

## Modellazione fisica di un dispositivo galleggiante per l'ossigenazione degli strati marini profondi azionato da energia ondosa

Alessandro Antonini

DICAM, Università di Bologna, Via Risorgimento 2, Bologna, 40136, Italy.  
Tel.: 0512093755 - Email: alessandro.antonini2@unibo.it

### Riassunto

Nessun'altra variabile ambientale di questa importanza è cambiata tanto velocemente come l'ossigeno disciolto nelle acque costiere. Alcuni recenti studi hanno messo in luce come il 78 % delle coste degli Stati Uniti e il 65 % delle coste europee che si affacciano sull'Atlantico siano colpite da fenomeni di eutrofizzazione, ipossia e anossia. Per quanto riguarda l'Europa, la stima del 65 % non tiene conto di mari interni come il Mar Adriatico e il Mar Baltico che invece sono comunemente colpiti da fenomeni di eutrofizzazione e conseguente anossia. In questo studio si presenta un semplice dispositivo per indurre il rimescolamento della colonna d'acqua ed allo stesso tempo l'ossigenazione degli strati marini profondi tramite il pompaggio di acqua di superficie, maggiormente ossigenata, verso il fondo. I primi risultati della velocità dell'acqua pompata verso il fondo e degli spostamenti a cui è sottoposto il dispositivo sono stati misurati durante le prove fatte in canale sotto l'azione di quattro diverse onde regolari caratterizzanti il clima ondoso del Nord Adriatico.

*Parole chiave:* anossia, ossigenazione, modelli fisici, energia ondosa.

### Introduzione

Il termine eutrofizzazione si riferisce ad un eccessivo contenuto di nutrienti (azoto e fosforo) nell'acqua e ai loro effetti sull'ambiente marino (European Environmental Agency, 1994). Questo fenomeno può influenzare notevolmente gli ecosistemi marini causando morie di pesci, perdita di biodiversità, apparsa di mucillagini e fenomeni di avvelenamento che possono generare problemi anche agli esseri umani, (e.g. Smayda 1990; Viviani 1992; Vollenweider et al. 1992; Cattani and Vitali 1995; Degobbis et al. 1995).

Il Nord Adriatico è caratterizzato da bassi fondali e un grosso apporto di acqua dolce proveniente dai vari fiumi, italiani e non solo, che vi sfociano. La circolazione termoalina in combinazione con l'accelerazione di Coriolis genera una circolazione lungo la costa principalmente in senso anti orario, che confina tutti i nutrienti provenienti dai vari fiumi sulla costa italiana a sud della foce del Po, (Zavatarelli et al. 1998).

Le diretta conseguenza di un accumulo di nutrienti consiste in un'abnorme produzione primaria in superficie, che lentamente raggiunge il fondo per poi essere decomposta in presenza di ossigeno,

In questi casi, a determinare la carenza, se non l'assenza, di ossigeno è la grossa attività di ossidazione che avviene al fondo. Questo si ha in particolar modo nei periodi estivi, quando l'agitazione ondosa è pressoché nulla e la stratificazione dovuta al gradiente di densità è molto pronunciata, (Giordani et al. 1992). (Degobbis 1989; Zavatarelli et al. 1998).

Questo lavoro si propone di studiare un dispositivo, semplice ed economico, per indurre il rimescolamento della colonna d'acqua stratificata e l'ossigenazione degli strati marini profondi attraverso il pompaggio di acqua superficiale verso il fondo sfruttando la sola energia ondosa disponibile nei periodi estivi.

**Obiettivi**

I principali obiettivi di questo lavoro sono:

- Identificare i principali processi fisici che governano il funzionamento del dispositivo;
- La misurazione degli spostamenti a cui è sottoposto il dispositivo sotto l'azione di onde di calma (condizioni di esercizio) e onde estreme;
- La misurazione delle velocità dell'acqua all'interno del condotto che unisce il galleggiante al fondo.

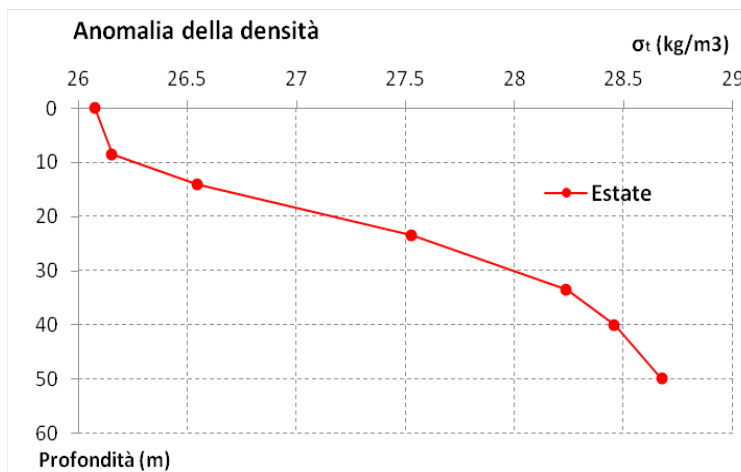
**Il funzionamento del dispositivo**

Il principio su cui si basa il dispositivo è quello di pompare acqua di superficie, quindi maggiormente ossigenata, ad una profondità comparabile con il picnolino. Il galleggiante raccoglierà i volumi di acqua trascinata generando così il carico necessario a spingere la colonna d'acqua al suo interno verso il basso.

Il dispositivo in scala di prototipo sarà lungo circa 10 m, congiungendo così la superficie con il fondo dove l'ossigeno è richiesto per l'ossidazione della materia organica. Un tubo così lungo induce sul flusso di acqua al suo interno delle perdite di energia dovute, sia alla scabrezza che all'imbocco e allo sbocco della vena fluida. Una seconda componente da considerare, oltre alle classiche perdite, è l'energia necessaria a vincere il gradiente di densità che si instaura all'esterno del dispositivo in condizioni di colonna d'acqua stratificata.

Il dispositivo è studiato per operare fuori dalla linea dei frangenti anche se, sia la distanza che la profondità di installazione sono strettamente legate alle condizioni di sviluppo dell'anossia.

Il Nord Adriatico riceve grandi volumi di acqua dolce da tutti i fiumi che vi portano le loro acque, questo genera un accumulo di acqua meno salata in superficie, che congiuntamente al gradiente di temperatura porta a una stratificazione piuttosto marcata come messo in evidenza dalla Fig. 1.



Per il calcolo dei profili di densità sono stati utilizzati profili di salinità e temperatura (Artegiani et al. 1996) come dati di input alla formula proposta dall'UNESCO per la caratterizzazione delle masse di acqua marina (Fofonoff et al. 1983).

Il carico necessario a pompare acqua verso il fondo è stato calcolato attraverso l'integrazione della densità lungo la colonna verticale, ipotizzando il condotto completamente pieno di acqua di superficie Eq. (1):

$$\Delta h_\gamma = g \cdot \phi \cdot \rho_z \cdot dz \quad (1)$$

Figura 1 - Profilo di densità caratteristico dei periodi estivi per il Nord Adriatico.

I risultati ottenuti mostrano come anche un basso livello energetico possa essere sufficiente ad innescare il meccanismo di pompaggio. Ipotizzando un tubo lungo 50 m e un diametro di 0.8 m, il carico necessario

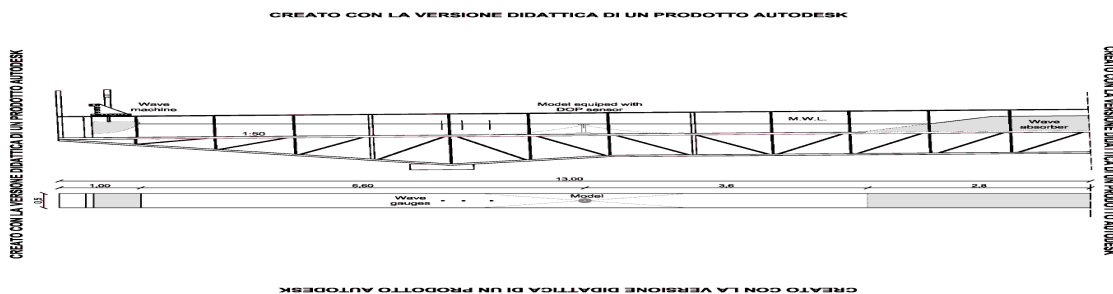


Figura 2 - Sistemazione del modello all'interno del canale di prova.

affinché il dispositivo pompi acqua verso il fondo è di 0.068 m; mentre per un condotto di 15 m, fondale tipico delle zone colpite da anossia nel Nord Adriatico, il carico necessario è di soli 0.02 m.

### Set-up del laboratorio

#### *Il modello fisico e il canale di prova*

Gli esperimenti sono stati condotti nel canale per la simulazione ondosa dell'Università di Bologna, caratterizzato dalle seguenti dimensioni: 15 m lungo, 0.5 m largo e 0.7 m profondo. La generazione ondosa è affidata a un generatore a pistone verticale, mentre all'altro estremo del canale l'assorbimento passivo è garantito da un dispositivo assorbente.

Tre parti principali vanno a comporre il modello del dispositivo; un galleggiante a forma tronco-conica posizionato in sommità, un disco stabilizzante posizionato al fondo e un condotto che collega i due.

Sono stati costruiti due tipi diversi di modelli in scala 1:16, il primo con il condotto flessibile (F), Fig. 3 sinistra ed il secondo con il condotto rigido (R), Fig. 3 destra. In entrambi i modelli il condotto è lungo 0.30 m e presenta un diametro di 0.05. L'influenza dell'ancoraggio è stata investigata tramite l'utilizzo di due diversi sistemi, il primo è stato realizzato tramite 4 catene (CH) mentre il secondo è stato realizzato tramite due cavi in nylon pretesi (CA), l'effetto della sommergenza del galleggiante è stato analizzato facendo variare l'emersione del coronamento, i livelli provati sono 0.005 m ( $F_1$ ) e 0.008 m ( $F_2$ ).

La misura della velocità dell'acqua all'interno del condotto è fatta tramite un sensore DOP (Doppler profile) installato all'interno del condotto solidamente al galleggiante; mentre una prima

stima del flusso discendente è fatta tramite l'immissione di colorante all'interno del dispositivo. La dinamica del dispositivo nel suo complesso è stata monitorata attraverso un processo di analisi dell'immagine derivante dai video ottenuti dalle prove. I video sono stati registrati con una frequenza di 30 fps.

La procedura di analisi immagine è completamente sviluppata in Matlab, e basa il proprio funzionamento sull'individuazione degli estremi del galleggiante e della superficie libera come mostrato nella Fig. 4. I risultati che scaturiscono da questa analisi sono una serie di punti nel dominio del tempo e dello spazio.

Da questi è stato possibile determinare la traiettoria ellittica del galleggiante attraverso l'interpolazione della nuvola di punti.

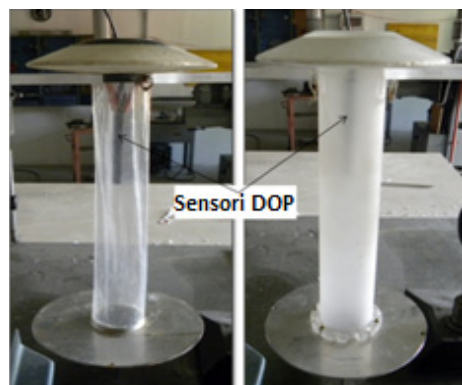


Figura 3 - I modelli del dispositivo, sistemazione del sensore per la misura della velocità dell'acqua (DOP).

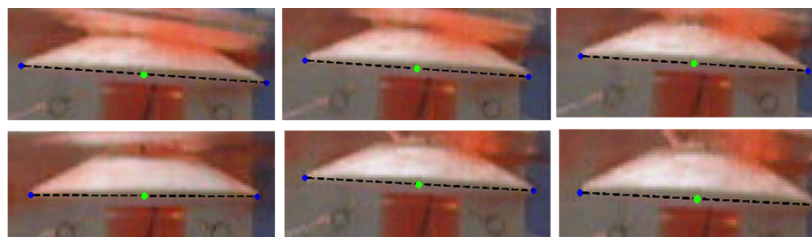


Figura 4 - Esempio di funzionamento della procedura per l'analisi dell'immagine.

### Condizioni ondose provate

Sono state provate quattro onde regolari caratterizzanti il clima ondoso del Nord Adriatico. Le caratteristiche degli stati ondosi sono state scalate in accordo con la legge di Froude tenendo conto di un rapporto pari a 1:16.

Il clima ondoso è stato estratto dai dati forniti dalla boa Nausicaa, posizionata al largo delle coste di Cesenatico ad una profondità di 10 m. Le quattro diverse condizioni ondose sono state identificate basandosi sulla direzione dei venti generanti, calma ( $C_c$ ), onde generate da venti provenienti da terra ( $T_c$ ), onde estreme

(Te) e onde ordinarie generate da venti provenienti sud-est (Sc), Tabella 1.

Il monitoraggio dell'altezza d'onda è stato fatto sia attraverso l'acquisizione tramite tre sonde piezoresistive, che attraverso la procedura di analisi dell'immagine.

Tabella 1 - Condizioni ondose.				
	$H_{s,T}$ (cm)	$T_{m,T}$ (s)	$H_s$ (cm)	$T_m$ (s)
<b>Cc</b>	1.00	0.72	1.08	0.7
<b>Tc</b>	3.00	0.68	1.82	0.7
<b>Te</b>	10.00	1.15	10.20	1.1
<b>Sc</b>	5.00	1.06	5.66	1.0

Le condizioni ondose provate in scala di modello, per quanto riguarda l'altezza d'onda ( $H_s$ ), variano tra 1 e 10 cm, il periodo medio ( $T_m$ ) tra 0.68 e 1.15 sec. Le condizioni ondose generate sono ritenute valide anche se rispetto ai valori target ( $H_s, T, T_m, T$ ) presentano alcune deviazioni.

Il fondale imposto per le prove in asse al modello è di 40 cm.

In totale sono stati provati: due differenti modelli, due differenti sistemi di ancoraggio, due differenti livelli di emersione del galleggiante e quattro differenti casi ondosi costituendo così un insieme di 32 prove.

## Risultati

### Analisi della dinamica del dispositivo

Le figure 5 e 6 mostrano gli spostamenti a cui sono sottoposti i dispositivi. Sulla sinistra sono riportate le serie temporali degli spostamenti verticali, mentre sulla destra sono riportate le traiettorie ellittiche medie per i singoli stati ondosi provati.

L'analisi degli spostamenti dei dispositivi è stata condotta con l'obiettivo di determinare la percentuale di sommersione del galleggiante durante il ciclo ondoso e la sua influenza sul meccanismo di pompaggio.

Come ci si poteva aspettare, la risposta di entrambi i dispositivi (F e R) per i casi ondosi Cc, Tc, e Te presenta la stessa frequenza dell'onda incidente. Viene però osservata, per entrambi i dispositivi, un'eccezione per il caso ondoso Sc. Come è mostrato in Fig. 7, dall'analisi spettrale effettuata sulle serie temporali degli spostamenti, l'andamento degli spostamenti verticali del dispositivo presenta una seconda componente. È possibile identificare due picchi principali: uno corrispondente alla frequenza dell'onda incidente (6.28 rad/sec, i.e.  $T_m=1$  sec) e un secondo correlato all'eccitazione della frequenza naturale del dispositivo (3.14 rad/sec, i.e.  $T_m=2$  sec). La combinazione della frequenza propria e della frequenza del dispositivo è la ragione per cui non è stato possibile identificare una traiettoria ellittica media.

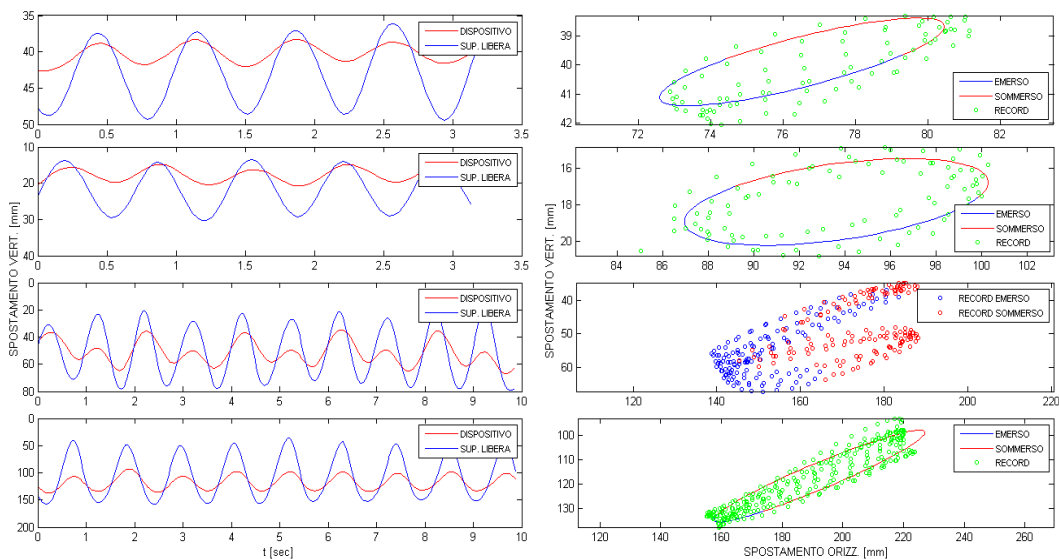


Figura 5 - Risultati delle prove effettuate sul dispositivo rigido: serie temporale degli spostamenti verticali (sinistra), traiettoria ellittica (destra).

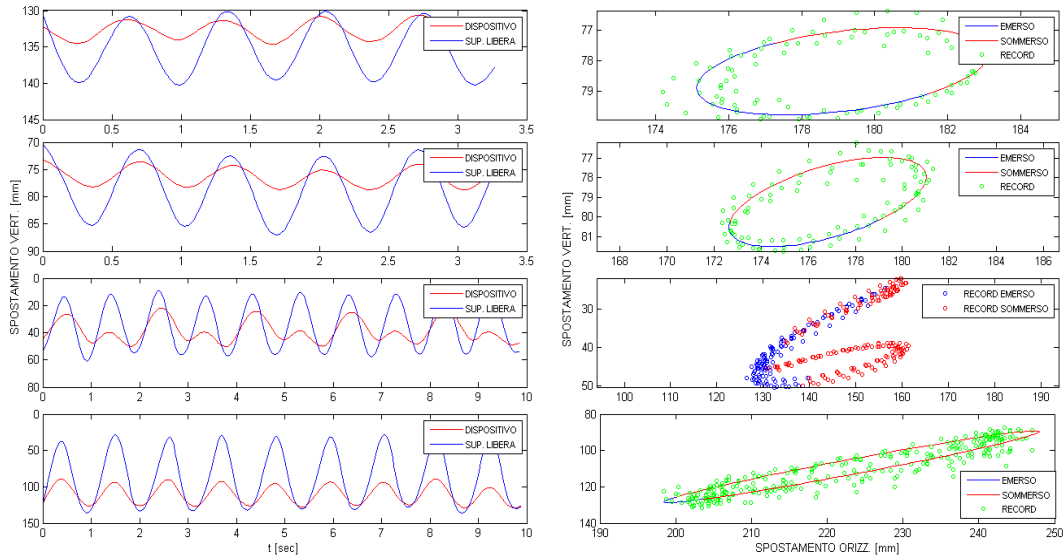


Figura 6 - Risultati delle prove effettuate sul dispositivo flessibile: serie temporale degli spostamenti verticali (sinistra), traiettoria ellittica (destra).

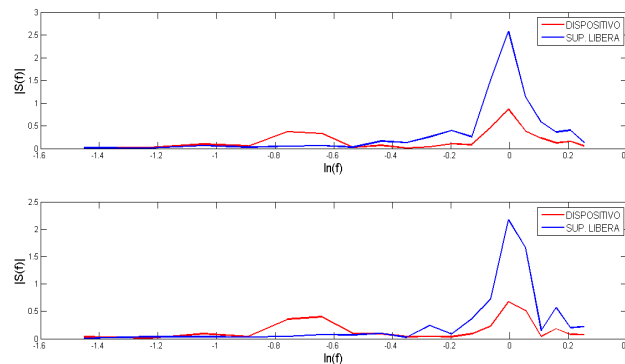


Figura 7 - Analisi spettrale delle serie temporali di spostamento verticale e onda incidente per il caso ondoso Sc, in alto dispositivo rigido, in basso dispositivo flessibile.

### Analisi delle velocità dell'acqua all'interno del condotto

Il sensore DOP installato all'interno del dispositivo è stato posizionato ad una distanza di ca. 15 cm dal coronamento del galleggiante. Da questo livello le misure del profilo di velocità sono state fatte fino ad una distanza di 7.5 cm dalla superficie finale del sensore utilizzando una discretizzazione spaziale di 0.75 cm ed una frequenza di campionamento pari a 52.77 Hz. Le misure così discretizzate hanno permesso il calcolo della velocità media in ogni singolo punto del profilo.

Per gli obiettivi di questo studio si è considerato sufficiente mediare i valori di velocità in un singolo punto di campionamento, quindi i valori mostrati nelle figure 8 e 9 sono la media di 2500 valori campionati ad una distanza dal sensore di 7 cm. L'utilizzo delle celle di misura più distanti dal DOP si è reso necessario per escludere ogni possibile effetto della scia generata dal sensore stesso all'interno del condotto e gli effetti dovuti alla turbolenza generati dalla tracimazione.

Il sensore essendo connesso rigidamente con il galleggiante permette di trascurare la velocità relativa tra la colonna d'acqua e il corpo del galleggiante stesso.

I risultati mostrano diversi comportamenti al variare del tipo di dispositivo e di altezza di coronamento. Le

prove fatte con il caso ondoso Cc, (il meno energetico), mostrano un comportamento altamente sensibile alle condizioni di emersione del galleggiante. Infatti è stato osservato come la prova effettuata con il livello di coronamento più alto non genera alcun volume di tracimazione. Il dispositivo rigido non mostra significative variazioni di velocità al variare dell'emersione del galleggiante, in virtù della sua maggiore massa.

Fig. 8 mostra la relazione tra le velocità dell'acqua e la percentuale di sommersione del galleggiante, rilevando che la condizione ottimale si instaura per un periodo di sommersione pari circa al 25% del ciclo ondoso. Per i valori più alti di sommersione (> del 40 %), corrispondenti ai livelli di agitazione ondosa (Sc e Te) l'acqua non viene più pompata dal basso verso l'alto ma si trova ad essere risucchiata dal basso verso l'alto (velocità negativa) in virtù della depressione che si genera sulla bocca di tracimazione in seguito al passaggio della cresta dell'onda oltre il galleggiante stesso, questo fenomeno non viene mai osservato per i casi ondosi meno intensi.

Nella Fig. 9 si può notare come le velocità più alte che si sono misurate sono relative alle prove fatte con il dispositivo ancorato tramite i cavi. I risultati mettono anche in evidenza come gli spostamenti del galleggiante

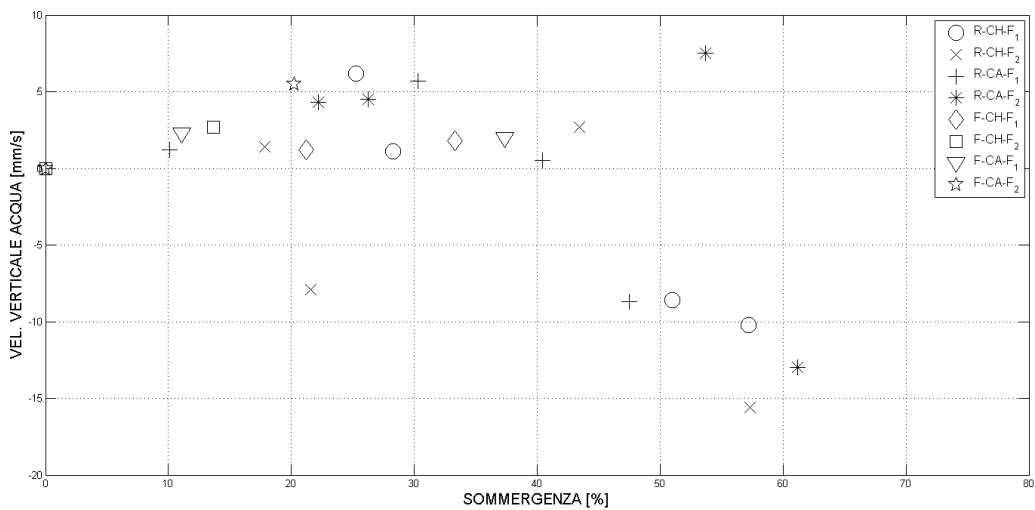


Figura 8 - Velocità media all'interno del dispositivo su percentuale di sommersione.

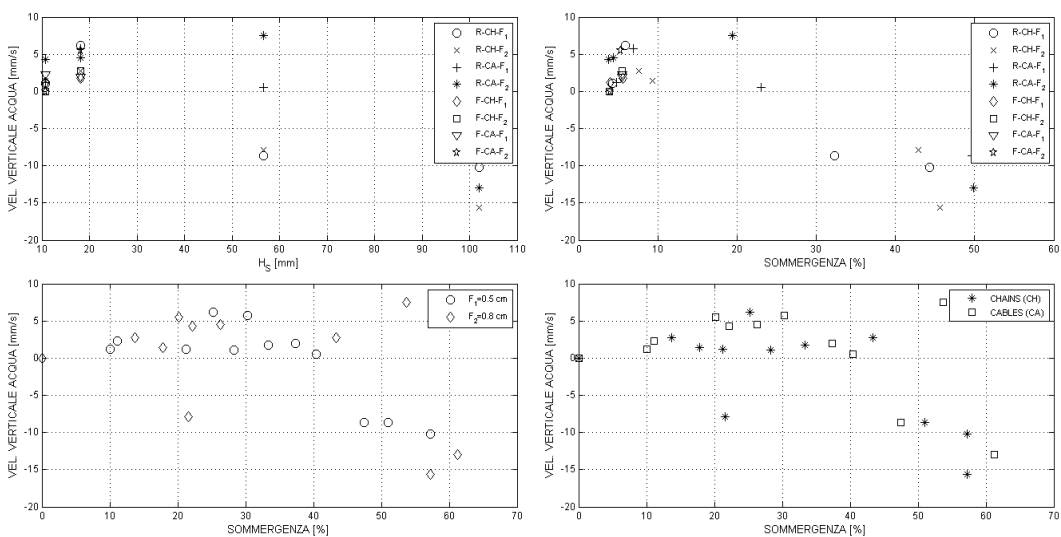


Figura 9 - Velocità media all'interno del dispositivo al variare di vari parametri: altezza d'onda (a), Spostamento verticale (b), livello di emersione del galleggiante (c) e sistema di ancoraggio (d).

siano importanti per il funzionamento del dispositivo, infatti come evidenziato in Fig. 9.b per spostamenti maggiori di 2 cm si hanno solamente velocità negative.

### Conclusioni

Sono state fatte un totale di 32 prove presso il Laboratorio di Idraulica dell'Università di Bologna con l'obiettivo di studiare un dispositivo per l'ossigenazione degli strati marini profondi alimentato da energia ondosa. Sono stati provati vari fattori che possono influenzare il funzionamento del dispositivo, materiale di costruzione del condotto, emersione del galleggiante e tipi di ancoraggi.

I risultati delle velocità dell'acqua all'interno del condotto evidenziano la capacità dei dispositivi di pompare acqua dalla superficie, ricca di ossigeno, al fondo dove solitamente l'ossigeno è richiesto per l'ossidazione della materia organica.

Le analisi fatte sulle velocità dell'acqua che si instaurano all'interno del condotto mostrano come i dispositivi funzionino in modi diversi al variare del grado di sommergenza e conseguentemente al variare dell'altezza d'onda incidente.

Per bassi valori di sommergenza il dispositivo si comporta come un classico dispositivo a tracimazione, cioè, la cresta dell'onda percorre la rampa del galleggiante e ricade all'interno del tubo dove viene accumulata fino a che l'accumulo non è sufficiente a spostare l'intera colonna d'acqua. All'aumentare della sommergenza e quindi dell'altezza d'onda il dispositivo non funziona più per tracimazione, ma in virtù dello sfasamento che si instaura tra la superficie libera e il moto del galleggiante. In questo caso il galleggiante non ha più la funzione di far tracimare l'onda ma quella di catturare quanta più acqua possibile nel momento della fuoruscita della bocca tracimante dal corpo dell'onda, in modo da generare un battente sufficiente a spingere verso il basso la colonna d'acqua.

Con l'ulteriore crescere dell'altezza d'onda il dispositivo non pompa più acqua verso il basso ma aspira dal fondo in seguito alla depressione che si genera sulla bocca tracimante dovuta alla curvatura della cresta dell'onda che oltrepassa il galleggiante.

In merito agli spostamenti si può osservare che il dispositivo è fortemente dipendente dal tipo di ancoraggi installati, valori più grandi di spostamenti verticali sono osservati in concomitanza dei cavi pretesi mentre valori più rilevanti di spostamenti orizzontali sono osservati durante le prove effettuate con i dispositivi ancorati con le catene. Si può inoltre asserire che gli spostamenti, nella loro forma più completa (verticali più orizzontali), influenzano negativamente la capacità di pompare acqua verso il fondo come già osservato in Margheritini 2011.

I due tipi di modelli provati presentano un comportamento diverso al variare della quota di coronamento, il modello flessibile è fortemente influenzato dal livello di emersione, come si nota nelle prove fatte sotto l'azione ondosa Cc; mentre il modello rigido è pressoché insensibile alle variazioni di quota di coronamento provate nel presente studio.

### Bibliografia

- Artegiani, A., Bregant, D., Paschini, E., Pinardi, N., Raicich, F., Russo, F. 1996. The Adriatic Sea General Circulation. Part I: Air–Sea Interactions and Water Mass Structure, *Journal of Physical Oceanography*, 27, pp. 1492-1514.
- Artegiani, A., Bregant, D., Paschini, E., Pinardi, N., Raicich, F., Russo, F. 1996. The Adriatic Sea General Circulation. Part II: Baroclinic Circulation Structure, *Journal of Physical Oceanography*, 27, 1515-1532.
- Cattani, O., Vitali, G., 1995. Effetti degli adattamenti biochimici alla carenza di ossigeno degli organismi marini sulle comunità bentoniche di aree eutrofizzate. Il caso dell'Adriatico nord occidentale. Regione Emilia Romagna (Ed.), *Proceedings of the Conference on "Evoluzione dello stato trofico in Adriatico: analisi degli interventi attuati e future linee di intervento"*. Regione Emilia Romagna, Bologna, pp. 101-112
- Degobbi, D. 1989. Increased eutrophication of the Northern Adriatic Sea. Second Act. *Marine Pollution Bulletin*, 20, pp. 452-457.
- Degobbi, D., Fonda-Umani, S., Franco, P., Malej, A., Precali, R., Smodlaka, N., 1995. Changes in the Northern Adriatic ecosystem and appearance of hypertrophic gelatinous aggregates. *The Science of the Total Environment* 165, pp. 43-58.
- Diaz, R., Solow, A., 1999. Ecological and economic consequences of hypoxia. Topic2 Report for the inte-

- grated assessment on hypoxia in the Gulf of Mexico, *US department of commerce, national oceanic and atmospheric administration*.
- Diaz, R. 2001. Overview of Hypoxia around the World. *Journal of Environmental Quality*, 30, pp.275-281.
- European Environmental Agency, 1994. European rivers and lakes. *Environmental Monographs 1*, Copenhagen.
- Fofonof, N. P., and R. C. Millard, 1983. Algorithms for computations of fundamental properties of seawater. *Unesco Technical Papers in Marine Science* No. 44,53pp
- Giordani, P., Hammond, D.E., Berelson, W.M., Montanari, G., Poletti, R., Milandri, A., Frignani, M., Langone, L., Ravaioli, M., Rovatti, G., Rabbi, E., 1992. Benthic fluxes and nutrient budget for sediments in the Northern Adriatic Sea: burial and recycling efficiencies. In: Vollenweider, R.A., Marchetti, R., Viviani, R. (Eds.), *Marine Coastal Eutrophication*. Elsevier, Amsterdam, pp. 25-275.
- Margheritini, L., Claeson, L., 2011. An innovative way of utilizing wave energy to counteract eutrophication and hypoxia. *Proceedings of the 9th European Wave and Tidal Conference, Southampton, EWTEC 2011*.
- Smayda, T., 1990. Novel and nuisance phytoplankton blooms in the sea: evidence for a global epidemic. In: Graneli, E., Sunström, B., Edler, L., Anderson, D.A. (Eds.), *Toxic Marine Phytoplankton*. Elsevier, New York, pp. 29-40.
- Viviani, R., 1992. Eutrophication, marine biotoxins, human health. In: Vollenweider, R.A., Marchetti, R., Viviani, R. (Eds.), *Marine Coastal Eutrophication*. Elsevier, Amsterdam, pp. 631-662.
- Vollenweider, R.A., Rinaldi, A., Montanari, G., 1992. Eutrophication, structure and dynamics of a marine coastal system: results of a ten years monitoring along the Emilia-Romagna coast (Northwest Adriatic Sea). In: Vollenweider, R.A., Marchetti, R., Viviani, R. (Eds.), *Marine Coastal Eutrophication*. Elsevier, Amsterdam, pp. 63-106.
- Zavatarelli, M., Raicich, F., Bregant, D., Russo, A., Artegiani, A. 1998. Climatological biogeochemical characteristics of the Adriatic Sea. *Journal of Marine Systems*, 18, pp. 227-263.