importanza della velocità nel determinare le condizioni di erosione e collasso (Van der Meer et al., 2010).

Obiettivo di questa attività è verificare la possibilità di predire il fenomeno di tracimazione tramite simulazioni numeriche eseguite con il codice *Rans-Vof* (IH-2VOF) sviluppato dall’Università di Cantabria (Losada et al., 2008) e determinare l’accuratezza e la precisione di tali risultati. A tale scopo, si applica il modello ad alcune prove su argini a mare effettuate dal centro di ricerca e sviluppo U.S. Army Engineer (ERDC), Vicksburg, MS (Hughes & Nadal, 2009).

La struttura del contributo si compone di una breve descrizione del modello numerico (Sezione 2), delle prove sperimentali utilizzate per la validazione del modello (Sezione 3), della validazione del modello numerico (Sezione 4) ed infine della verifica della capacità predittiva del modello (Sezione 5).

## 2 BREVE DESCRIZIONE DEL MODELLO NUMERICO IH-2VOF

Il modello IH-2VOF (Lara et al., 2011) è una versione aggiornata del precedente COBRAS-UC (Losada et al., 2008).

Il codice risolve le equazioni RANS (Reynolds Average Navier-Stokes) in modo bidimensionale e assume come modello di turbolenza il modello algebrico non lineare  $k - \varepsilon$  (Shih et al., 1996; Lin and Liu, 1998), in cui  $k$  rappresenta l’energia cinetica turbolenta e  $\varepsilon$  è il suo tasso di dissipazione. Il flusso all’interno di mezzi porosi è ottenuto attraverso la risoluzione delle equazioni Volume-Averaged Reynolds Averaged Navier-Stokes (VARANS), che sono derivate dall’integrazione delle equazioni RANS su un determinato volume di controllo. Per la completa formulazione matematica si veda Hsu et al. (2002).

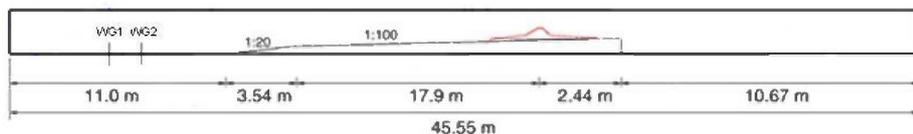
Il movimento della superficie libera viene monitorato tramite il metodo del volume di fluido (Hirt e Nichols, 1981; Lin, 1998), che consiste nell’identificare la posizione della superficie libera monitorando le variazioni di densità in ogni cella del dominio.

## 3 PROVE SPERIMENTALI PER LA VALIDAZIONE DEL MODELLO NUMERICO

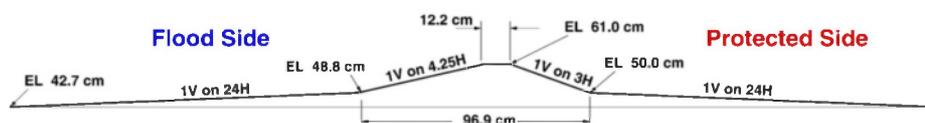
Al fine di validare il modello numerico sono stati effettuati dei confronti con risultati di prove di laboratorio condotte da Hughes & Nadal (2009) in un canale lungo circa 46 metri e largo 1 metro (Fig. 1). Il canale è caratterizzato da un primo tratto a pendenza nulla lato mare seguito da due rampe: la prima con pendenza 1:20, la seconda con pendenza 1:100. Alla fine di tale rampa si trova posizionata la struttura (in Fig. 1 in colore rosso). La sezione trasversale della struttura è presentata in Fig. 2.

Sono state effettuate misure di livello e di velocità attraverso varie sonde dislocate lungo il canale. In particolare sono state posizionate 2 sonde di livello tra il generatore e la prima rampa (Fig. 1) e 7 sonde di pressione sulla cresta della struttura e sul paramento lato riva (Fig. 3).

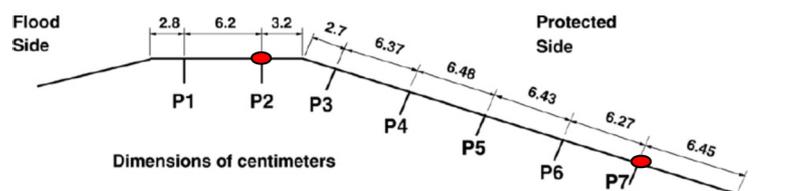
E’ stata svolta un’analisi numerica su quattro differenti prove sperimentali le cui caratteristiche (altezza d’onda significativa  $H_s$ , periodo di picco  $T_p$ , altezza d’acqua  $h$  e sommergezza  $R_c$ ) sono riportate in Tab. 1.



**Figura 1.** Sezione trasversale dell'intero canale. WG1 e WG2 sono le due sonde di livello posizionate nel tratto a pendenza nulla del canale.



**Figura 2.** Sezione trasversale della struttura (da Hughes & Nadal, 2009).



**Figura 3.** Sonde di pressione posizionate sulla cresta della struttura (P1 e P2) e sul paramento lato riva (P3, P4, P5, P6, P7). Alle sonde P2 e P6 sono state effettuate misure di velocità (da Hughes & Nadal, 2009).

	Hs (m)	Tp (s)	h (m)	Rc (m)
R109	0.0992	2.732	0.2496	-0.0116
R14	0.0704	2.0880	0.5817	-0.0109
R18	0.1004	2.7700	0.6139	-0.0431
R20	0.0652	2.0080	0.6338	-0.0630

**Tabella 1.** Caratteristiche delle prove considerate. Hs: altezza d'onda significativa; Tp: periodo di picco; h: altezza d'acqua; Rc: sommergezza della struttura.

L'attività si è composta di due fasi: una prima fase di verifica della precisione del modello e una seconda fase di verifica delle capacità predittive. Nelle seguenti sezioni si affronteranno separatamente le due fasi.

#### 4 FASE 1: PRECISIONE DEL MODELLO NUMERICO

In queste prove preliminari il modello numerico IH-2VOF è stato utilizzato con lo scopo di verificare la sua precisione nella riproduzione dei risultati di laboratorio. A tal fine è stato ricostruito un canale numerico dimensionalmente identico a quello di laboratorio e il sistema è stato forzato in ingresso con i livelli misurati in corrispondenza della prima sonda di livello lato mare (WG1). In particolare si è scelto di riprodurre il

test R109 (Tab. 1), imponendo al contorno lato riva la condizione di assorbimento.

#### 4.1 Rappresentazione dei livelli idrici

In Fig. 4 sono riportati due grafici: il primo rappresenta l'andamento della superficie libera alla sonda WG2, poco a valle della generazione, e il secondo alla sonda P2, situata sul ciglio lato riva della cresta. La linea rossa, che mostra i risultati numerici, risulta molto prossima a quella blu, che mostra quelli sperimentali.

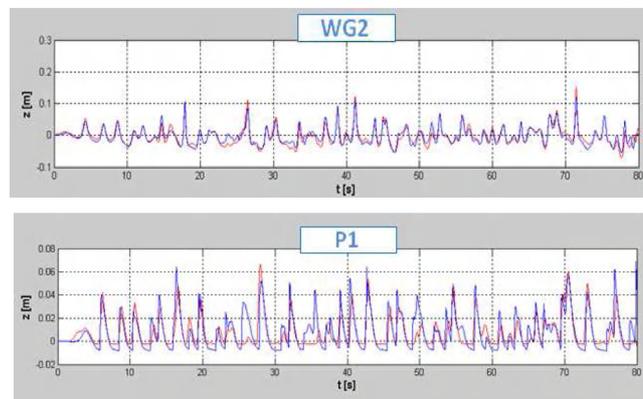


Figura 4. Andamento (numerico e sperimentale) della superficie libera alle sonde WG2 e P2.

#### 4.2 Statistica di tracimazione

In Fig. 5 si può osservare un confronto tra i volumi tracimati misurati in laboratorio (puntini blu) e quelli calcolati numericamente (puntini rossi). Entrambi i dati, sperimentali e numerici, sono bene approssimati da una distribuzione statistica di Weibull.

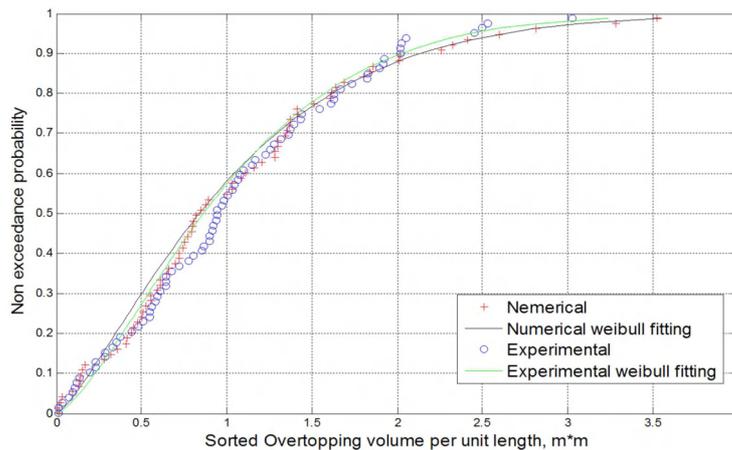


Figura 5. Confronto tra i volumi tracimati misurati in laboratorio e calcolati numericamente alla sonda P2.

I risultati quantitativi maggiormente significativi (altezza media del 2% delle onde più alte  $h_{2\%}$ , corrispondente periodo medio d'onda  $T_{2\%}$  e corrispondente celerità d'onda  $u_{2\%}$ ) sono riportati in Tab. 2. Lo scostamento dei risultati numerici dai dati sperimentali è molto modesto.

In questa fase preliminare dunque si registra una buona precisione del modello IH-2VOF nella rappresentazione del processo di tracimazione.

Test	$h_{2\%}$		$u_{2\%}$		$T_{2\%}$	
	exp	num	exp	num	exp	num
R109	0.0702	0.0733	1.2380	1.1845	0.7806	0.6788

**Tabella 2.** Confronto tra  $h_{2\%}$ ,  $u_{2\%}$  e  $T_{2\%}$  sperimentali (exp) e numerici (num) in corrispondenza della sonda P2.

## 5 FASE 2: CAPACITÀ PREDITTIVA DEL MODELLO NUMERICO

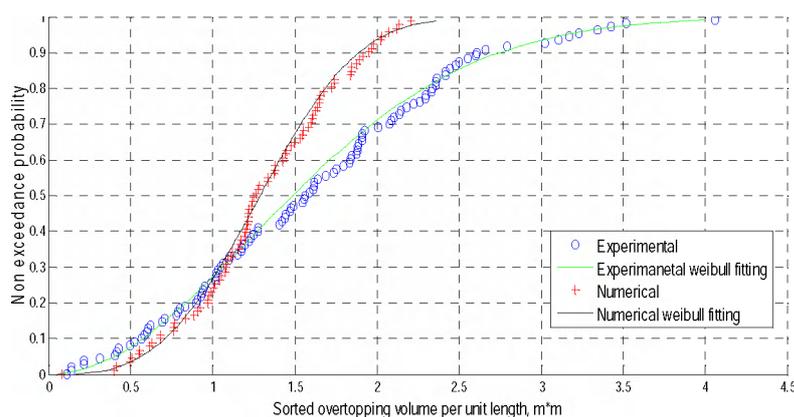
Al fine di verificare la capacità del modello di predire il fenomeno di tracimazione sono state condotte simulazioni fissando le seguenti condizioni:

- condizioni al contorno lato mare corrispondenti al *target* impostato al battione di laboratorio ( $H_s$ ,  $T_p$ ,  $h$ , spettro Jonswap);
- condizioni al contorno lato riva: assorbimento.

Le simulazioni sono state condotte in presenza del modello di turbolenza  $k - \varepsilon$ .

A titolo rappresentativo si riporta in Fig. 6 il confronto tra i volumi tracimati misurati in laboratorio (colore blu) e quelli calcolati numericamente (colore rosso) per la prova R14 in corrispondenza della sonda P2. Appare chiaramente che il modello sottostima i volumi tracimati soprattutto in corrispondenza dei volumi maggiori.

In Tab. 3 sono riportati  $u_{2\%}$ ,  $h_{2\%}$  e  $T_{2\%}$  per i tests R14, R18 ed R20. Per tutte le prove si individua una netta sovrastima dei valori numerici.



**Figura 6.** Confronto tra i volumi tracimati misurati in laboratorio e calcolati numericamente alla sonda P2.

Test	h2%		u2%		T2%	
	exp	num	exp	num	exp	num
R14	0.0458	0.0815	1.2208	1.3866	1.9109	0.9474
R18	0.0602	0.1106	1.1069	1.5416	2.3306	1.1538
R20	0.0558	0.0657	1.0673	1.3984	1.4109	1.2104

**Tabella 3.** Confronto tra h2%, u2% e T2% ottenuti sperimentalmente e numericamente

Sono state condotte varie prove cambiando la discretizzazione del dominio. La soluzione migliore sembra essere quella di assumere una risoluzione della maglia numerica dell'1% di  $H_s$  in orizzontale e dello 0.5% di  $H_s$  in verticale. Nonostante questo accorgimento, si registrano modeste variazioni dei risultati.

La sottostima dei volumi tracimati può essere giustificata dal fatto che l'onda incidente al piede dell'opera nelle simulazioni numeriche risulta minore di quella misurata in laboratorio. Al fine di migliorare la qualità della rappresentazione numerica, sono state fatte tre differenti ipotesi:

- elevata dissipazione indotta dal modello di turbolenza;
- possibile decadenza dell'onda lungo il canale numerico;
- elevata riflessione indotta dalla struttura (rappresentata in queste prime simulazioni come oggetto perfettamente impermeabile, in accordo con il modello fisico).

Nei seguenti sottoparagrafi verranno descritte le condizioni prese in considerazione per le diverse prove effettuate (riassunte in Tab. 5).

### 5.1 Influenza del modello di turbolenza

Dapprima le simulazioni sono state condotte senza includere il modello di turbolenza. I risultati di tali prove sono riportati in Tab. 6 (caso "A").

Senza turbolenza, la sottostima dei volumi tracimati e conseguente sovrastima dei parametri caratteristici h2%, T2% e u2% si riducono anche se ancora non in modo soddisfacente. In particolare, si ha una netta sovrastima delle velocità.

Assunto quindi che il codice risponde meglio se utilizzato privo del modello di turbolenza, resta da capire se la dissipazione sia legata ad una decadenza dell'altezza d'onda lungo il canale.

### 5.2 Influenza della lunghezza del canale

Al fine di verificare la presenza di uno smorzamento dell'altezza d'onda lungo il canale, è stato utilizzato un canale numerico più corto rispetto a quello di laboratorio considerando una lunghezza pari circa a tre volte la lunghezza d'onda. I risultati di tali prove sono riportati in Tab. 6 (caso "B").

La rappresentazione dei volumi tracimati non migliora significativamente e la sovrastima delle velocità è ancora elevata.

Al fine di controllare se il problema fosse legato effettivamente ad una dissipazione numerica interna e quindi alla lunghezza del canale, è stata condotta una simulazione senza struttura mantenendo inalterato ogni altro parametro (compresa la lunghezza del canale) rispetto al caso "A". Si ha per questa prova una perfetta aderenza tra risultati numerici e sperimentali. Ciò dimostra che i problemi di dissipazione debbano ascrivere piuttosto ad una sovrastima della riflessione contro la struttura.

### 5.3 Influenza dell'impermeabilità della struttura

Al fine di ridurre la riflessione ondosa, si è modificata la rappresentazione della struttura nel modello. Mentre prima essa era perfettamente impermeabile, ora la si considera in parte costituita da un mezzo poroso che smorza il flusso e riduce la riflessione ondosa. Si sono sottoposte a prova diverse configurazioni del mezzo poroso illustrate nel seguito.

Inizialmente tutta la porzione di struttura sottostante il paramento lato mare è stata sostituita da tre strati di mezzo poroso, ognuno caratterizzato da diversi valori di porosità. Questo approccio permette di creare un gradiente di porosità, decrescente dal fondale alla superficie libera, al fine di ridurre la riflessione ondosa nella parte bassa e la percolazione nella parte alta della struttura (risultati in Tab. 6 caso "C"). In Tab. 4 si riportano le caratteristiche di ogni strato poroso.

	Porosità (n)	Diametro nominale (d50, m)
Strato 1	0.3	0.04
Strato 2	0.2	0.02
Strato 3	0.1	0.01

**Table 4.** Caratteristiche degli strati porosi per le prove del caso "C".

L'utilizzo del mezzo poroso come paramento lato mare della struttura riduce la riflessione ondosa ma accelera il flusso sulla cresta, a causa della discontinuità tra parte permeabile ed impermeabile. Inoltre, i risultati per onde basse (R14) migliorano mentre in caso di onde più alte (R18-R20) non subiscono significativi miglioramenti.

Al fine di evitare una discontinuità che alteri il flusso d'acqua, la migliore soluzione sembra essere quella di includere un sottile strato di mezzo poroso (a bassa porosità) intorno a tutta la struttura (paramento lato mare, cresta e paramento lato riva). Lo strato poroso è caratterizzato da uno spessore di 0.05 m (circa 1/10 Hs), una porosità  $n=0.1$  e un diametro nominale del materiale  $d50=0.01$  m. A parità di tutti gli altri parametri, i risultati (in Tab. 6 caso "D") mostrano un significativo miglioramento delle prestazioni del modello nel riprodurre la statistica dei volumi di tracimazione al ciglio lato riva.

Prove	Caso	Caratteristiche
R14	A	Canale lungo
R18		No modello di turbolenza
R20		Struttura totalmente impermeabile
R14	B	Canale corto
R18		No modello di turbolenza
R20		Struttura totalmente impermeabile
R14	C	Canale lungo
R18		No modello di turbolenza
R20		Struttura con mezzo poroso lato mare
R14	D	Canale lungo
R18		No modello di turbolenza
R20		Struttura completamente ricoperta dal mezzo poroso

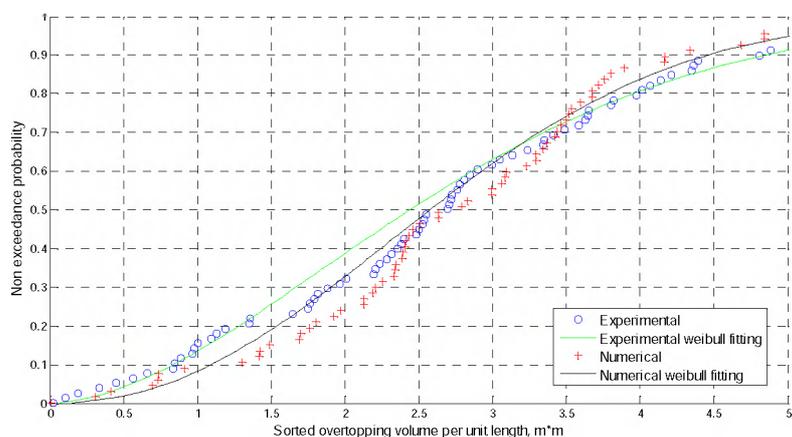
**Tabella 5.** Caratteristiche delle simulazioni per l'analisi di sensitività del modello.

Caso	Prova	h2%		u2%		T2%	
		exp	num	exp	num	exp	num
A	R14	0.0458	0.0538	1.2208	2.0192	1.9109	1.1667
	R18	0.0602	0.1286	1.1069	1.6391	2.3306	1.2070
	R20	0.0558	0.0986	1.0673	1.4296	1.4109	1.3795
B	R14	0.0458	0.0816	1.2208	1.4847	1.9109	1.1314
	R18	0.0602	0.1286	1.1069	1.6268	2.3306	1.1629
	R20	0.0558	0.0986	1.0673	1.4703	1.4109	0.9957
C	R14	0.0458	0.0653	1.2208	1.1964	1.9109	1.2695
	R18	0.0602	0.1160	1.1069	1.4727	2.3306	1.5945
	R20	0.0558	0.0882	1.0673	1.3429	1.4109	1.0862
D	R14	0.0458	0.0473	1.2208	1.2409	1.9109	1.8995
	R18	0.0602	0.0613	1.1069	1.1109	2.3306	2.3295
	R20	0.0558	0.0574	1.0673	1.0699	1.4109	1.3966

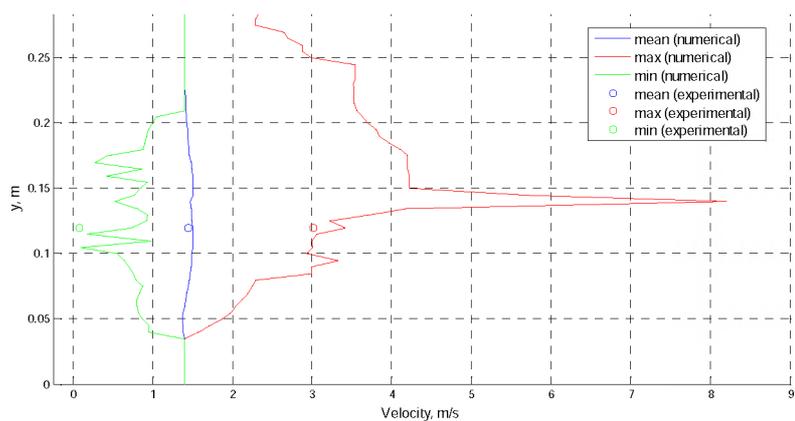
**Tabella 6.** Confronto tra h2%, u2% e T2% ottenuti sperimentalmente e numericamente.

In Fig. 7 si può osservare l'ottima rappresentazione dei volumi tracimati (il colore rosso indica i volumi calcolati numericamente ed il blu quelli misurati in laboratorio) per una delle prove selezionate.

In Fig. 8 si confrontano le velocità puntuali misurate in P2 con i profili di velocità (massimo, medio e minimo) lungo la verticale simulato. Il modello non solo coglie bene i valori nei punti di misura ma consente di valutare la variabilità della velocità lungo tutta la colonna d'acqua- cosa che non è tipicamente fatta in laboratorio o a scala di prototipo - e dunque può evidenziare la non cautelatività delle misure (particolarmente significativa per la messa a punto di criteri di collasso della struttura stessa).



**Figura 7.** Confronto tra i volumi tracimati misurati in laboratorio e calcolati numericamente alla sonda P2 per la prova R14d.



**Figura 8.** Confronto tra i valori di velocità massimi, minimi e medi misurati in laboratorio e calcolati numericamente alla sonda P2 per la prova R14d.

## 6 CONCLUSIONI

Sono state condotte simulazioni numeriche con il modello IH-2VOF sviluppato dall'Università di Cantabria e i risultati sono stati confrontati con le prove fornite dal centro di ricerca e sviluppo U.S. Army Engineer (ERDC), Vicksburg (MS) per argini a mare sommersi.

Il modello riproduce con elevata accuratezza il processo fisico di tracimazione ondosa quando viene forzato direttamente con i valori di livello misurati in laboratorio.

Quando il modello è usato in modo predittivo, esso tende a sottostimare i volumi tracimati, specialmente per le onde più basse. Questo fatto può essere solo parzialmente giustificato dal grado di dettaglio nella discretizzazione del dominio e dal modello di turbolenza utilizzato. I risultati migliori si ottengono con le seguenti condizioni:

- risoluzione della maglia numerica: 1% Hs in orizzontale e 0.5% Hs in verticale;
- assenza del modello di turbolenza.

Dall'analisi svolta si deduce che i bassi volumi di tracimazione calcolati dal modello sono dovuti ad una sovrastima dell'onda riflessa dalla struttura e quindi ad una sottostima della risalita ondosa.

Si è risolto questo problema considerando che la struttura non sia costituita unicamente da un mezzo impermeabile, ma dalla combinazione di una parte permeabile e di una impermeabile. Si è incluso un sottile strato di mezzo poroso intorno alla struttura caratterizzato da spessore circa 1/10 Hs; porosità  $n=0.1$ .

Si è scelta una porosità particolarmente bassa al fine di evitare un'eccessiva percolazione attraverso la struttura. Con questo approccio si ha un significativo miglioramento delle prestazioni del modello nel predire la statistica dei volumi di tracimazione e le caratteristiche del flusso.

Il modello IH-2VOF può quindi essere usato anche in modo predittivo con una buona precisione dei risultati tenendo però presente che esso tende a sovrastimare la riflessione e quindi devono essere presi particolari accorgimenti.

**Ringraziamenti.** Gli autori ringraziano Javier L. Lara (*Universidad de Cantabria, Environmental Hydraulics Institute*) e Steve Hughes (*U.S. Army Engineer Research and Development Center*). Si ringrazia il supporto della Comunità Europea mediante il progetto THESEUS „*Innovative technologies for safer European coasts in a changing climate*“, FP7.ENV2009-1, contratto 244104, che finanzia interamente il dottorato del primo autore.

## BIBLIOGRAFIA

- ASCE Hurricane Katrina External Review Panel, (2007). *The New Orleans Hurricane Protection System: What went wrong and why*. American Society of Civil Engineers, Reston, Virginia. 92.
- EurOtop Manual. 2007. *Wave Overtopping of Sea Defences and Related Structures – Assessment Manual*. A cura di: N.W.H. Allsop, T. Pullen, T. Bruce, J.W. van der Meer, H. Schüttrumpf, A. Kortenhaus. [www.overtopping-manual.com](http://www.overtopping-manual.com).
- Hughes, S.A., N.C. Nadal. (2009). *Laboratory study of combined wave overtopping and storm surge overflow of a levee*. Coastal Engineering 56, 244-259.
- Losada, I.J., Lara, J.L., Guanache, R., Gonzalez-Ondina, J.M. (2008). *Numerical analysis of wave overtopping of rubble mound breakwaters*. Coastal Engineering, 55 (1), 47-62.
- Schüttrumpf H. and H. Oumeraci (2005). *Layer thicknesses and velocities of wave overtopping flow at sea dikes*. Journal of Coastal Engineering, 52 (6), 473-495.
- Van der Meer, J.W., Bernardini, P., Snijders, W., Regeling, E., 2006. *The wave overtopping simulator*. Proceedings of the 30th International Conference on Coastal Engineering, World Scientific (5), 4654-4666.
- Van Gent, M.R., 2002. *Wave overtopping events at dikes*. Proceedings of the 28th International Coastal Engineering Conference, World Scientific (2), 2203-2215.