

# Erosione al piede delle strutture di banchina prodotta dai propulsori navali

Antonio Francone, A. Mujal e X. Gironella

Laboratorio di Ingegneria Marittima, Università Politecnica Catalogna (LIM/UPC), Barcellona [ES]  
francone.antonio@gmail.com

## Riassunto

Il presente studio riguarda il fenomeno dell'erosione provocato dalle manovre di attracco e disormeggio delle navi all'interno delle aree portuali. Lo studio si riferisce ad un modello in cui una coppia di eliche, in assenza di timone, poste a una distanza fissa di sicurezza rispetto al fondo ruotano con tre diverse velocità. I risultati sperimentali sono stati comparati con le relazioni teoriche disponibili in letteratura sulla velocità di efflusso. Le equazioni teoriche sovrastimano i risultati sperimentali.

**Parole chiave:** erosione, propulsori, eliche, protezione, fondali, portuali, banchine.

## Introduzione

Il veloce progresso del trasporto marittimo degli ultimi 20 anni ha indotto una crescita delle dimensioni delle navi e un conseguente aumento della potenza propulsiva. Tale aumento ha favorito una frequente e ripetuta azione erosiva da parte delle correnti generate dai propulsori in prossimità delle strutture portuali d'attracco e la relativa comparsa di fenomeni erosivi al piede di tali strutture, causando ingenti danni o, addirittura, il collasso delle stesse. L'erosione al piede delle strutture di banchina è un fenomeno descrivibile dal sistema di forze provocate dalle correnti di acqua che mettono in movimento le particelle del fondale portuario in prossimità delle strutture di attracco. Tale erosione si ripercuote sulla struttura compromettendone la stabilità. La stessa si produce quando la velocità dell'acqua nei pressi del fondo ( $V_b$ ) supera un valore critico chiamato velocità critica ( $V_c$ ). A partire da questa velocità avviene il movimento del materiale al fondo che provoca l'erosione del terreno e il conseguente accumulo (sedimentazione) che, talvolta, provoca blocchi operativi al regolare traffico navi. Le equazioni attualmente disponibili in letteratura, che permettono di calcolare l'erosione provocata dai sistemi propulsivi, sono basate su ipotesi teoriche lontane dalla realtà. Inoltre, gli studi sperimentali ad oggi effettuati sono stati svolti considerando la presenza di una sola elica come sistema propulsivo.

La velocità di efflusso è il primo parametro necessario per analizzare l'erosione del fondale, tuttavia, non esistono formulazioni per il calcolo della velocità di efflusso nel caso di doppia elica.

Dalla presente sperimentazione si otterranno valori di velocità prodotti da un sistema propulsivo principale composto da due eliche, in assenza di timone e in stato non confinato. I risultati saranno comparati con le formulazioni teoriche sviluppate nel corso degli ultimi 50 anni.

## Metodologia

### Setup sperimentale

Gli esperimenti sono stati realizzati in un impianto situato presso il Laboratorio di Ingegneria Marittima (LIM) dell'Università Politecnica della Catalogna (UPC-BarcelonaTech). La BassA, (Figura 1), è una vasca in calcestruzzo di forma rettangolare delle dimensioni di  $12.5 \times 4.6 \times 2.5 \text{ m}^3$  con tre finestre laterali per monitorare gli esperimenti. A una estremità della vasca sono presenti due eliche con diametro  $D_p = 25.4 \text{ cm}$  installate a una distanza dal fondo pari ad  $H_p = 26 \text{ cm}$  (Figura 2).

Sono stati misurati i campi di velocità per tre diverse velocità di rotazione ( $n=300,350,400 \text{ rpm}$ ) utilizzando 5 ADV (Acoustic Doppler Velocimetry) installati su un supporto mobile situato in diverse posizioni in modo tale da rilevare il campo di velocità lungo i tre assi. La Tabella 1 mostra i punti in cui sono state effettuate le rilevazioni delle velocità lungo le tre coordinate assumendo come centro di riferimento l'asse di simmetria al fondo della LaBassA.

I propulsori sono orientati verso il fondo della vasca al fine di studiare il campo di velocità in condizioni non confinate.

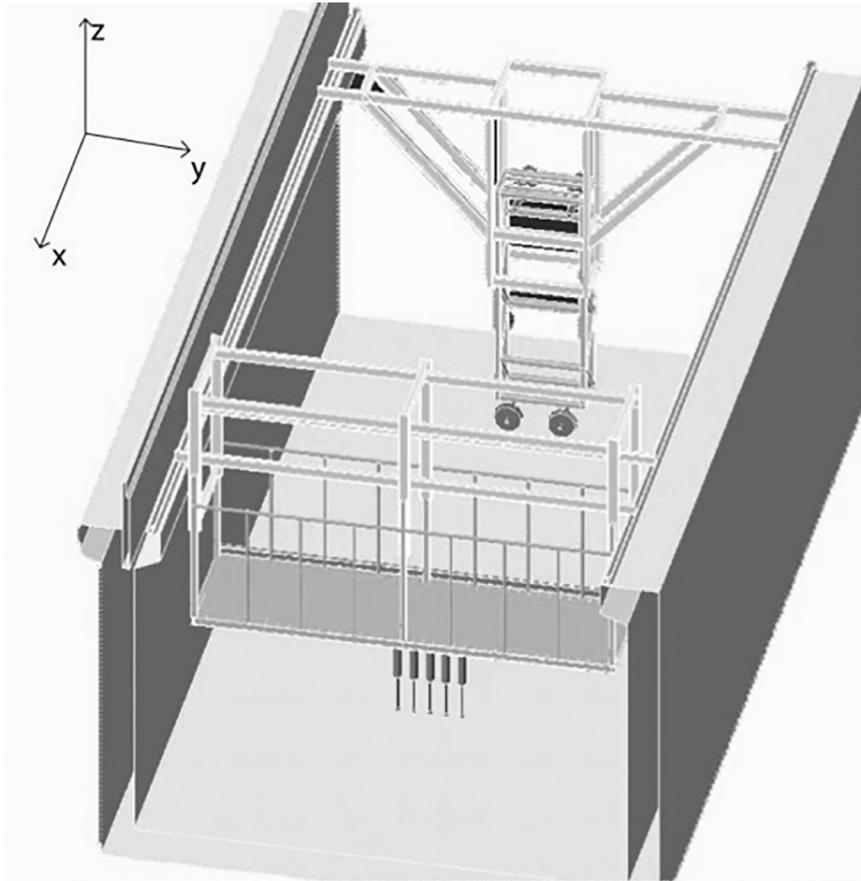


Figura 1. Setup Sperimentale Vasca LaBassA.

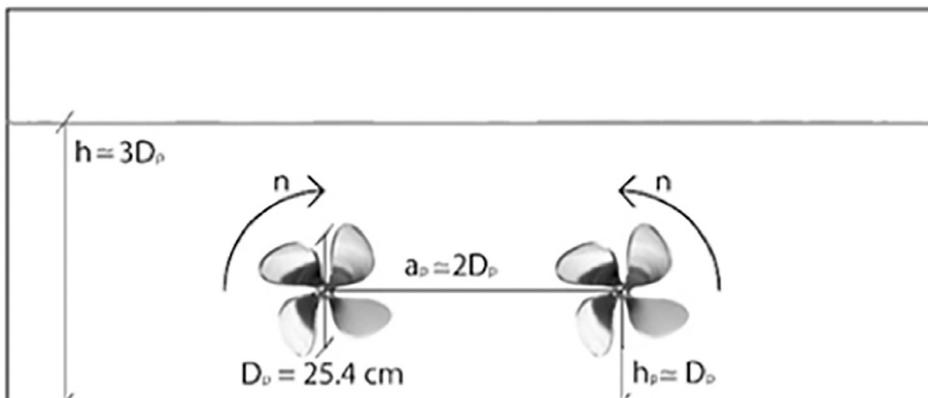


Figura 2. Setup Eliche.

**Tabella 1. Scenario e punti di misura.**

Rivoluzioni per minuto (RPM)	$x/D_p$	$y/D_p$	$z/h_p$
300	2,5	0	0.2
350	5	$\pm 0.6$	0.5
400	7,5	$\pm 1.2$	1
	10	$\pm 1.7$	1.4
	15	$\pm 2.3$	

La Figura 2 mostra il setup del sistema propulsivo con l'indicazione delle principali distanze utilizzate durante le prove. Il sistema rotante adottato è di tipo simmetrico con l'elica destra che ruota in senso antiorario e l'elica sinistra in senso orario, alla stessa velocità. Gli errori nelle velocità di rotazione sono dell'ordine del 10%, con una piccola differenza del 3% tra le velocità di rotazione di un'elica rispetto all'altra: l'elica di destra ruota più velocemente rispetto a quella di sinistra.

**Aspetti Teorici**

Il confronto dei risultati ottenuti dal modello fisico con le formule teoriche è stato effettuato utilizzando come documento di riferimento quello del PIANC (2015), oltre alle formule teoriche sviluppate da diversi autori nel corso del secolo scorso (Hamill e Johnston, 1993).

La velocità di efflusso è definita come la velocità media assiale all'uscita del sistema propulsivo in assenza di timone e in condizioni non confinate. Questa velocità è definita per la zona iniziale di stabilizzazione del flusso a una distanza di  $x \approx 2,5D_p$ .

La velocità teorica di efflusso per propulsori liberi è calcolabile con l'equazione (1):

$$V_o = C \left( \frac{f_p P_d}{\rho_w \cdot D_p^2} \right)^{1/3} \text{ [m/s]} \tag{1}$$

Dove:

$f_p$  = percentuale di utilizzo dei motori,  $f_p = 5 - 15\%$ ;

$P_d$  = potenza [kW];

$D_p$  = diametro dell'elica [m];

$\rho_w$  = densità dell'acqua  $\left[ \frac{t}{m^3} \right]$ .

Altri autori utilizzano l'equazione (2), con la costante C che varia a seconda dell'autore. Tuttavia tale equazione richiede la conoscenza di un coefficiente di spinta  $K_T$ , di difficile determinazione.

$$V_o = C \cdot n \cdot D_p \cdot \sqrt{K_T} \text{ [m/s]} \tag{2}$$

Dove:

$n$  = n° giri al secondo dell'elica;

$D_p$  = diametro dell'elica [m]

$K_T$  = coefficiente di spinta dell'elica.

La velocità assiale tra le eliche lungo la direzione del flusso è descritta da Albertson (1950) che propone l'equazione (3):

$$V_{axis}(x) = AV_o \left( \frac{D_p}{x} \right)^a \text{ [m/s]} \tag{3}$$

Dove  $A=6.17$  e  $a=1$ .

Gli altri metodi, come il German method e il Dutch method, usano la stessa equazione (3) con differenti coefficienti, espressi in Tabella 2. Entrambi i metodi sono utilizzati per singole eliche, in stato non confinato e in assenza di timone. Tuttavia, il German method propone un'equazione anche per il caso di sistema propulsivo con doppia elica.

**Tabella 2. Coefficienti dell'Equazione (3) secondo i diversi metodi**

Metodo	A	a
Albertson (1950)	6.17	1
German	0.9	0.25
Dutch	1.95	1

La velocità al fondo, da cui dipende il potenziale erosivo prodotto dai propulsori principali, è funzione della velocità di efflusso. Il German method per doppia elica senza timone, è applicabile solo quando la distanza tra l'asse dei propulsori e il fondo  $h_p$  è compresa tra 1 e 3 volte il diametro dell'elica:

$$V_{b,max} = 0.52V_0 \left(\frac{D_p}{h_p}\right)^{0.275} \quad 0.9 < \frac{h_p}{D_p} < 3 \quad (4)$$

Il Dutch method, assumendo l'ipotesi di sovrapposizione lineare delle velocità di flusso, può essere utilizzato per il caso di doppia elica solo se il rapporto tra la distanza tra l'asse delle eliche e il fondo  $h_p$  e la distanza tra le singole eliche  $a_p$  è inferiore a 0,5:

$$V_{b,max} = 2 \frac{h_p}{r_p} V_{b,max,single} \quad 0.3 < \frac{h_p}{a_p} < 0.5$$

$$V_{b,max,single} = 0.216V_0 \frac{D_p}{h_p} \quad (5)$$

Dove:

$$r_p = \sqrt{h_p^2 + \left(\frac{a_p}{2}\right)^2}$$

Supponendo una sovrapposizione quadratica dei due getti, ed  $h_p/a_p < 0.5$  :

$$V_{b,max} = V_{b,max,single} \sqrt{2} \quad (6)$$

Con:

$$V_{b,max,single} = 0.42V_0 \frac{D_p}{h_p} \quad \text{[German method]}$$

$$V_{b,max,single} = 0.216V_0 \frac{D_p}{h_p} \quad \text{[Dutch method]}$$

**Risultati**

La distribuzione della velocità dell'acqua prodotta dalla rotazione delle eliche è stata analizzata lungo le tre componenti. La Figura 3 mostra la componente assiale della velocità nei piani paralleli a quello contenente le eliche. In particolare, per  $x=2.5 D_p$  i due getti sono chiaramente visibili. Per  $x$  compreso tra  $5 D_p$  e  $7.5 D_p$  è evidente come il getto sia diretto verso il fondo della LaBassA. Per  $x= 15 D_p$  il getto prodotto dalle eliche è chiaramente trascurabile.

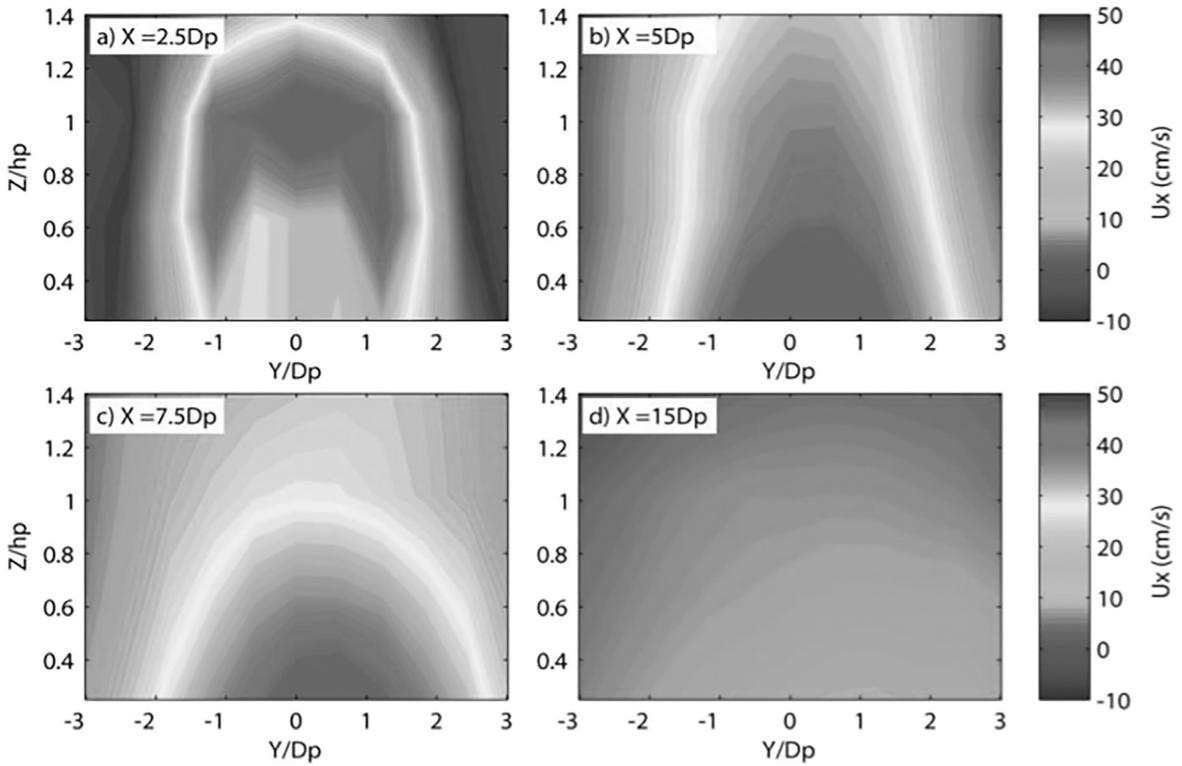


Figura 3. Velocità Assiali  $U_x$  nei piani paralleli a quello contenente le eliche per  $n = 400\text{rpm}$ .

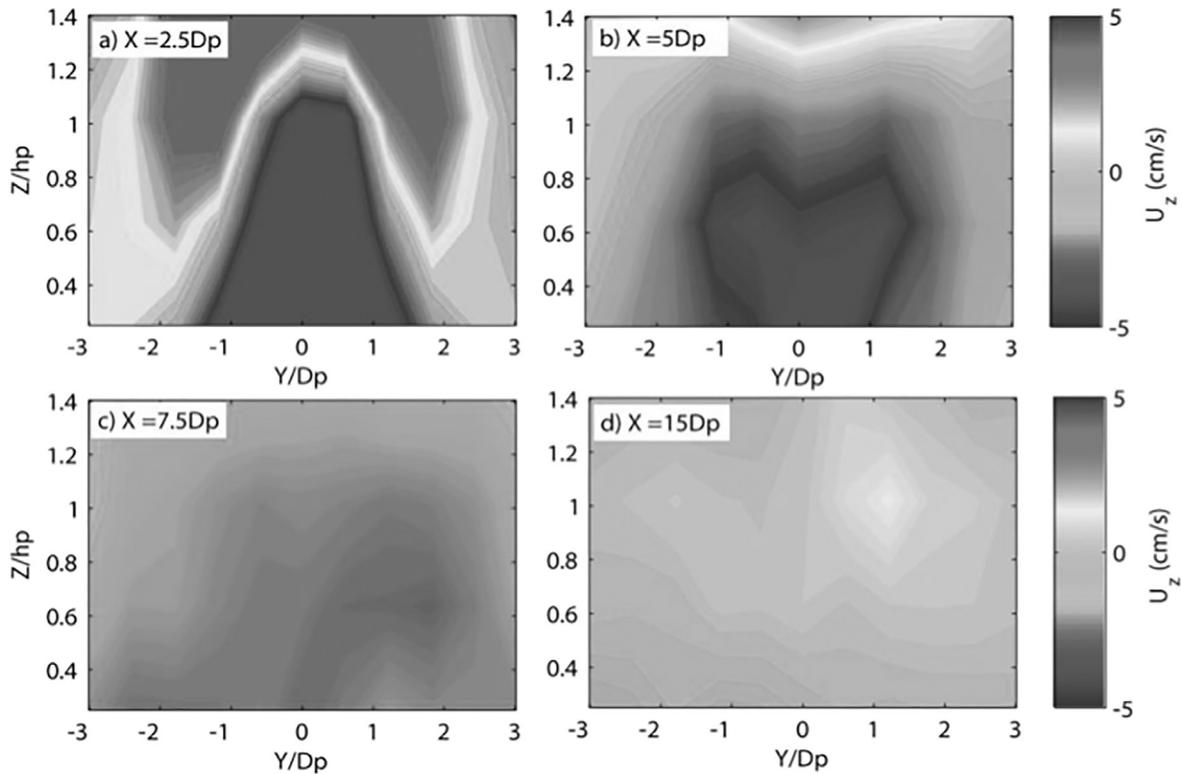


Figura 4. Velocità Verticali,  $U_z$ , nei piani paralleli a quello contenente le eliche per  $n = 400\text{rpm}$ .

Le velocità assiali ottenute al centro di simmetria sono superiori alle velocità assiali ottenute al centro delle eliche come mostrato in Figura 5. Pertanto il confronto con i risultati teorici descritti nella sezione precedente, sarà effettuato soltanto con le velocità assiali al centro di simmetria.

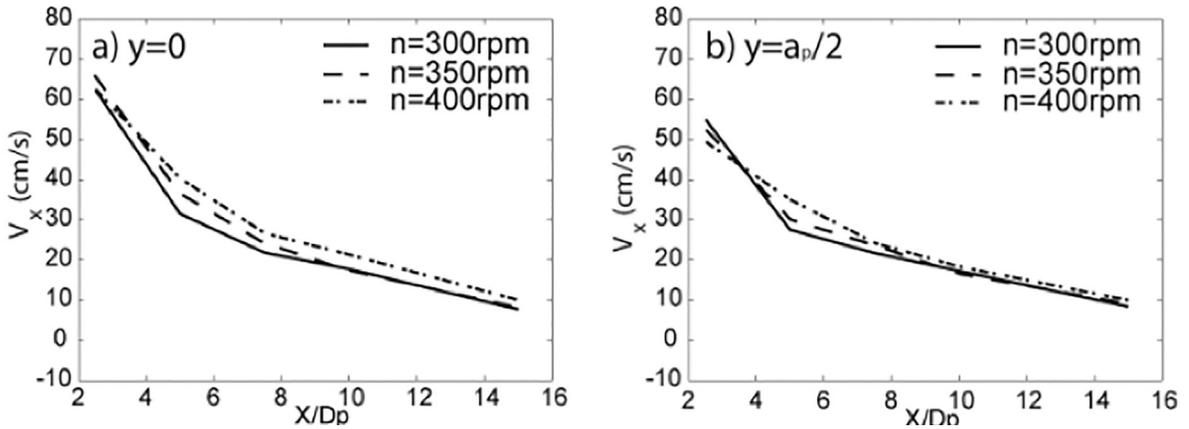


Figura 5. Velocità Assiale, a) Asse coincidente con il centro di simmetria  $y = 0$  ; b) Asse localizzato al centro dell’elica destra  $y = a_p/2$ .

Facendo il confronto tra i massimi valori ottenuti nel piano di stabilizzazione del flusso (Tabella 3), i risultati sperimentali ottenuti non cambiano al variare della velocità delle eliche. Inoltre, nello scenario a 350 rpm il valore della velocità di efflusso è più alto rispetto alla velocità di efflusso nello scenario con 400 rpm.

Tabella 3. Comparazione tra valori teorici e sperimentali della velocità di efflusso

$V_0$ (m/s)	N=300 rpm	N=350 rpm	N=400 rpm
<b>Theoretical (Eq.1)</b>	1.04	1.20	1.34
<b>Experimental</b>	0.62	0.66	0.62

Osservando la velocità assiale lungo l’asse x in Figura 6 e confrontando i risultati sperimentali, indicati con una linea nera, con le relazioni teoriche, eq. (3) e Tabella 2, possiamo dedurre che tutte le espressioni teoriche sovrastimano la velocità ottenuta durante la sperimentazione. La velocità assiale indicata in Figura 6 è quella rilevata in corrispondenza dell’asse di simmetria della LaBassA e, in particolare, nel punto medio tra i propulsori. Se la velocità assiale lungo l’asse x fosse quella al centro dei propulsori, la sovrastima sarebbe maggiore.

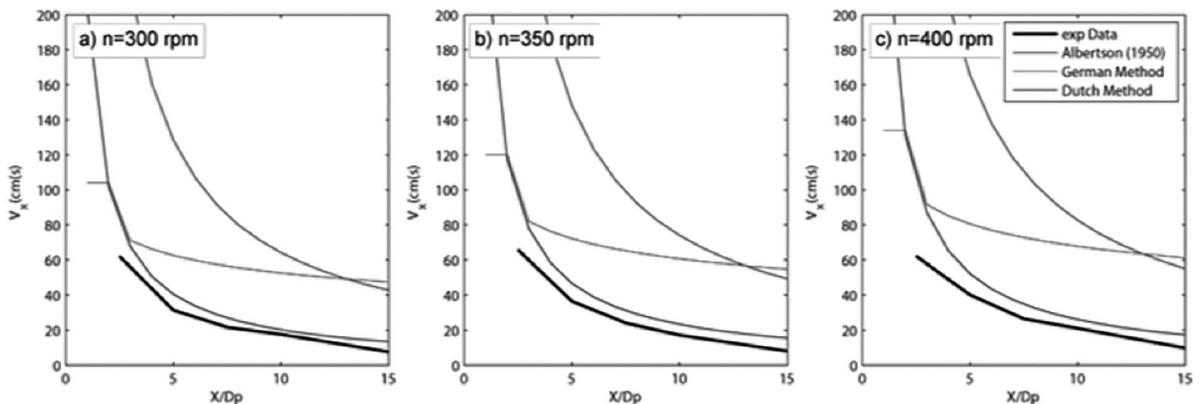


Figura 6. Confronto tra i valori teorici e sperimentali della velocità assiale lungo l’asse di simmetria.

Infine, la velocità massima al fondo ottenuta sperimentalmente risulta essere comparabile con le formulazioni teoriche disponibili in letteratura. È importante ricordare che le formulazioni teoriche a cui si fa riferimento nel presente documento tengono conto della presenza della doppia elica. Le velocità massime al fondo sono mostrate in Figura 7 e in questo caso il German method sembra predire al meglio la massima velocità. In contrasto con la teoria del PIANC (2015) l'approssimazione quadratica, usando il German method, sovrastima la velocità massima al fondo. Le sovrapposizioni dei getti, quando viene utilizzato il Dutch method, sottostimano i risultati sperimentali. I risultati mostrati in Figura 7 sono coerenti con i risultati ottenuti per le velocità assiali perché il German method dà sempre valori maggiori rispetto al Dutch method.

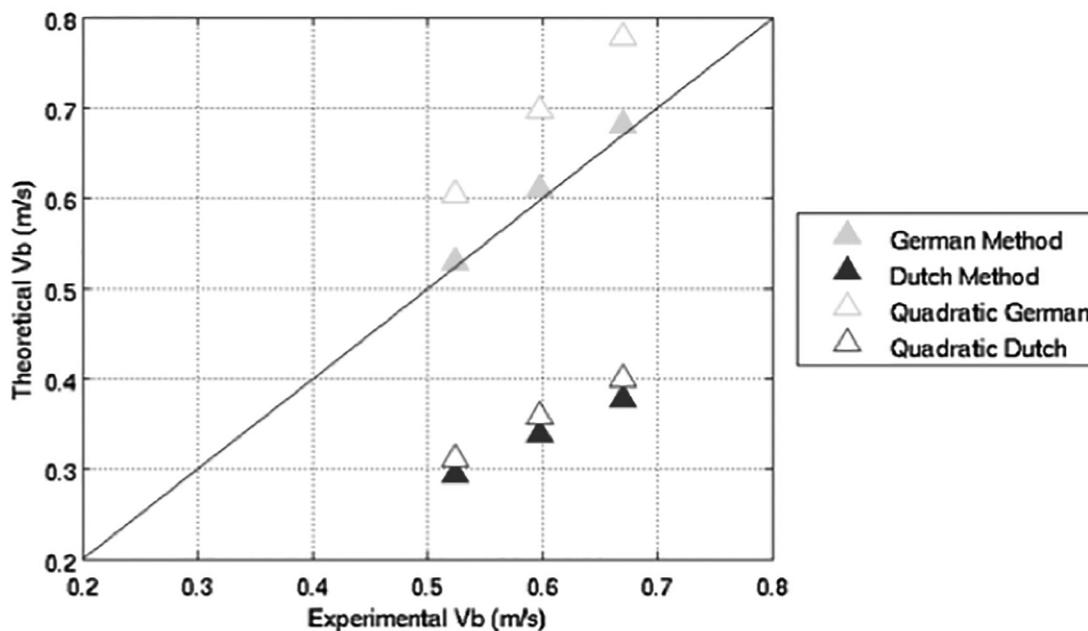


Figura 7. Confronto tra i valori teorici e sperimentali della massima velocità al fondo,  $V_{b,max}$

Gli esperimenti visti in questo studio sono ancora in fase di analisi. Ulteriori scenari saranno studiati con diversi setup di prova e aggiungendo sedimenti al fondo della vasca LaBassA che permetteranno di studiare e rilevare l'erosione prodotta dal sistema propulsivo.

## Conclusioni

La presente campagna sperimentale ha mirato allo studio degli effetti provocati dai sistemi propulsivi composti da doppia elica, in assenza di timone e in condizioni non confinate. Sono stati effettuati gli esperimenti con tre diverse velocità di rotazione delle eliche e una distanza fissa di sicurezza del sistema propulsivo rispetto al fondo. Il rilievo del campo di velocità dell'acqua è stato studiato utilizzando degli ADV installati in diversi punti della vasca LaBassA. I risultati sperimentali, in relazione alla teoria finora pubblicata, dimostrano che:

- la velocità di efflusso ottenuta durante gli esperimenti è chiaramente inferiore rispetto ai risultati teorici previsti;
- le formule proposte in letteratura per il calcolo della velocità assiale sovrastimano i risultati sperimentali;
- il Dutch method per le velocità assiali può essere utilizzato nel caso di doppia elica anche se sovrastima leggermente i risultati sperimentali;
- la velocità massima al fondo è sottostimata quando viene utilizzato il Dutch method indipendentemente dal metodo di sovrapposizione utilizzato;
- il German method, per doppia elica per il calcolo della velocità massima al fondo, è quello che più si adatta agli esperimenti oggetti di studio;
- la sovrapposizione quadratica dei getti multipli, se si utilizza il German method per singolo getto, sovrastima la velocità massima al fondo.

**Riconoscimenti**

Questo lavoro è stato sostenuto da MINECO (Ministero dell'Economia e la Competitività), da FEDER (Unione Europea- Fondo Europeo di Sviluppo Regionale “Una Manera de hacer Europa”) e dal Governo Spagnolo attraverso il progetto BIA2012-38676-C03-01.

**Bibliografia**

- Albertson M.L., Dai Y.B., Jensen R.A., Hunter Rouse (1950) - *Diffusion of submerged jets*. ASCE Transactions Paper no. 2409, New York, pp. 639-664.
- Bergh H. & Magnusson N. (1987) - *Propeller erosion and protection methods used in ferry terminals in the port of Stockholm*. PIANC, 58: 112-120
- Hamill G. A. (1988) - *The scouring action of the propeller jet produced by a slowly maneuvering ship*. PIANC, 62: 85 - 110.
- Hamill G. A., Mcgarvey J. A. & Hughes D. A. B. (2010) - *Determination of the efflux velocity from a ship 's propeller*. Proceedings of the ICE - Maritime Engineering (June 2004), :83–91.
- Hamill G. & Johnston H. T. (1993) - *The decay of maximum velocity within the initial stages of a propeller wash*. Journal of Hydraulic Research, 31(5): 605-613.
- Johnston H. T., Hamill G., Wilson P. R. & Ryan D. (2013) - *Influence of a boundary on the development of a propeller wash*. Ocean Engineering, 61: 50– 55. <http://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2012.12.033>.
- PIANC. (2015) - *Report n° 180 - 2015 Guidelines for protecting berthing structures from scour caused by ships*.
- Stewart, D. P. J. (1992). *Characteristics of a ship's screw wash and the influence of quay wall proximity*. Tesi di laurea. Queen's University of Belfast.