



UNIONE EUROPEA
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale




CTN01_00176_163601



TRIM

Tecnologia e Ricerca Industriale per la Mobilità Marina

Sistemi di insufflaggio per air lubrication al fine della riduzione della resistenza viscosa delle carene navali

Sotto-Progetto	Efficienza	
Obiettivo Realizzativo	Test sperimentali per flusso in un canale in presenza di macrobolle e su forma semplice	
Descrizione attività	Definizione del sistema di insufflaggio iniziale	
Tipo di documento	Rapporto Tecnico	
Codice del documento	SP.4-OR.2-D.1	
Data di emissione	15/11/2021	
Redazione	Massimo Miozzi	 ISTITUTO DI INGEGNERIA DEL MARE INSTITUTE OF MARINE ENGINEERING





Titolo documento **Sistemi di insufflaggio per air lubrication al fine
della riduzione della resistenza viscosa delle
carene navali**

Codice documento SP.4-OR.2-D.1

Distribuzione Pubblico

Rev.	Data	Pagine	Redazione	Approvato da
0	15/11/2021	2+15	Massimo Miozzi	Mario Felli

L'attività descritta nella presente pubblicazione è stata finanziata dal Progetto TRIM — Tecnologia e Ricerca Industriale per la Mobilità Marina — coordinato dal Consiglio Nazionale delle Ricerche e promosso dal Ministero dell'Università e della Ricerca nell'ambito dell'iniziativa dei Cluster Tecnologici Nazionali.



Indice

Sommario	2
1 Introduzione	3
2 Generalità sulle microbolle	4
3 Metodi di generazione delle micro bolle	5
4 Tecnologie di insufflaggio adottate dai più innovativi sistemi di Air Lubrication	7
4.1 MALS – Mitsubishi Air Lubrication System	7
4.2 Foreship [®] Air Lubrication System (ALS)	9
4.3 WAIP – Winged Air Induction Pipe	10
4.4 Silverstream [®] Air Lubrication System	11
4.5 Samsung Heavy Industries <i>Saver Air</i>	13
Riferimenti bibliografici	14



Sommario

Questo rapporto descrive lo stato dell'arte sui sistemi di insufflaggio d'aria al fine della generazione di bolle, adottati dai sistemi commerciali maggiormente affermati, per ottenere la riduzione della resistenza all'avanzamento della nave in qualunque condizione meteomarina.

Una prima bozza del rapporto è stata redatta presso l'Università di Trieste nell'anno accademico 2011/2012 sotto la guida del relatore universitario Prof. Igor Zotti e del Referente Fincantieri Ing. Gianpiero Lavini. La redazione finale è a cura dell'Ing. Massimo Miozzi.

1 Introduzione

La tecnica dell'insufflaggio di bolle sotto la chiglia di una nave, nota come *air lubrication*, si è negli ultimi anni affermata come strumento per la riduzione della resistenza viscosa all'avanzamento della nave stessa, in grado di svolgere una azione di supporto per la riduzione dei volumi di carburante utilizzati e una conseguente riduzione delle emissioni di CO₂ (si rimanda a Miozzi [1] per gli approfondimenti). Gli studi sperimentali condotti hanno evidenziato come sia possibile ottenere guadagni, in termini di riduzione della resistenza viscosa, di entità variabile in funzione di diversi fattori, tra cui le dimensioni delle bolle. Da questo punto di vista si sono sviluppate due differenti scuole di pensiero: la prima, che fa riferimento più direttamente all'*air lubrication* e alla sua applicazione in campo navale, sostiene che utilizzando bolle di diametro ridotto sia possibile ottenere una riduzione della resistenza più elevata, sia per le caratteristiche della bolla singola (elevata tensione superficiale e bassa galleggiabilità) sia per le caratteristiche del bubble layer, in grado di svilupparsi per tutta la lunghezza della nave; la seconda associa la riduzione di resistenza ottimale alla presenza di bolle *deformabili*, quindi di dimensioni superiori a qualche millimetro [2]. Questi ultimi studi fanno riferimento a una serie di esperimenti effettuati su un flusso di Taylor-Couette (un cilindro che ruota all'interno di un alloggiamento cilindrico coassiale, riempito di una miscela di aria e acqua) per il quale è possibile misurare esattamente la variazione del momento torcente necessario a ruotare il cilindro interno, al variare della frazione di vuoto nel liquido interposto tra i due.

È interessante notare come, da un punto di vista sperimentale, entrambi gli approcci presentino delle lacune nell'approfondimento di ciò che accade sulla scala della singola bolla, mentre dispongano di risultati estesi su una scala globale. Nell'ambito del presente *Obiettivo Realizzativo* è stato pianificato uno studio sperimentale per tentare di approfondire questo aspetto per quello che riguarda le bolle deformabili, mediante la misura delle caratteristiche del flusso e della dinamica delle bolle in uno strato limite turbolento associato a un getto di parete [3].

In questa sede, vengono invece esposti i dati sullo stato dell'arte per i dispositivi di insufflaggio di bolle adottati dai sistemi di air lubrication installati dal settore navale.

2 Generalità sulle microbolle

Nel campo navale sono stati pubblicati, negli ultimi anni, molti studi su bolle di ridotte dimensioni (diametro inferiore ai $50 \mu\text{m}$), chiamate in diversi modi: “micro bolle”, “nano bolle”, o “micro-nano-bolle”. Uno dei vantaggi associabili alle micro bolle consiste nel fatto che la loro galleggiabilità è proporzionale al volume d’aria contenuto in esse; bolle più piccole hanno una galleggiabilità minore. Per questo le micro bolle hanno una galleggiabilità minima e sono in grado di “sopravvivere” sott’acqua per un tempo maggiore rispetto a bolle più grandi. La spinta al galleggiamento, infatti, è:

$$F = \rho g V \quad (1)$$

dove ρ è la densità del fluido, g è l’accelerazione di gravità e V è il volume della bolla.

Un altro vantaggio è la miglior reattività, cioè una maggiore area di contatto tra l’aria e il liquido: quando 1 mm^2 d’acqua è riempito con micro bolle (di $1 \mu\text{m}$ di diametro), l’area di contatto è mille volte più grande di quanto non avvenga in 1 mm^2 riempito, ora, di bolle normali (di 1 mm di diametro). L’aumento dell’area di contatto accresce di molto l’attività aerobica dei batteri nel liquido e l’efficienza delle reazioni chimiche tra il gas soffiato e ciò che si trova all’interno del liquido.

Un ulteriore vantaggio che risulta dall’applicazione delle micro bolle riguarda la loro minore tensione superficiale. Questa è proporzionale alla densità del liquido, ma introdurre micro bolle al suo interno provoca un abbassamento della densità apparente, con conseguente minor immersione e maggiore pulizia di carena.

3 Metodi di generazione delle micro bolle

Nella categoria dei meccanismi di generazione delle micro bolle, ci sono alcuni metodi comuni di generazione di bolle ultrasottili nell'ambito della air lubrication:

- per taglio (flusso turbolento): le bolle sono prodotte esercitando uno sforzo di taglio sul gas con flussi turbolenti. I flussi turbolenti sono prodotti da un tubo di Venturi oppure agitando i flussi, oppure si sviluppano per transizione laminare/turbolenta di uno strato limite. Lo sforzo di taglio può attivare una instabilità di Kelvin-Helmholtz, come dichiarato per il sistema Silverstream e riportato in Figura 1.

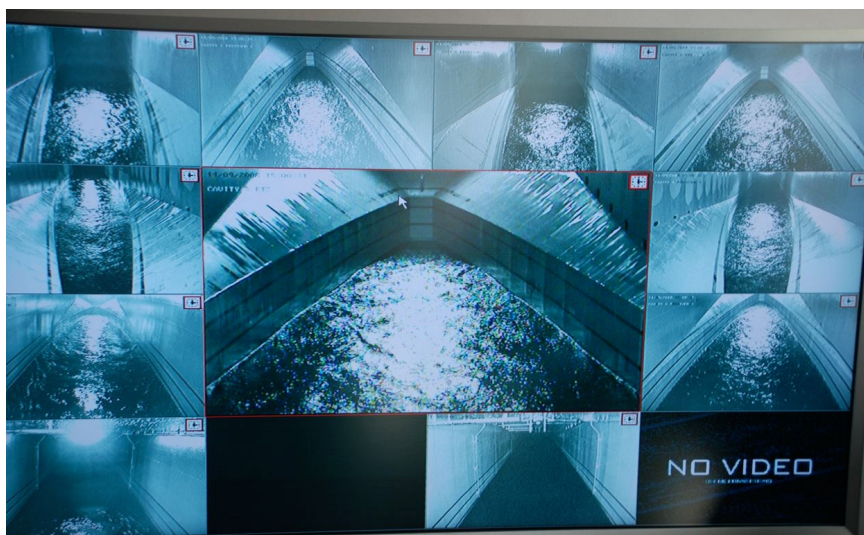


Figura 1: Quadro di controllo dell'interno delle camere di immissione d'aria del sistema Silverstream.

- attraverso micropori: questo metodo è il più semplice ed è stato, negli anni passati, il più popolare tra i ricercatori nei loro studi. Le bolle d'aria vengono generate iniettando aria compressa in un mezzo poroso. Tra i mezzi porosi utilizzati per la produzione di microbolle possiamo qui ricordare la piastra dotata di una matrice di fori utilizzata da Takahashi et al. [4], disposta sul fondo della camera di alimentazione come illustrato in Figura 2.

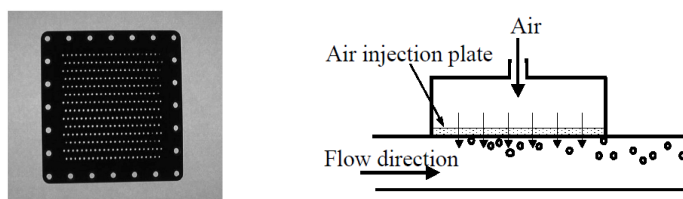


Figura 2: Sinistra: Lastra porosa utilizzata da Takahashi et al. [4]. Destra: Camera di alimentazione con la piastra di sosta sul fondo.

Kawamura et al. [5] utilizzarono un mezzo poroso fatto di polvere di rame, Kodama et al. [6] hanno invece iniettato aria attraverso una piastra di bronzo sinterizzato con pori aventi dimensione nominale di $2\ \mu\text{m}$ (Figura 3).

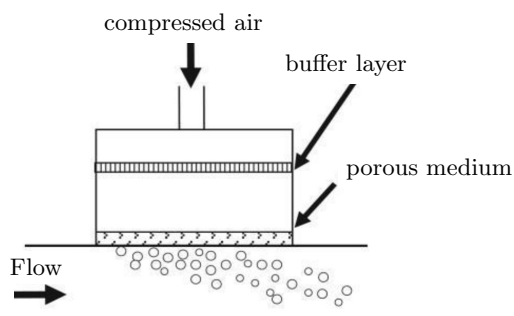


Figura 3: Rappresentazione schematica della generazione di microbolle attraverso un mezzo poroso.

- per elettrolisi (come teorizzato da McCormick e Bhattacharyya [7]): parte del gas generato all'elettrodo per elettrolisi crea micro bolle. Questo metodo è stato utilizzato anche da Jacob et al. [8] per studiare gli effetti di micro concentrazioni di micro bolle;

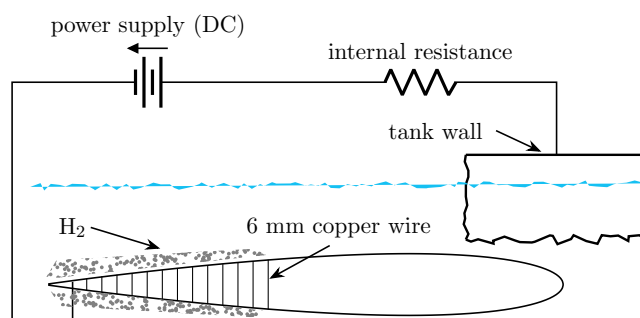


Figura 4: Schematizzazione del principio di funzionamento dell'elettrolisi.

- per contrazione: le bolle di dimensioni maggiori sono contratte, con metodi fisici o chimici, per creare bolle più piccole, ad esempio nel caso di una depressurizzazione o di un raffreddamento.

Vengono di seguito illustrati i meccanismi di produzione delle microbolle utilizzati da alcuni tra i principali sistemi di air lubrication maggiormente commercializzati:

- *MALS*;
- *Foreship*;
- *WAIP*;
- *Silverstream*;
- *Samsung Air Saver*.

4 Tecnologie di insufflaggio adottate dai più innovativi sistemi di Air Lubrication

Le tecnologie descritte nel seguito fanno riferimento ai dati bibliografici contenuti in Miozzi [1] e alle descrizioni riportate in Pavlov et al. [9].

4.1 MALS – Mitsubishi Air Lubrication System

Nel sistema *MALS* l'aria è iniettata sotto la chiglia attraverso tre gruppi di camere di distribuzione, disposti trasversalmente per tutta la larghezza della nave. Le camere di distribuzione sono alimentate da soffianti che spingono l'aria in una camera di testa intermedia. Il gruppo centrale di camere è più largo e disposto più in avanti rispetto alle camere laterali, come illustrato nelle Figure 5 e 6 rispettivamente per la nave *Yamatai* e per un portacontainer.

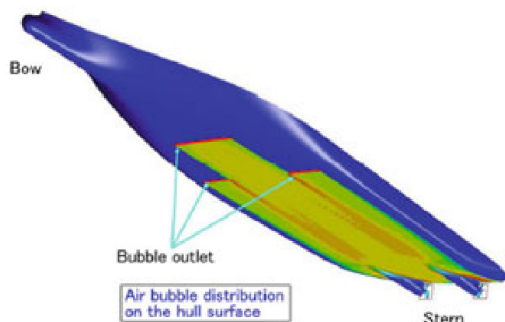


Figura 5: Rendering del sistema di air cavity *MALS* della nave *Yamatai*.

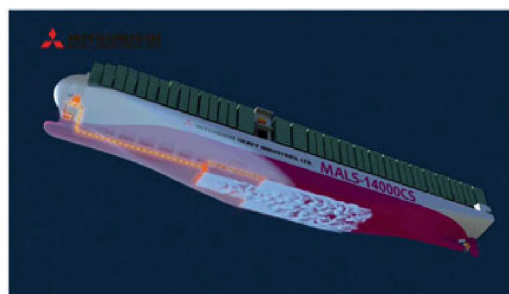


Figura 6: Vista dal basso del portacontainer con il sistema *MALS*.

Ogni camera è dotata di trasduttori di pressione e di valvole per controllare il flusso. Al loro interno è alloggiato un deflettore con cui può essere uniformato il flusso d'aria agli ugelli, in modo da garantire la formazione di uno strato di bolle uniforme e consistente. L'uscita del flusso di bolle dagli ugelli e la successiva formazione del layer di bolle è illustrata in Figura 7, destra [10].

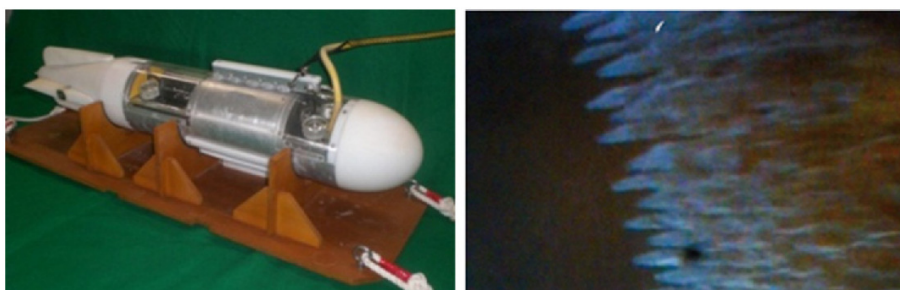


Figura 7: Sinistra: Probe per l'osservazione dal basso in immersione. Destra: Vista dal basso dei getti di bolle.

L'approccio adottato dalla Mistubishi Heavy Industries, *MHI*, consiste nel garantire un flusso d'aria dagli ugelli che sia in grado di generare un layer di bolle in grado di persistere lungo tutta la chiglia. L'aria è convogliata in camere rettangolari create all'interno dello scafo, dotate di una serie di fori per l'iniezione dell'aria, come mostrato in Figura 8.

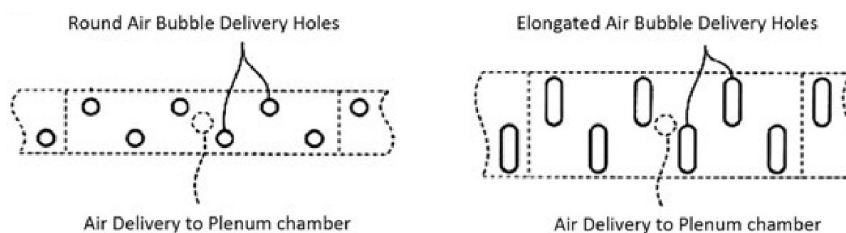


Figura 8: Fori per l'iniezione dell'aria nel sistema *MALS*.

Questi fori possono essere circolari o allungati, in considerazione del minore impatto sulla resistenza strutturale dello scafo di quest'ultima forma. È interessante notare come per *MHI* il meccanismo di soffiaggio dell'aria dagli ugelli venga agevolato dagli sforzi di taglio che agiscono sulla interfaccia aria-liquido nella parte inferiore della camera, tirando via l'aria in forma di bolle nella direzione della poppa [11]. In questo modo, ci si affida al meccanismo della instabilità di Kelvin-Helmholtz per generare un flusso stazionario di bolle. Considerando che il sistema richiede una pressione positiva per pompare aria al di sotto della chiglia della nave, questa configurazione agisce minimizzando il livello di sovrappressione richiesto e quindi la potenza necessaria per l'insufflaggio.

Una ultima osservazione riguarda l'influenza dell'elica sullo strato di bolle generato sul fondo della chiglia. Gli esperimenti su modello effettuati in vasca navale, riportati nelle Figure 9 e 10 e relativi alle prove di rimorchio e di autopropulsione, mostrano una sostanziale indifferenza dello strato di bolle alla presenza dell'elica [12].

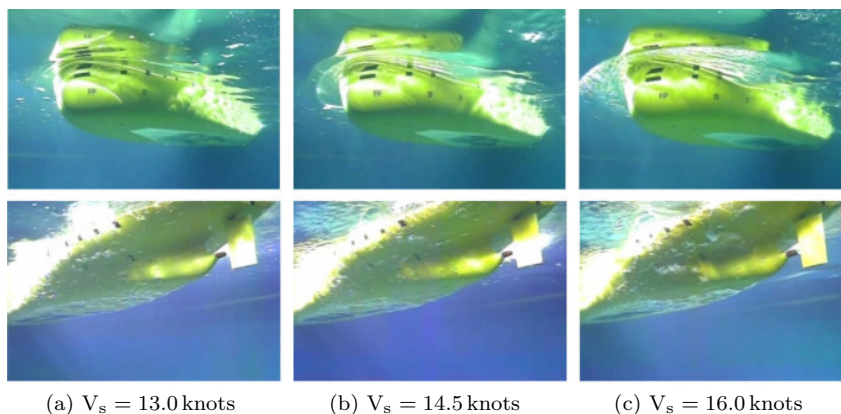


Figura 9: Lo strato di bolle sviluppato durante le prove di resistenza su modello.

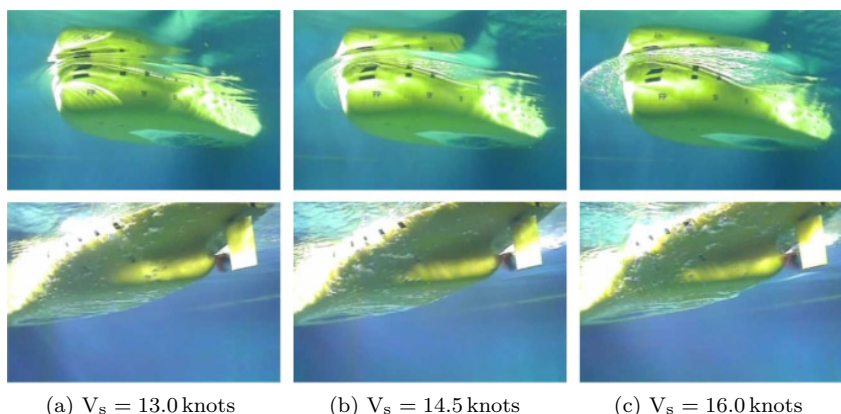


Figura 10: Lo strato di bolle sviluppato durante le prove di auto propulsione su modello.

Ulteriori studi, dedicati all'influenza dello strato di bolle sulle performances dell'elica, sono riportati in letteratura da Kawakita [13] ma esulano dall'argomento trattato in questo report.

4.2 Foreship® Air Lubrication System (ALS)

Il sistema Foreship (mostrato in Figura 11) è costituito da una serie di gruppi di camere disposti lungo l'asse di mezzeria della nave dai quali viene iniettata aria attraverso degli array di ugelli opportunamente sagomati, praticati su una lastra montata in linea con la parete della carena stessa.

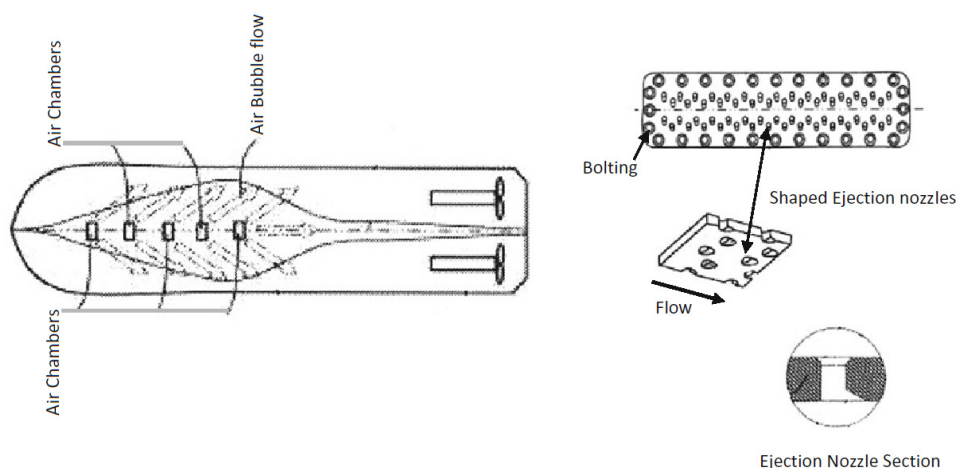


Figura 11: Sinistra: Posizionamento delle camere di distribuzione dell'aria. Ogni posizione lungo l'asse di mezzeria può ospitare più camere. Destra: Piastre di interfaccia e dettaglio degli ugelli per l'insufflaggio dell'aria.

Un deflettore disposto all'interno delle camere di distribuzione garantisce l'uniforme distribuzione del flusso d'aria dagli ugelli.

Il numero e la posizione delle camere d'aria è modellata da studi CFD in modo da ottimizzare l'uniformità dello strato di bolle sotto la chiglia. Il controllo in pressione e in volume del flusso d'aria, nonché la sua ripartizione tra i vari gruppi di camere è garantito dai dispositivi depositati nei brevetti [14, 15].

4.3 WAIP – Winged Air Induction Pipe

Il principio di funzionamento del sistema *WAIP* è riportato in Figura 12 [16].

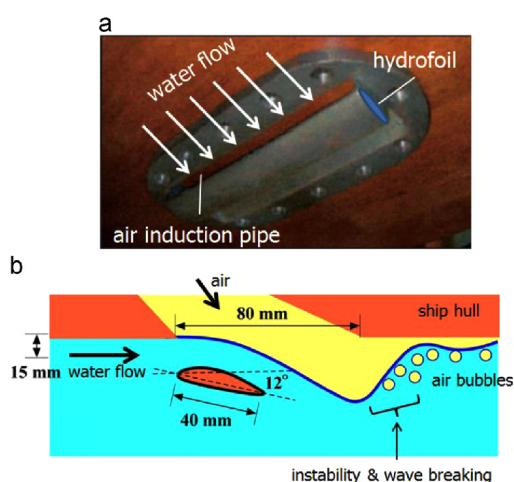


Figura 12: Schema e dimensioni del sistema *WAIP*, con evidenziati i confini della azione della instabilità di Kelvin-Helmholtz.

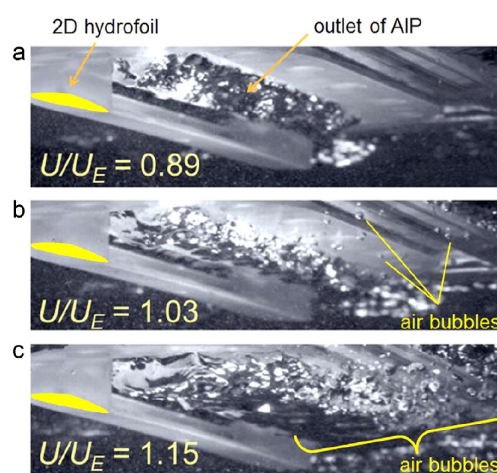


Figura 13: Influenza della velocità del flusso d'acqua nei sistemi *WAIP*.

Le aperture per l'immissione d'aria sono installate sulla superficie della chiglia, con un'ala installata immediatamente sotto l'apertura avente profilo opportuno, montata ad un angolo di attacco $> 10^\circ$. Il flusso d'acqua che investe l'ala viene deviato e la riduzione di pressione indotta al di sopra dell'ala stessa favorisce la cattura dell'aria senza bisogno di esercitare sovrappressioni significative.

L'acqua che scorre al di sopra dell'ala viene accelerata e, quando si ricongiunge al flusso esterno, dà luogo alla formazione di vortici. In pratica la formazione delle bolle è dovuta sia alla interazione aria-acqua nelle aperture della chiglia sia alla turbolenza che si genera immediatamente a valle del bordo d'uscita dell'ala, dove l'aria è incoraggiata a separarsi in piccole bolle senza bisogno di materiali porosi e sovrappressioni.

I test su modelli in tunnel di circolazione hanno consentito la stima dei livelli di pressione dell'aria necessari per garantire un flusso stazionario per la formazione delle bolle alle diverse velocità del flusso d'acqua, nonché una verifica della riduzione di resistenza ottenibile mediante l'utilizzo di ali con differenti profili. La verifica del corretto profilo è infatti una condizione critica per il raggiungimento di livelli accettabili di riduzione di resistenza.

La Figura 13 illustra l'evidenza di una velocità critica di innesco, al di sotto della quale il sistema *WAIP* non dà luogo alla produzione del flusso di bolle (a), intorno alla quale le bolle prodotte sono insufficienti per agire riducendo la resistenza (b) e al di sopra della quale il layer di bolle agisce come air lubricator. Un istante rappresentativo del funzionamento a pieno regime del sistema *WAIP* è illustrato in Figura 14. Il più significativo risultato dei test nel canale ha indicato che il sistema è efficiente se il profilo viene completamente investito dal flusso d'acqua (Figura 15).

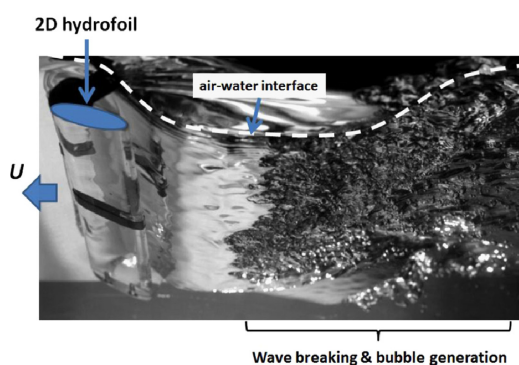


Figura 14: Sistema *WAIP* con flusso di bolle pienamente sviluppato.

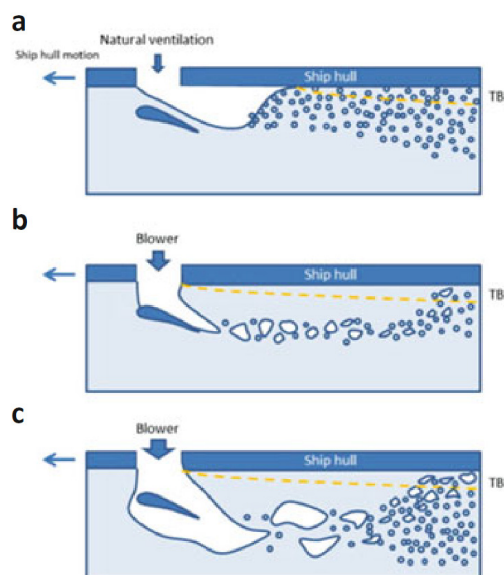


Figura 15: Metodi di insufflaggio d'aria sotto la chiglia di una nave con il sistema *WAIP*.

Se il flusso d'aria è troppo elevato e l'ala inizia a ventilare nella parte superiore, la resistenza complessivamente aumenterà, l'andamento delle bolle sarà erratico e non avrà luogo l'effetto di air lubrication per l'assenza di un flusso omogeneo di bolle piccole. Il meccanismo chiave di riduzione della resistenza utilizzato in *WAIP* riguarda la migrazione del flusso di bolle all'interfaccia tra lo strato limite turbolento e la parte laminare, dove lo shear stress è più alto.

4.4 Silverstream[®] Air Lubrication System

Il sistema Silverstream è caratterizzato da camere di distribuzione d'aria disposte longitudinalmente alla chiglia della nave, distribuite in modo da seguire accuratamente la forma dello scafo (Figure 16 e 17). Il flusso d'aria che alimenta le camere ha una pressione che riequilibra appena la pressione al fondo dello scafo dovuta all'immersione. La geometria del sistema è organizzata in modo tale che, quando la nave avanza, il flusso d'acqua intrappola aria nello strato limite turbolento e la vorticità associata all'instabilità di Kelvin-Helmholtz crea un flusso di bolle di piccole dimensioni. Il volume di aria immesso nella camera riequilibra quello catturato nello strato limite, il quale è a sua volta funzione della velocità della nave.



Figura 16: Vista dal basso della camera di rilascio dell'aria del sistema *Silverstream*.

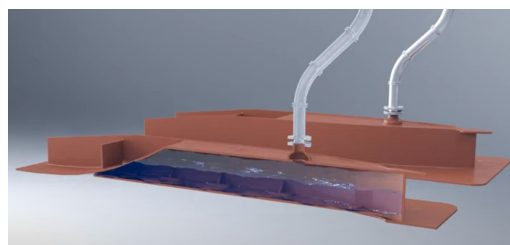


Figura 17: Modello della camera di insufflaggio del sistema *Silverstream*.

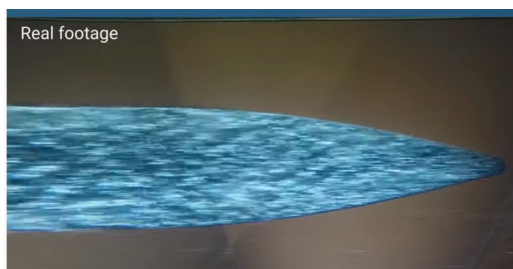


Figura 18: Formazione dello strato di bolle al di sotto della camera di immissione d'aria per il sistema *Silverstream*.



Figura 19: Distribuzione delle bolle a valle delle camere di immissione d'aria nel sistema *Silverstream*.

I test effettuati da *Silverstream* affermano che con una accurata regolazione di pressione e volume d'aria entranti, è possibile ottenere un flusso persistente di bolle molto piccole, intorno a 1 mm, e che il flusso può permanere per tutta la lunghezza dello scafo. Il piccolo diametro assicura una elevata tensione superficiale e un debole galleggiamento.

La camera di rilascio dell'aria è progettata per evitare di interferire con l'interfaccia aria-acqua e per incoraggiare l'interazione tra il flusso d'acqua che scorre sotto la chiglia della nave e l'aria nello strato limite, favorendo l'instaurarsi dell'instabilità di Kelvin-Helmholtz e minimizzando l'energia necessaria all'instaurarsi del flusso di bolle.

Un fattore chiave di questo sistema risiede nell'utilizzo dello strato limite stesso per generare il flusso di bolle, evitando significative sovrappressioni, garantendo un regime stabile e minimizzando la potenza richiesta per il suo sostentamento.

Per ridurre l'eventuale resistenza aggiuntiva indotta dalle camere di immissione d'aria quando il sistema è spento, il sistema può utilizzare una singola piastra incassata nell'unità di rilascio.

4.5 Samsung Heavy Industries *Saver Air*

Il sistema *Saver Air* progettato dalla Samsung consiste in una serie di insufflatori, in grado di generare uno strato di bolle capace di indurre una riduzione di resistenza all'avanzamento dello scafo.

Lo schema di iniezione dell'aria utilizzato nei primi test comprendeva due set da tre iniettori, ognuno dotato di due file di fori sfalsate come mostrato in Figura 20.

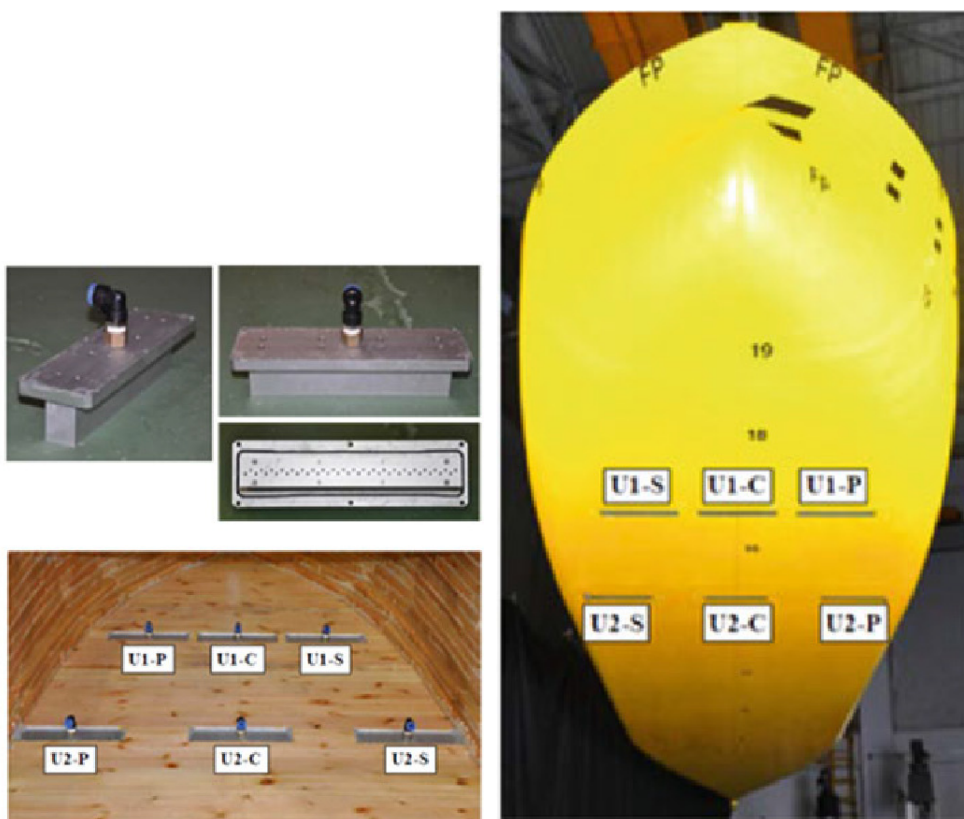


Figura 20: Sistema di iniezione e configurazione degli iniettori del sistema Samsung Saver Air.

Riferimenti bibliografici

- [1] Miozzi M. Sistemi di air lubrication per la riduzione della resistenza viscosa delle carene navali. Rapporto Tecnico SP.4-OR.1-D.1, Progetto TRIM – Tecnologia e Ricerca Industriale per la Mobilità Marina, 2021. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Ingegneria del Mare.
- [2] van Gils D. P. M., Narezo Guzman D., Sun C. e Lohse D. The importance of bubble deformability for strong drag reduction in bubbly turbulent Taylor-Couette flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 722:317–347, 2013.
- [3] Miozzi M. Misure di flusso e della cinematica delle bolle in un getto di parete aria-acqua mediante Particle Image Velocimetry e shadowgrafia 3D risolta nel tempo. Rapporto Tecnico SP.4-OR.2-D.2, Progetto TRIM – Tecnologia e Ricerca Industriale per la Mobilità Marina, 2021. Consiglio Nazionale delle Ricerche, Istituto di Ingegneria del Mare.
- [4] Takahashi T., Kakugawa A., Nagaya S., Yanagihara T. e Kodama Y. Mechanisms and scale effects of skin friction reduction by microbubbles. In *Proceedings of the 2nd Symposium on the Smart Control of Turbulence*, pages 1–9. University of Tokyo, 2001.
- [5] Kawamura T., Moriguchi Y., Kato H., Kakugawa A. e Kodama Y. Effect of bubble size on the microbubble drag reduction of a turbulent boundary layer. In *Proceedings of the ASME/JSME 4th Joint Fluids Summer Engineering Conference*, volume Volume 1: Fora, Parti A, B, C, e D di *Fluids Engineering Division Summer Meeting*, pages 647–654, 2003.
- [6] Kodama Y., Kakugawa A., Takahashi T. e Kawashima H. Experimental study on microbubbles and their applicability to ships for skin friction reduction. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 21(5):582–588, 2000.
- [7] McCormick M. E. e Bhattacharyya R. Drag reduction of a submersible hull by electrolysis. *Naval Engineers Journal*, 85(2):11–16, 1973.
- [8] Jacob B., Olivieri A., Miozzi M., Campana E.F. e Piva R. Drag reduction by microbubbles in a turbulent boundary layer. *Physics of Fluids*, 22(11):115104, 2010.
- [9] Pavlov G. A., Yun L., Bliault A. e He S. *Reducing Friction Resistance*, pages 85–122. Springer, New York, NY, 2020.
- [10] Kawakita C., Sato S. e Okimoto T. Application of simulation technology to Mitsubishi air lubrication system. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, 52(1):50–56, 2015.
- [11] Mizokami S., Kawakita C., Kodan Y., Takano S., Higasa S. e Shigenaga R. Experimental study of air lubrication method and verification of effects on actual hull by means of sea trial. *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review*, 47(3):41–47, 2010.

- [12] Jang J., Choi S. H., Ahn S., Kim B. e Seo J. S. Experimental investigation of frictional resistance reduction with air layer on the hull bottom of a ship. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 6(2):363–379, 2014.
- [13] Kawakita C. Study on marine propeller running in bubbly flow. In Binns J., Brown R. e Bose N., editors, *Proceedings of Third International Symposium on Marine Propulsors, SMP'13*, pages 405–411. Australian Maritime College, University of Tasmania, 2013.
- [14] Aarnio M. e Lundquist H.-P. Bubble system for ships, 2014. UK Patent Application GB 2505236 A.
- [15] Aarnio M. e Lundquist H.-P. Bubble system for ships, 2014. UK Patent GB 2505281 B.
- [16] Kumagai I., Takahashi Y. e Murai Y. Power-saving device for air bubble generation using a hydrofoil to reduce ship drag: Theory, experiments, and application to ships. *Ocean Engineering*, 95:183–194, 2015.