

## FORZE IMPULSIVE E SORMONTI SU MURI RICURVI SOGGETTI AD ONDE NON FRANGENTI

Myrta Castellino <sup>1\*</sup>, Paolo Sammarco <sup>2</sup>, Alessandro Romano <sup>1</sup>, Luca Martinelli <sup>3</sup>, Piero Ruol <sup>3</sup>, Matteo Volpato <sup>3</sup>, Chiara Favaretto <sup>3</sup>, Leopoldo Franco <sup>4</sup>, & Paolo De Girolamo <sup>1</sup>

(1) Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura, Università di Roma "Sapienza" (Roma)  
(2) Dipartimento di Ingegneria Civile e Ingegneria Informatica, Università di Roma "Tor Vergata" (Roma)  
(3) Ingegneria Civile Edile ed Ambientale, Università degli studi di Padova (Padova)  
(4) Dipartimento di Ingegneria, Università di Roma Tre (Roma)

\*email: myrta.castellino@uniroma1.it

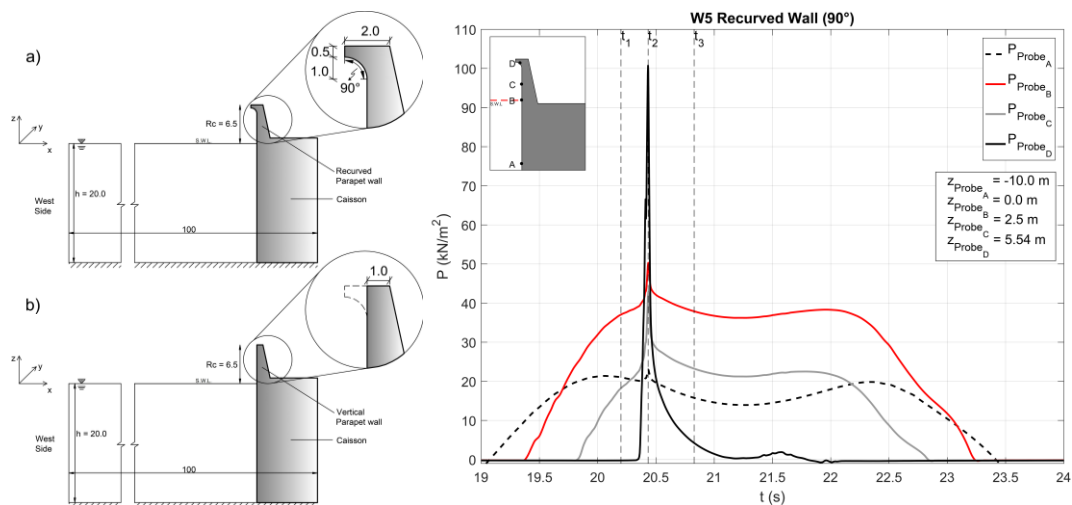
### ASPETTI CHIAVE

- Opere a parete verticale di tipo ricurvo per la riduzione delle portate di tracimazione.
- Azioni impulsive generate da onde non frangenti su pareti ricurve.
- Nuovo fenomeno fisico identificato e denominato "crest-confined impact".

### 1 INTRODUZIONE

Le opere a parete verticale di tipo composto vengono frequentemente utilizzate in condizioni di acque profonde per proteggere le infrastrutture portuali dal moto ondoso incidente. Al fine di ridurre la portata di tracimazione di queste opere senza modificare la loro quota di coronamento, una soluzione molto vantaggiosa è rappresentata da un muro paraonde, posto a filo con la parete lato mare dell'opera, la cui parte superiore ha una forma ricurva finalizzata ad indirizzare verso il mare aperto la cresta dell'onda che lo raggiunge. Una situazione di questo tipo è rappresentata nella Figura 1 a) dove la forma ricurva del muro paraonde è stata realizzata mediante un settore di circonferenza a 90°.

Il principale riferimento per il calcolo delle azioni che agiscono su opere di questo tipo è costituito dalle formule di Goda (Goda, 2010) che includono sia condizioni di onde non-frangenti che condizioni di onda frangente sulla parete (Takahashi, 1996). Nel caso di onde frangenti le azioni che agiscono sulla parete verticale diventano di tipo impulsivo incrementando notevolmente le stesse azioni rispetto al caso di onde non-frangenti. Oumeraci *et al.* (2001) nell'ambito del progetto europeo PROVERBS, hanno fornito delle linee guida per il dimensionamento di opere a parete verticale soggette alle azioni impulsive indotte dal frangimento delle onde. Le linee guida includono la stima dell'entità e della durata delle azioni impulsive.



**Figure 1.** Pannello di sinistra: schema delle due geometrie simulate numericamente. Pannello a) muro ricurvo. Pannello b) muro verticale. Le quote nella figura sono in metri. Pannello di destra: serie temporali delle pressioni impulsive registrate da quattro sonde poste lungo il muro ricurvo poste sia al di sopra sia al di sotto del livello medio marino.

Oumeraci et al. (2001) non hanno esaminato il caso di muri paraonde di tipo ricurvo. Fino ad oggi muri paraonde di tipo ricurvo sono stati presi in esame dalla letteratura limitatamente al caso delle difese radenti le quali sono soggette ad azioni di tipo impulsivo generate dal frangimento del moto ondoso indotto dal fondale.

Solo recentemente, Castellino et al. (2018), è stato preso in esame il caso di opere a parete verticale dotate di muri paraonde con forma ricurva soggette ad onde incidenti non frangenti. Nel lavoro, di tipo numerico, si mostra che quando la cresta dell'onda che si realizza sulla parete raggiunge la parte ricurva del muro, si generano localmente pressioni, e quindi forze, di tipo impulsivo che risultano nettamente maggiori rispetto a quelle che si verificano in assenza del tratto ricurvo del muro (vedi Figura 1 b). Le forze impulsive generate sono dovute all'effetto di confinamento operato dalla cresta dell'onda sul flusso che viene deviato verso il mare aperto dalla parte ricurva del muro. Questo meccanismo, messo in evidenza per la prima volta da Castellino et al. (2018), è stato denominato "crest-confined impact". Le pressioni impulsive generate in corrispondenza della parte ricurva del muro si propagano con la velocità del suono lungo la parete verticale del muro, incrementando il diagramma delle pressioni su gran parte della parete.

Recentemente Martinelli et al. (2018) hanno verificato sperimentalmente l'esistenza del fenomeno sopra descritto.

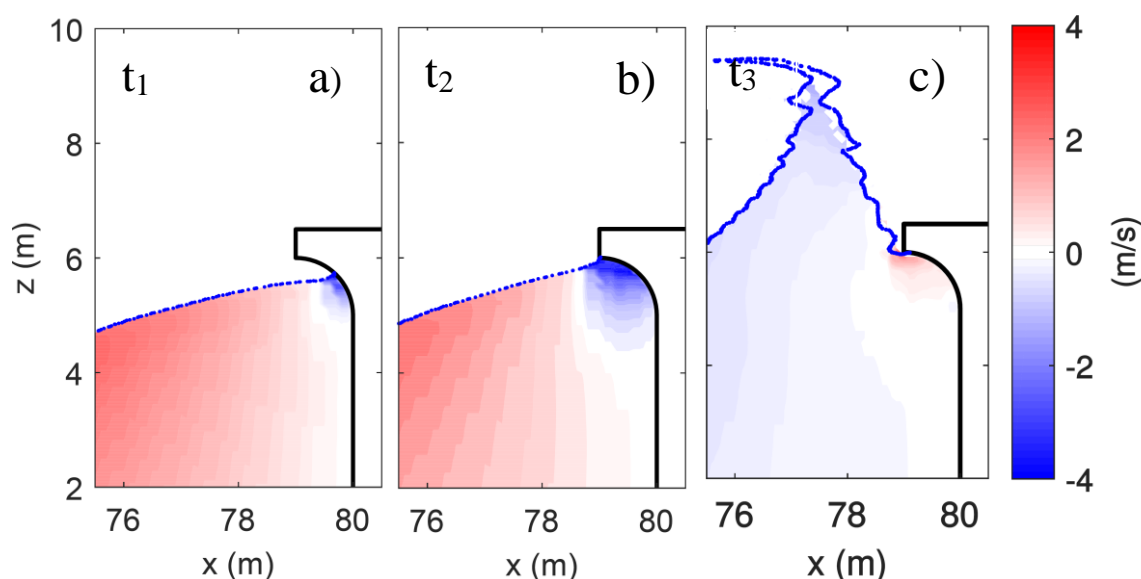
La totale mancanza di linee guida progettuali e di "standard" ingegneristici per pareti ricurve poste sulla sommità di opere a parete verticale, può portare ad una significativa sottostima delle forze indotte da onde non frangenti su opere a parete verticale e a conseguenti danni per le stesse opere.

L'obiettivo del presente lavoro, che riassume alcuni dei risultati ottenuti da Castellino et al. (2018) e da Martinelli et al. (2018), è quello di iniziare a colmare questa lacuna della letteratura tecnico-scientifica del settore.

Nei prossimi paragrafi si descrivono alcuni risultati ottenuti mediante gli approcci numerico e sperimentale.

## 2 SIMULAZIONI NUMERICHE

Le simulazioni numeriche sono state eseguite utilizzando OpenFOAM, un pacchetto CFD "opensource" il quale risolve le equazioni 3D RANS.



**Figure 2.** Evoluzione temporale della superficie libera e del campo di velocità orizzontale sulla parete del muro ricurvo: a) istante  $t_1$ , b) istante  $t_2$ , c) istante  $t_3$ . Gli istanti  $t_1$ ,  $t_2$  e  $t_3$  coincidono con quelli riportati nel pannello di destra della Figura 1.

Per risolvere le equazioni che governano flussi multifase con fluidi incomprimibili è stato adottato il solutore interFoam. La superficie libera è tracciata con una tecnica di flusso a due fasi (Berberovic et al., 2009). Inoltre, è stato utilizzato IHFOAM (Higuera et al., 2013) per generare il moto ondoso incidente ed assorbire le onde riflesse dalla struttura (assorbimento attivo). Gli esperimenti numerici (vedi Fig. 1a e Fig. 1b) sono stati condotti simulando un canale per moto ondoso lungo 100,0 m e profondo 20,0 m (scala prototipo). Le strutture oggetto delle prove sono state collocate sul lato Est del canale numerico, mentre la generazione del moto ondoso è stata eseguita sul lato Ovest dello stesso canale dove è stata imposta la condizione al contorno di assorbimento attivo.

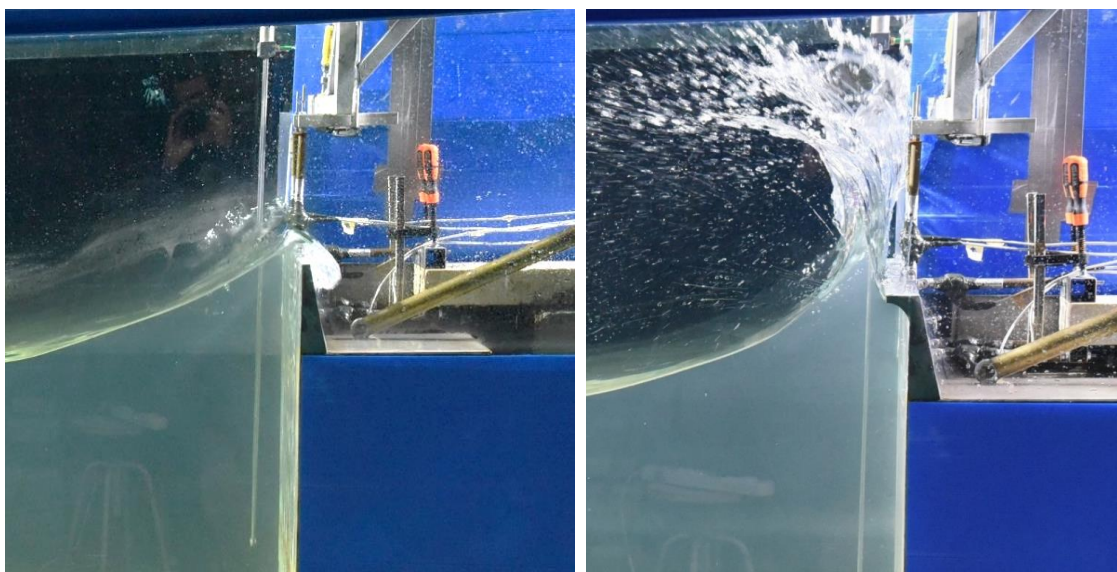
Per identificare il fenomeno fisico che innesca le pressioni impulsive sono state utilizzate onde incidenti regolari non frangenti. Inoltre l'opera a parete verticale è stata posta su un fondale orizzontale. Il pannello di destra della Figura 1 mostra le serie temporali delle pressioni impulsive misurate da quattro sonde numeriche poste lungo la parete verticale del muro ricurvo.

La Figura 2 riporta l'andamento della superficie libera e il campo orizzontale della velocità sulla parete del muro ricurvo in corrispondenza degli istanti temporali  $t_1$ ,  $t_2$  e  $t_3$  riportati anche nel pannello di destra della Figura 1. La lettura combinata delle Fig. 1 e 2 mostra: (i) l'effetto di confinamento operato dalla cresta dell'onda nell'istante  $t_2$  in cui si sviluppano i picchi di pressione sulla parete; (ii) la durata delle pressioni impulsive generate; (iii) l'efficacia del muro ricurvo nell'indirizzare verso il largo la cresta dell'onda e quindi nel ridurre le portate di tracimazione rispetto al caso di assenza di parte ricurva.

I risultati ottenuti in termini di pressioni, di forze e di volumi di tracimazione per il muro ricurvo sono stati confrontati con quelli che si ottengono nel caso di muro verticale puro (vedi Fig. 1b). Questi risultati, non riportati in questa sede per ragioni di spazio, hanno mostrato che: (i) in assenza di muro ricurvo non si verificano azioni impulsive e che in questo caso le azioni sono stimate correttamente dalle formule di Goda; (ii) il muro ricurvo è molto efficace nel ridurre le portate di tracimazione; (iii) le azioni impulsive generate dalla parete ricurva incrementano il diagramma di pressione su gran parte della parete verticale.

### 3 PROVE SPERIMENTALI

Presso il laboratorio marittimo del Dipartimento ICEA dell'Università di Padova sono state eseguite alcune prove sperimentali finalizzate ad analizzare il carattere impulsivo della forza agente sul muro paraonde curvo di un cassone a parete verticale, soggetto ad onde non frangenti regolari e irregolari.

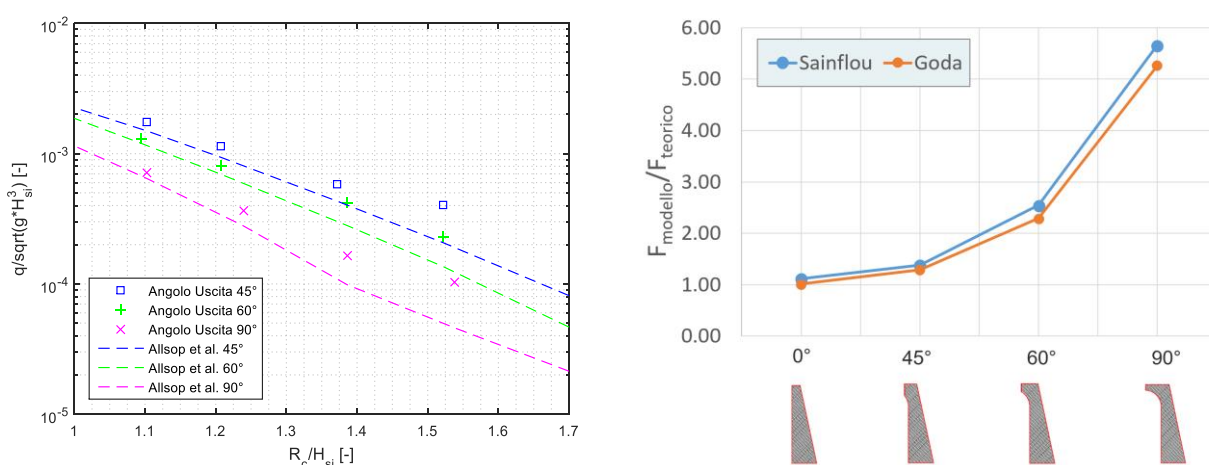


**Figure 3.** Foto a sinistra: parete verticale pura durante un evento di tracimazione. Foto a destra: parete verticale ricurva con stessa quota di coronamento di quella verticale pura e con stesse condizioni di moto ondoso incidente. Il confronto tra le due foto mostra chiaramente l'efficacia della parete curva nel contenere le portate di tracimazione.

Lo scopo delle prove è molteplice: si vuole valutare, al variare della estensione della parte ricurva del muro, l'intensità e la durata della forza impulsiva generata, verificare come questa sia associata alla larghezza spettrale del moto ondoso incidente, valutare le condizioni limite di transizione da forza quasi – statica a impulsiva, valutare la diversa portata di tracimazione, ed infine si vuole fornire una serie di misure, utili per la calibrazione di modelli numerici.

La forza impulsiva ha una durata limitata ed è perciò associata ad un impulso complessivo modesto, critica soprattutto per il muro paraonde, e solo secondariamente per la stabilità dell'intera opera a parete, la quale può avvalersi della sua elevata inerzia per contrastare l'impatto.

La descrizione delle prove sperimentali è riportata da *Martinelli et al.* (2018). Sono state analizzate 4 diverse forme del parapetto: una completamente verticale, e tre dotate di un elemento aggettante verso il largo, con uguale raggio di curvatura ma con estensione diversa. In tal modo la tangente al punto sommitale della curva assume con l'orizzontale una diversa inclinazione: 45°, 60° e 90°.



**Figure 4.** Pannello di sinistra: andamento della portata di tracimazione adimensionale in funzione del rapporto  $R_c/H_{si}$ . Pannello di destra: forze agenti sul parapetto rapportate a quelle previste da Goda al variare del settore di circonferenza che costituisce la parte ricurva del muro.

## REFERENCES

- Berberovic, T.B., van Hinsberg, N.P., Jakirlic, S., Roisman, I.V., Tropea, C. Drop impact onto a liquid layer of finite thickness: dynamics of the cavity evolution. *Phys. Rev. E* 79 (3), 036306, 2009.
- Castellino, M., Sammarco, P., Romano, A., Martinelli, L., Ruol, P., Franco, L., De Girolamo, P. Large impulsive forces on recurved parapets under non-breaking waves. A numerical study. In print, *Coastal Engineering* 2018.
- Goda, Y. Random seas and design of maritime structures, World scientific, 2010.
- Higuera, P., Lara, J., Losada I. Realistic wave generation and active wave absorption for Navier-Stokes models: Application to OpenFOAM®, *Coastal Engineering*, 2013, vol, 71, pp. 102-118.
- Oumeraci, Kortenhuis, Allsop, de Groot, Crouch, Vrijling, Voortman. Probabilistic design tools for vertical breakwaters, CRC Press, 2001.
- Takahashi, S. Design of vertical breakwater, *International Conference on Coastal Engineering*, 1996.
- Martinelli, L., Ruol, P., Volpato, M., Favaretto, C., Castellino, M., Sammarco, P., Romano, A., Franco, L., De Girolamo, P. Experimental investigation on the forces applied to a vertical breakwater recurved parapet (under review), *Coastal Engineering* 2018.