

# ESPERIMENTI A GRANDE SCALA SU CARICHI DA OVERTOPPING D'ONDA SU PARETI VERTICALI: SPESSORE E VELOCITÀ DELLA LAMA TRACIMANTE

Lorenzo Cappietti<sup>1\*</sup>, Irene Simonetti<sup>1</sup>, Andrea Esposito<sup>1</sup>, Maximilian Streicher<sup>2</sup>, Andreas Kortenhaus<sup>2</sup>

(1) Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale – DICEA, Università degli Studi di Firenze

\*email: [lorenzo.cappietti@unifi.it](mailto:lorenzo.cappietti@unifi.it)

(2) Ghent University, Ghent, Belgio

## ASPETTI CHIAVE:

- Il lavoro presenta i risultati di una campagna sperimentale a grande scala, condotta presso il Delta Flume di Deltares, circa le forze di impatto, indotte su una parete verticale, da moto ondoso tracimante.
- È indagata la correlazione fra il flusso di quantità di moto della lama d'acqua tracimante e la forza di impatto indotta dalla stessa sulla parete.
- I risultati suggeriscono la possibilità di sviluppare un modello concettuale delle forze di impatto che utilizzi come parametri indipendenti la velocità e lo spessore della lama d'acqua tracimante a loro volta esprimibili in funzione dei parametri caratteristici d'onda incidente.

## 1 INTRODUZIONE

Coste basse e poco acclivi come per esempio quelle del Belgio, dell'Olanda, della Germania o quelle Nord Adriatiche dell'Italia sono soggette a inondazioni durante le mareggiate. Una classica misura di protezione, soprattutto nel Nord Europa, prevede la costruzione di rilevati in terra che formano una diga costiera al di sopra della quale si trova il viale a mare con edifici collocati sul suo margine interno. In queste condizioni, l'overtopping d'onda sopra la diga crea flussi idrici che arrivano a impattare i muri degli edifici.

A causa dell'innalzamento del livello dei mari, come conseguenza del cambiamento climatico, la frequenza di questo fenomeno tenderà ad aumentare, quindi è importante approfondire lo studio dei carichi indotti sulle strutture dai flussi tracimanti e definire idonee linee guida per i progettisti. Esperimenti a grande scala per misurare l'impatto di flussi tracimanti agenti su *storm walls* situati sopra dighe costiere sono stati condotti da Van Doorslaer et al., 2017. Questo studio, tuttavia, non tiene conto dell'effetto di acque basse e fondale debolmente digradante sul processo di frangimento dell'onda e sulla conseguente forza d'impatto.

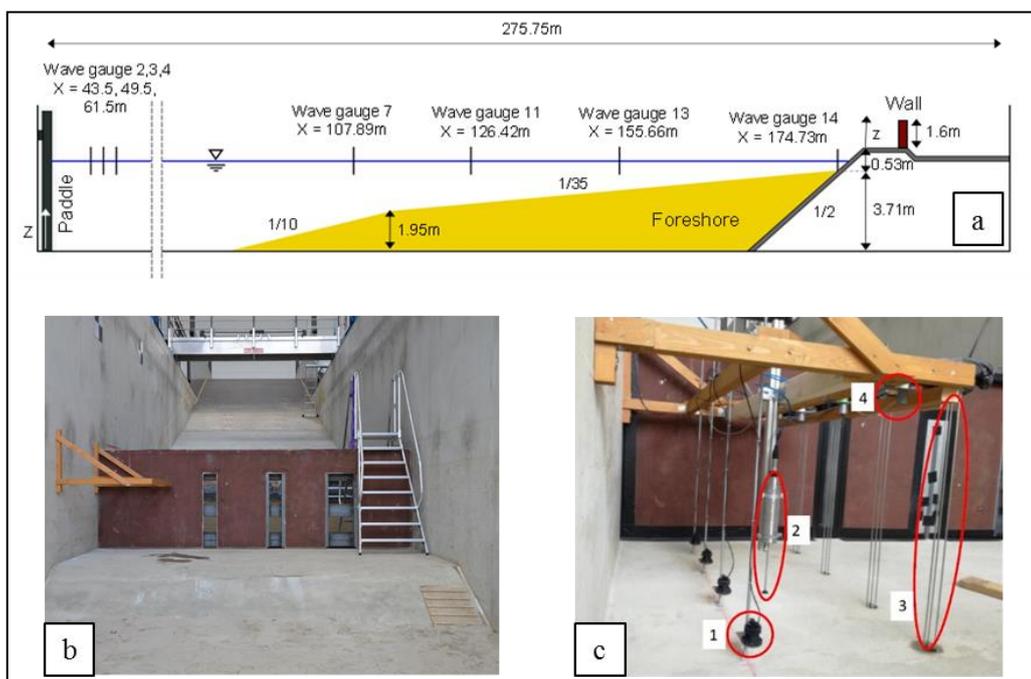
Il presente lavoro è basato sugli esperimenti svolti presso il Delta Flume di Deltares (Olanda) nell'ambito del progetto europeo HYDRALAB+ - WALOWA (*Wave LOads on WALLs*). Il progetto ha avuto l'obiettivo generale di studiare le forze di impatto indotte da onde tracimanti su strutture verticali poste sulla sommità di dighe costiere mediante test di laboratorio su modello fisico a grande scala.

L'obiettivo specifico del presente lavoro è quello di studiare lo spessore e la velocità del flusso tracimante che impatta sul muro. La forza di impatto viene esercitata dal flusso d'acqua che scorre su un piano orizzontale prima di impattare sulla parete verticale. La variazione della componente orizzontale del flusso delle quantità di moto di questa portata di overtopping, attraverso un volume di controllo delimitato dal muro, è pari alla forza d'impatto a meno degli attriti al fondo. Per questo motivo, lo studio delle forze d'impatto può essere condotto in termini di flusso di quantità di moto della lama tracimante.

L'utilizzo del flusso di quantità di moto quale parametro di riferimento per studiare diversi processi di idraulica marittima è stato proposto per la prima volta da Hughes (*Hughes, 2004a*). In particolare, l'utilizzo di questo parametro per derivare equazioni predittive per fenomeni di *run-up* dell'onda incidente e forze esercitate su pareti verticali, è stato proposto da *Hughes e 2004b* e *Chen et al., 2015*.

## 2 DESCRIZIONE DEI TEST

La descrizione dettagliata del set-up sperimentale e dei test condotti durante il progetto WALOWA è fornita in *Streicher et al. 2017*. Si includono di seguito, per chiarezza, alcuni dettagli salienti circa la costruzione del modello.



**Figura 1.** Geometria generale del modello sperimentale WALOWA (a); parete verticale in acciaio come costruita presso il Delta Flume di Deltares (b); strumentazione di misura sul *promenade*: misuratori di portata a mulinello, PW (1), correntometro elettromagnetico, EMS (2), sonde di livello resistive, WLDM (3), distanziometri ultrasonici, USD (4) (c).

La geometria del modello WALOWA è divisa in 4 parti principali (Fig. 1a): (i) un fondale sabbioso con pendenza iniziale 1/10, e successivamente pendenza 1/35 fino al piede della diga; (ii) una diga in cemento con pendenza 1/2; (iii) un viale lungomare avente larghezza 2.3m, con pendenza 1/100; (iv) una parete verticale in acciaio, con altezza 1.6m sulla sommità del viale lungomare.

I parametri velocità e spessore del flusso tracimante sono misurati da sonde di livello resistive (WLDM), distanziometri ultrasonici (UDS), tre dei quali del tipo MaxSonar (con risoluzione 5mm) e uno del tipo Honeywell 943 (con risoluzione 2mm), come riportato in Figura 1c. Le velocità sono misurate da un correntometro elettromagnetico bidirezionale (EMS) e da 4 misuratori di portata monodirezionali a mulinello (PW). La frequenza di acquisizione di tutti gli strumenti impiegati è pari a 1000Hz.

## 3 ANALISI DEI DATI E RISULTATI

Sono stati condotti una serie di attacchi ondosi sia con onde bicromatiche che irregolari. In questo lavoro si riporta un esempio di elaborazione dei dati acquisiti inerenti ad un test con onde irregolari (vedi Tabella 1). Le serie temporali di velocità misurate dall'EMS sono riportate in Figura 2a, dove i valori positivi si riferiscono a flussi d'acqua diretti verso la parete, mentre quelli negativi sono relativi a flussi diretti verso il largo (flusso di ritorno). I risultati mostrano che le velocità massime e medie dei flussi diretti verso il muro sono sempre maggiori di quelle dei flussi di ritorno. Il massimo spessore della lama d'acqua tracimante (Fig. 2b), misurato dalla sonda WLDM accanto all'EMS è di circa 60cm.

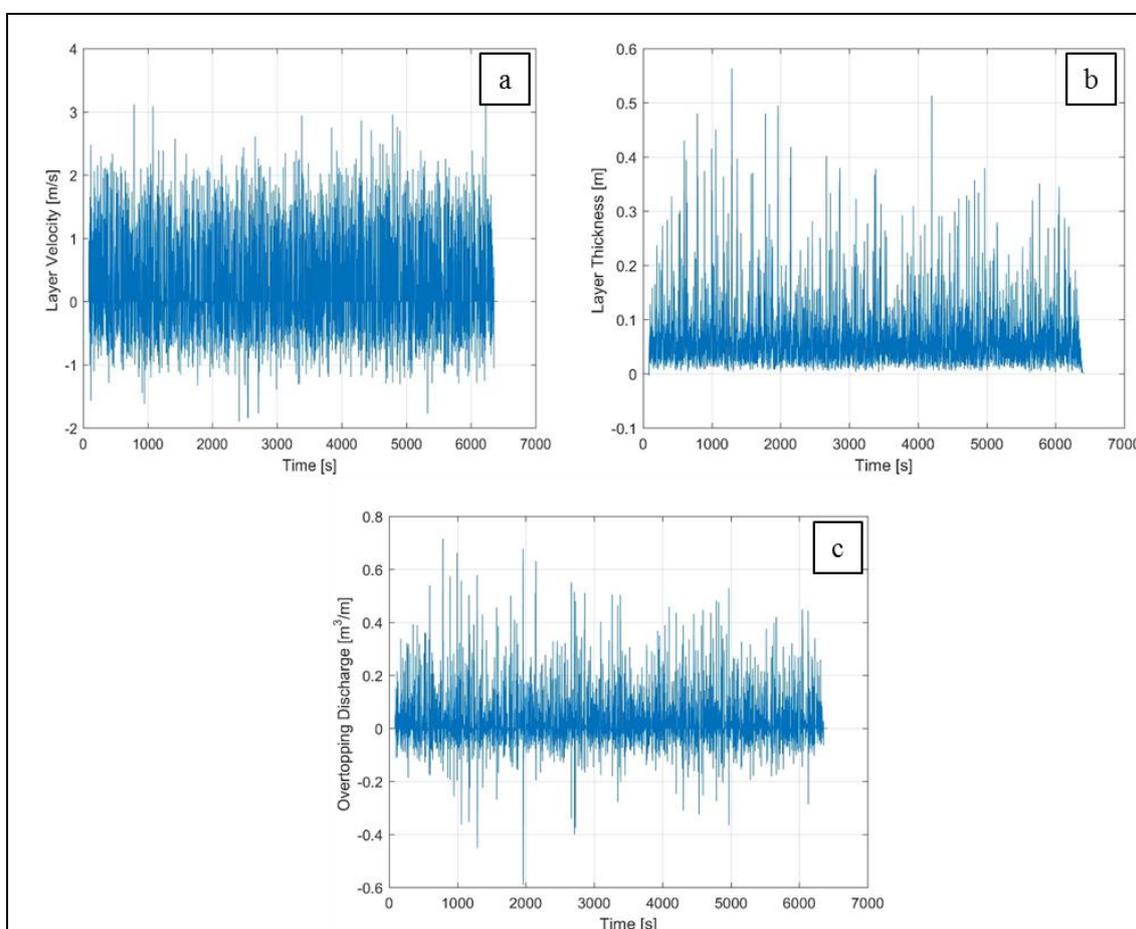
La portata istantanea (Fig. 2c) è calcolata come il prodotto fra lo spessore della lama tracimante e la velocità della stessa, come in Eq. 1.

**Tabella 1.** Parametri caratteristici del test con codice IR\_1\_F\_R. #: durata del test espresso in periodi d'onda;  $h_p$ : profondità d'acqua davanti al wave maker;  $h_t$ : profondità d'acqua al piede della diga;  $A_c$ : freeboard della diga;  $H_{off}$ : altezza d'onda significativa al wave maker;  $H_{toe}$ : altezza d'onda significativa al piede della diga;  $T_{off}$ : periodo d'onda al wave maker;  $T_{toe}$ : periodo d'onda al piede della diga.

#	$h_p$ [m]	$h_t$ [m]	$A_c$ [m]	$H_{off}$ [m]	$H_{toe}$ [m]	$T_{off}$ [s]	$T_{toe}$ [s]
1000	4.01	0.30	0.23	1.06	0.35	5.80	10.43

$$q(t) = \sum_{i=1}^N \eta(t_i) \cdot v(t_i) \quad (1)$$

dove  $\eta(t_i)$  e  $v(t_i)$  sono, rispettivamente, lo spessore e la velocità della lama tracimante al tempo  $t_i$ . La distribuzione statistica delle velocità del flusso diretto verso la parete e di quello di ritorno e degli spessori della lama tracimante è attualmente in fase di studio e verrà presentata in lavori futuri.

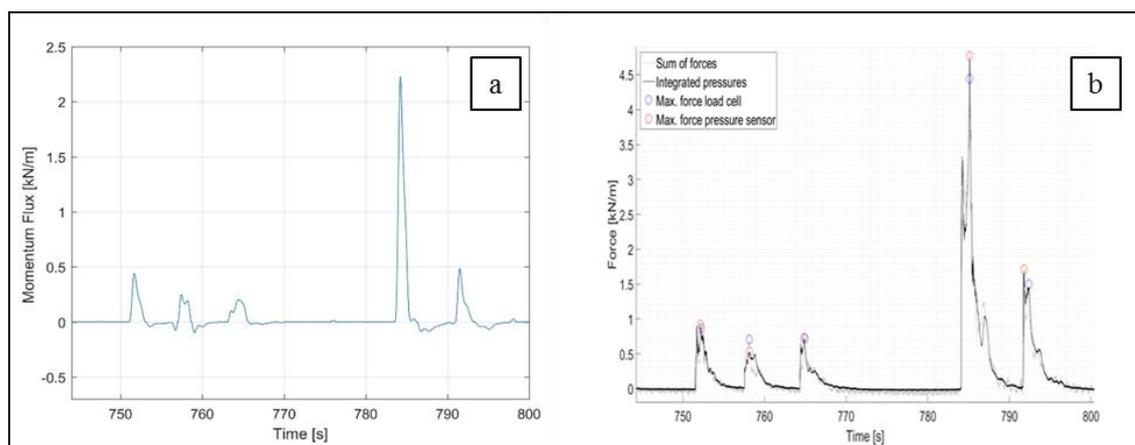


**Figura 2.** Velocità istantanea della lama tracimante diretta verso la parete (velocità positive) e della lama di ritorno diretta verso il largo (velocità negative) (a); spessore istantaneo della lama tracimante (b); portata, valori positivi indicano flussi di overtopping diretti verso la parete verticale, valori negativi indicano i flussi di ritorno (c).

Dal momento che uno degli scopi principali del progetto WALOWA è quello di valutare la sollecitazione dovuta all'impatto della lama di tracimazione sulla parete verticale, è di un certo interesse calcolare il flusso di quantità di moto diretto verso la parete e quello di ritorno, come in Eq. 2:

$$M(t) = \sum_{i=1}^M \rho \cdot \eta(t_i) \cdot v^2(t_i) \cdot \text{sign}(v) \quad (2)$$

dove  $\rho$  è la densità dell'acqua (assunta pari a  $1000\text{kg/m}^3$ ) e  $\text{sign}$  è la funzione segno. I risultati di questa analisi sono riportati in Fig. 3a, mentre le misure dirette della forza d'impatto, precedentemente presentate in *Streicher et al. 2017*, sono riportate in Fig. 3b per facilitare il confronto. Il paragone fra i risultati in Fig. 3a e Fig. 3b mostra come i picchi di flusso di quantità di moto e forza avvengano nello stesso istante, sebbene il flusso di quantità di moto non mostri la forma a doppio picco che può essere individuata nel segnale della forza di impatto. Ciò può essere dovuto a differenti fenomeni, come quello della compressione e dell'espansione della miscela aria acqua.



**Figura 3.** Flusso di quantità di moto attraverso la sezione di misura di EMS e WLDM sul lungomare (a); forze d'impatto dell'onda tracimante direttamente misurate sulla parete verticale, da *Streicher et al. 2017* (b).

#### 4 CONCLUSIONI

Sono stati condotti test di laboratorio su un modello fisico a grande scala sull'impatto di portate di overtopping su muri verticali. Uno specifico task dell'attività sperimentale è inerente la misura dello spessore e della velocità della lama d'acqua tracimante. A questo fine, il modello è stato equipaggiato da diversi sensori, per ottenere misure ridonanti di spessore e velocità. I risultati preliminari presentati in questo lavoro rivelano una evidente correlazione fra la quantità di moto del flusso diretto verso la parete e la forza indotta dall'impatto dell'onda sulla parete verticale. Questo suggerisce la possibilità di sviluppare un modello concettuale per le forze d'impatto che utilizzi come parametri indipendenti lo spessore e la velocità della lama tracimante. Tali parametri possono a loro volta essere correlati con i parametri caratteristici d'onda incidente e quindi è possibile sviluppare un modello di impatto di facile applicazione.

#### RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Van Doorslaer, K., Romano, A., De Rouck, J., Kortenhaus, A., Impacts on a storm wall caused by non-breaking waves overtopping a smooth dike slope. *Coastal Engineering*, 122, 93-111, 2017.
- Hughes, S.A., Wave momentum flux parameter: a descriptor for nearshore waves, *Coastal Engineering*, 51, 1067-1084, 2004a.
- Hughes, S.A., Estimation of wave run-up on smooth, impermeable slopes using the wave momentum flux parameter, *Coastal Engineering*, 51, 1085-1104, 2004b.
- Chen, X., Hofland, B., Altomare, C., Suzuki, T., Uijtewaal, W., Forces on a vertical wall dike crest due to overtopping flow. *Coastal Engineering*, 95, 94-104, 2015.
- Streicher, M., Kortenhaus, A., Altomare, C., Gruwez, V., Hofland, B., Chen, X., Marinov, K., Scheres, B., Schüttrumpf H., Hirt, M., Cappiotti, L., Esposito, A., Saponieri, A., Valentini, N., Tripepi, G., Pasquali, D., Di Risio, M., Aristodemo, F., Damiani, L., Willems., M., Vanneste D., Suzuki, T., Klein Breteler, M., Kaste, D., WALOWA (Wave Loads on Walls) – Large-scale experiments in the Deltre Flume, in *Proceedings of the 8th SCACR conference 3rd – 6th October, Santander (Spain), 2017*.