

SULLA DISPOSIZIONE OTTIMALE DI FRANGIFLUTTI GALLEGGIANTI A CATAMARANO COMBINATI A CONVERTITORI DI ENERGIA ONDOSA

Chiara Favaretto^{1*}, Luca Martinelli¹ & Piero Ruol¹

(1) Dipartimento ICEA, Università di Padova

*email: chiara.favaretto@dicea.unipd.it

ASPETTI CHIAVE

- La ricerca in cui è inserito questo lavoro mira allo sviluppo di un dispositivo ibrido costituito da un convertitore di energia ondosa accoppiato ad un frangiflutti galleggiante.
- Il frangiflutti, ancorato con pali, è costituito da elementi prefabbricati di tipo II collegati rigidamente, in modo da formare una struttura a catamarano.
- La configurazione migliore è la più stretta tra le due esaminate (8 m e 12 m di larghezza), che risulta molto efficiente pur senza essere soggetta a grosse sollecitazioni.
- La struttura a catamarano è da preferire rispetto a quella tradizionale, a parità di massa, sia in termini di trasmissione che di riflessione.
- Il convertitore esaminato, idoneo ad integrare frangiflutti singoli di tipo II, non è adatto ad integrare le strutture a catamarano.

1 INTRODUZIONE

Gli Autori sono impegnati da tempo (Ruol, 1984) nello studio del comportamento di frangiflutti galleggianti (FG), con l'obiettivo di aumentarne l'efficienza, mediante una soluzione tecnologicamente valida ed economicamente interessante. Infatti, nonostante tali strutture trovino largo consenso nelle installazioni dei porti turistici soprattutto per il loro basso impatto ambientale e la facilità di installazione, hanno lo svantaggio di diventare meno efficienti all'aumentare del periodo delle onde incidenti, risultando quindi proporzionalmente meno utili quando la necessità di protezione del porto è maggiore.

A tale scopo, si è pensato di sviluppare un dispositivo ibrido che accoppi un convertitore di energia ondosa (comunemente indicato con l'acronimo WEC, dall'inglese Wave Energy Converter) ad un FG. Studi simili sono presenti in Akgül (2015) e Atzeni e Montaldo (1996). Un WEC, estraendo parte dell'energia incidente, ha la potenzialità di ridurre l'energia trasmessa a tergo del FG. Inoltre, se opportunamente dimensionato, il WEC dovrebbe ridurre la trasmissione anche per le condizioni ondose per le quali i tradizionali FG non sono efficienti, ossia per periodi dell'onda incidente superiori a quelli limite di efficacia degli FG.

Le prime fasi della ricerca relativa al dispositivo ibrido WEC-FG sono state presentate in Martinelli *et al.* (2016) e Favaretto *et al.* (2017).

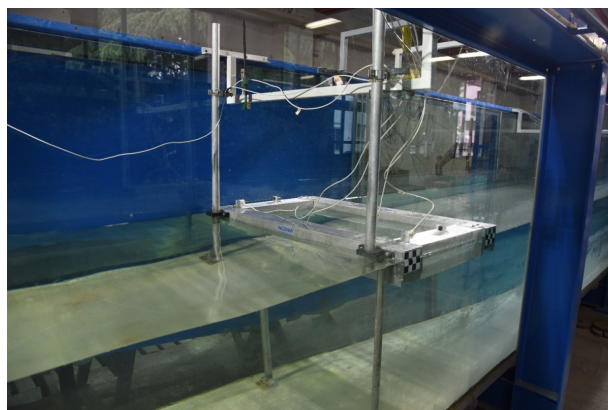
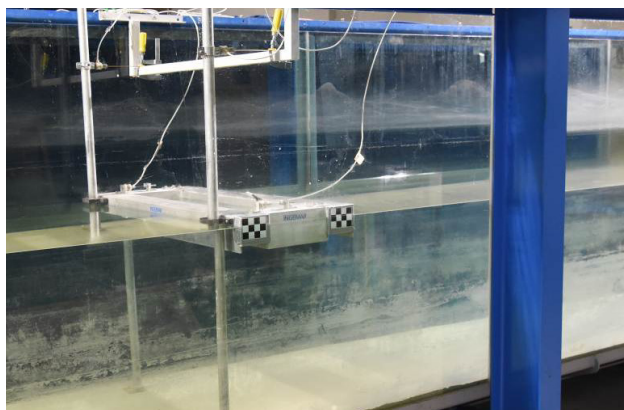


Figura 1. Configurazione S1 di larghezza 8 m (sx) e configurazione S2 di larghezza 12 m (dx)

Il dispositivo WEC analizzato è lo ShoWED, un convertitore di potenza modesta (pochi kW) e caratterizzato da un TRL (Technology Readiness Level) compreso fra 5 e 6, essendo già stato collocato – ma solo per un breve periodo – a Venezia lungo il canale della Giudecca. Lo ShoWED, in una sua ideale configurazione, dovrebbe essere installato su pali, di fronte al FG stesso. Le peculiarità di tale convertitore sono legate al meccanismo di conversione, adatto anche a piccole oscillazioni ondose.

Il FG esaminato è di tipo Π , forma molto diffusa in commercio, generalmente prefabbricato ed in calcestruzzo, analizzato per es. in *Ruol. et al.* (2012; 2013). E' evidente che, come dimostrato da *Sannasiraj et al.* (2001), il vincolo fra i due elementi che formano il catamarano è essenziale per diminuire la trasmissione. *Syed and Mani* (2006) hanno sottolineato che l'aggiunta di un terzo elemento migliora, anche se in maniera non determinante, l'efficienza. Vi sono molti studi sperimentali sugli FG a catamarano (e.g. *Richey*, 1982; *Ruol*, 1984; *Williams and Abul-Azm*, 1997; *Peña et al.* 2011), tuttavia nessuna delle strutture studiate è formata da prefabbricati con sezione di tipo Π .

In questa memoria si riportano sia i risultati dell'analisi di una peculiare disposizione planimetrica a catamarano di due elementi prefabbricati di tipo Π (facilmente trasportabili, viste le ridotte dimensioni), vincolati rigidamente in opera, sia alcuni risultati riguardanti il WEC. Al tal fine sono stati condotti studi sperimentali nel laboratorio marittimo del Dipartimento ICEA dell'Università di Padova.

2 PROVE SPERIMENTALI SUI FG

La sperimentazione sugli FG ha lo scopo di valutare la trasmissione e la riflessione per due configurazioni individuate (S1 ed S2) caratterizzate da una diversa distanza fra elementi Π di larghezza 2 m ciascuno, alti 1.0 m (bordo libero 0.64 m) accoppiati rigidamente a catamarano in modo da assumere una larghezza complessiva di 8.0 m e 12.0 m (in scala di prototipo), nonché le sollecitazioni sugli elementi stessi (di larghezza 2.0 m) che compongono il catamarano e gli sforzi fra i collegamenti. La tabella 1 riassume il programma delle prove, ossia le fasi operative e le 26 onde irregolari esaminate, che coprono un intervallo di periodi molto più largo di quello tradizionalmente esaminato.

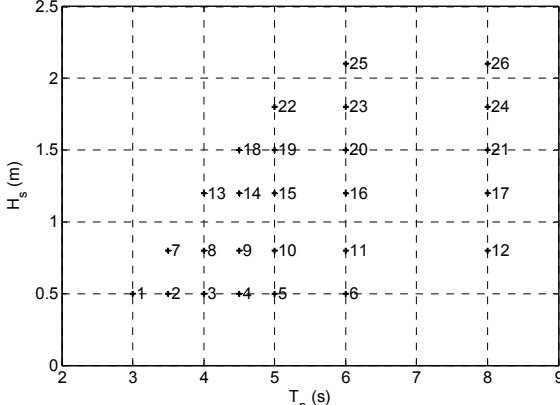
| Fasi operative | Attività | Schema grafico delle 26 prove eseguite |
|----------------------------|--|--|
| Fase preliminare | costruzione del fondale calibrazione generatore |  |
| Configurazione S1 (20x8m) | assemblaggio ancoraggio assemblaggio struttura | |
| | risposta dinamica prove | |
| Configurazione S2 (20x12m) | assemblaggio ancoraggio assemblaggio struttura | |
| | risposta dinamica prove | |
| | prove | |

Tabella 1. Programma delle prove

La Figura 2 (sx) confronta la trasmissione misurata nelle due configurazioni e quella stimata per un FG “pieno” (box type, non a catamarano) di larghezza pari a 4, 8 e 12 m, al variare del periodo dell'onda incidente. Una struttura “piena” di larghezza 4 m è sostanzialmente quella che si otterrebbe unendo i due elementi Π senza lasciare spazio in mezzo. Si può notare che, per le condizioni esaminate, le due configurazioni analizzate hanno risultati molto simili fra loro ed equivalenti ad una struttura “piena” di larghezza 8 m, avente dislocamento circa doppio. In Figura 2 (dx) è rappresentato il coefficiente di riflessione che, come per la trasmissione, risulta essere molto simile per le due configurazioni.

Le sollecitazioni misurate nei collegamenti fra gli elementi longitudinali e quelli trasversali (di irrigidimento del catamarano) sono risultate più elevate per il caso S2. Dato che sia la sollecitazione che le dimensioni (e dunque il costo complessivo) sono minori per la configurazione S1, le prove hanno indicato

come quest'ultima risulta essere la soluzione più vantaggiosa, a parità di efficienza.

Per T_p compreso fra 3.5 s e 4.5 s, la trasmissione è poco sopra il limite di accettabilità e la riflessione è elevata. Ne consegue che se il WEC posto di fronte al FG avesse condizioni di risonanza in tale intervallo, potrebbe trarre vantaggio dalla riflessione e, riducendo la trasmissione, potrebbe ampliare l'intervallo di applicabilità del FG.

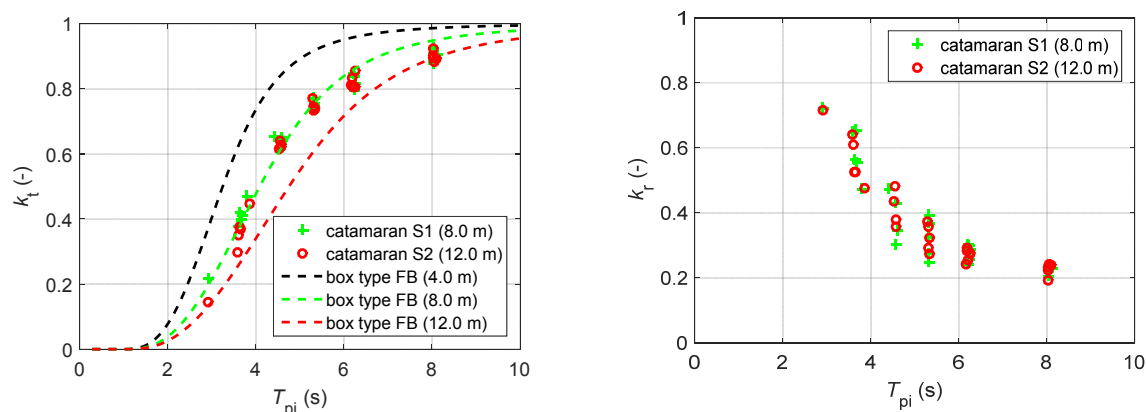


Figura 2. Trasmissione (sx) e riflessione (dx) ondosa.

3 PROVE SPERIMENTALI SUL WEC

Lo ShoWED è formato da un galleggiante largo 1 m, di forma ellissoidica con assi 0.75 m e 0.45 m, e pescaggio all'equilibrio di 0.11 m, collegato ad un generatore elettrico tramite un braccio snodato. Il dispositivo è in grado di convertire anche la poca energia trasportata da onde di alcuni centimetri. Il WEC analizzato è stato dimensionato per onde molto maggiori rispetto a quelle che possono essere generate in laboratorio, pertanto l'efficienza misurata in laboratorio è ragionevolmente assai minore di quella che può essere ottenuta al vero. Si è tuttavia ritenuto che l'effetto del periodo dell'onda fosse indipendente dall'altezza.

Le prove sperimentali hanno lo scopo di valutare se tale WEC è idoneo ad integrare un FG di tipo Π , singolo o a catamarano. Questa sezione riassume le principali conclusioni della sperimentazione fisica condotta sullo ShoWED in più fasi (Martinelli et al., 2016; Favaretto et al. 2017).

Sono state studiate diverse configurazioni sia in presenza che in assenza di un frangionde che amplifica l'onda per riflessione, sia in relazione alle caratteristiche di impedenza del circuito utilizzatore, con 8 valori diversi di resistenza R (variabile fra 16 Ω a 1.5 k Ω) e 5 diversi valori di capacità C (0, 220, 440, 940 and 9900 μ F). Le onde riprodotte sono sia regolari (H fra 5 e 20 cm, T fra 1.0 e 5.0 s) che irregolari ($H_s=9$ e 12 cm, $T_p=2$ s, spettro JONSWAP con $\gamma=3.3$).

La massima efficienza del dispositivo è risultata pari a $\eta=0.37\%$, misurata in condizione di risonanza, indotta grazie all'interazione con un frangionde posto 1.2 m dietro il WEC, per onda regolare $H=0.2$ m e periodo $T=2.0$ s, $R=230 \Omega$ e $C=940 \mu$ F. Ipotizzando una installazione in $h=10$ m di fondale, galleggiante di larghezza 4 m, con condizioni medie di $H_s=0.7$ m, $T_p=2$ s, ossia flusso di energia incidente pari a 480 W/m (le potenzialità dell'energia ondosa in Italia sono state ad es. valutate da Vicinanza et al. 2011 e Liberti et al., 2013), si avrebbe una produzione ~ 4.8 kWh/giorno, sufficiente per esempio ad elettrificare le esigenze di illuminazione del pontile, incluso il fanale.

In condizioni di risonanza del WEC ($T=2$ s) è possibile constatare che il FG è molto efficace (cfr Figura 2): per $T=2$ s, infatti, il FG induce una riflessione quasi completa e una trasmissione sostanzialmente nulla. Per tale periodo, quindi, la presenza del WEC non costituisce alcun valore aggiunto.

Il risultato di maggior rilievo della sperimentazione è legato alla verifica di un concetto ben noto nell'ingegneria elettrica (e.g. Korde e Ringwood 2016), ossia che resistenza e condensatore del circuito utilizzatore modificano la dinamica e quindi l'efficienza del WEC. In Martinelli et al. 2016 è riportata

l'efficienza misurata per un'onda irregolare $H_s=0.1$ m e $T_p=2$ s, in assenza di FG a tergo del WEC, per 4 diversi valori dell'impedenza del circuito utilizzatore. Tale efficienza (e il modo di oscillare della boa) non è costante e dunque non può essere ricavata indipendentemente dal sistema di trasformazione AC-DC-AC della potenza prodotta.

4 CONCLUSIONI

La configurazione a catamarano è molto più efficiente di quella tradizionale, con una trasmissione ondosa (k_t) inferiore al 50% per stati ondosi con periodo di picco (T_p) inferiore a 4 s. Non si è osservata differenza, in termini di trasmissione, fra le configurazioni a catamarano S1 ed S2. Al fine di avere una efficienza elevata per periodi relativamente elevati, la scelta migliore (dal punto di vista economico e delle sollecitazioni) è la configurazione a catamarano S1 (2 elementi Π di 2 metri di larghezza, uniti rigidamente lasciando uno spazio di 4 m).

Le prove sperimentali su un particolare WEC, denominato ShoWED, dimostrano che esso è più adatto ad integrare un FG di tipo Π singolo rispetto alla configurazione a catamarano. Di fatto il WEC integrato ad un FG a catamarano non fornirebbe un sostanziale beneficio in termini di attenuazione dell'onda trasmessa. Si ritiene quindi necessario esaminare WECs alternativi da integrate a tali FG.

Gli studi sul WEC hanno evidenziato che sia la produzione elettrica sia la dinamica (ampiezza delle oscillazioni) del galleggiante dipendono fortemente dalle caratteristiche capacitive del circuito di assorbimento. Questo risultato solleva alcuni dubbi sulla validità delle prove sperimentali talora discusse in letteratura, che fanno dipendere le caratteristiche del generatore da un solo parametro (generalmente una resistenza).

RINGRAZIAMENTI

La ricerca è stata parzialmente finanziata dal PRAT 2014 programma n. CPDA149731, "Research and development of new types of floating breakwaters in high-energy wave environments". Si ringraziano la ditta INGEMAR S.r.l per le informazioni sul FG a catamarano e Manlio Boito, inventore dello ShoWED.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Akgül, M. A. (2015). Design of a floating pipe breakwater – WEC hybrid system (PhD, Fen Bilimleri Enstitüsü).
- Atzeni, A. and Montaldo, N. (1996): Floating breakwater with air chamber and devices of energy dissipation. *Offshore Mechanics and Arctic Engineering* 1996, ASME, New York, Vol. I, Part B, S. Chakrabarti et al., eds., pp. 279-286.
- Favaretto, C., Martinelli, L., Ruol, P., Cortellazzo, G. (2017). Investigation on Possible Layouts of a Catamaran Floating Breakwater behind a Wave Energy Converter. *Proc. 27th International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE)*, 140-145.
- Korde, U.A., Ringwood J. V. (2016): *Hydrodynamic Control of Wave Energy Device*, Cambridge University Press., 381.
- Liberti L., Carillo A., Sannino G., (2013): Wave energy resource assessment in the Mediterranean, the Italian perspective, *Renewable Energy*, 50, 938-949.
- Martinelli L., Ruol P., Favaretto C., (2016): Hybrid Structure Combining a Wave Energy Converter and a Floating Breakwater. *Proc. 26th International Ocean and Polar Engineering Conference (ISOPE)*, 622-628.
- Peña, E., Ferreras, J., Sanchez-Tembleque, F. (2011): Experimental study on wave transmission coefficient, mooring lines and module connector forces with different designs of floating breakwaters. *Ocean Eng.*, 38 (10) (2011), pp. 1150–1160.
- Richey E.P., 1982. *Floating Breakwater Field experience, West Coast*. Report MR 82-5, U.S. Army, Corps of Engineers, Coastal Engineering Research Center; Springfield, Va, 64 pp.
- Ruol P. (1984). Floating breakwaters in small basins. *Int. Symp. on Maritime Structures in the Mediterranean Sea*, Athens, September 1984, Vol 2, 123-130.
- Ruol, P., Martinelli, L., Pezzutto, P. (2012). Limits of the new transmission formula for pi-type floating breakwaters. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(33), 47.
- Ruol P., Martinelli L., Pezzutto P. (2013): Formula to Predict Transmission for PI-type Floating Breakwaters, *Journal of Wat., Port, Coastal, and Ocean Eng.*, 1, 1-8.
- Sannasiraj S.A., R. Sundaravivelu and V. Sundar, (2001): Diffraction-radiation of multiple floating structures in directional waves. *Ocean Eng.*, 28, 201-234.
- Syed, S. A., & Mani, J. S. (2006). Performance of Multiple pontoons Floating Breakwater—A Numerical Approach. *Civil Engineering in the Oceans VI* 342-355.
- Vicinanza D., Cappietti L., Ferrante V., Contestabile P. (2011): Estimation of the wave energy in the Italian offshore, *J.C. Res.*, 64.
- Williams, A.N. and Abul-Azm A.G., (1997). Dual pontoon floating breakwater. *Ocean Eng.*, 24 (5), 465-478.